UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA**

# DESARROLLO DEL MODELO Y OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DEL MUNICIPIO DE VILLARROBLEDO


AUTORA: ANA ISABEL GUTIÉRREZ MONTOYA

TUTORA: ELENA GÓMEZ SELLÉS

COTUTOR:


**Curso Académico: 2017-18**

# AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas esas personas que han hecho posible que pueda realizar este trabajo y que haya podido finalizar esta gran etapa.

Comenzar por mi tutora, Elena Gómez Sellés, por su acompañamiento y su ayuda en la realización de este trabajo, ofreciéndome la oportunidad de adentrarme en el mundo de la hidráulica urbana, de vital importancia en la búsqueda de mejoras para los abastecimientos de las poblaciones.

Mi familia y amigos, gracias a quienes soy quien soy y hacia quienes sólo puedo expresar mi más sincero agradecimiento por apoyarme durante estos cuatro años que culminan.

A Gestagua Villarrobledo, en especial a Joaquín Pinós y Juan Ramón Cabañero, por la aportación de datos para la reproducción del modelo y por haber resuelto las dudas que surgían en el proceso.

Finalmente, agradecer al Excmo. Ayuntamiento de Villarrobledo, concretamente al arquitecto Alfredo Moreno, por su contribución en este trabajo con el plano de la red de tuberías del municipio.

# RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado consiste en la reproducción del modelo de una red de abastecimiento de agua de un núcleo urbano y en un análisis que permita conocer el funcionamiento actual y los posibles puntos de actuación para la mejora del sistema. El estudio se ha centrado en el municipio albaceteño de Villarrobledo, una población de unos 25.000 habitantes.

La ciudad presenta dos puntos de captación de agua, los cuales son llamados “Pozo de La Capitana” y “Pozo de La Estación”, y dos depósitos de almacenamiento que dan suministro a la red general, comúnmente conocidos como “Depósito Calle Dalí” y “Depósito Plaza de Picasso”.

Para la realización del modelo se ha partido de un plano de las tuberías en AutoCAD, el cual ha sido transformado en EpaCAD para obtener un archivo de EPANET. Una vez se ha obtenido el modelo en EPANET es preciso realizar una serie de ajustes para conseguir una red más parecida al sistema real. Para ello, es necesaria cierta información sobre diversos aspectos de la red como datos de los consumos de los abonados, volúmenes de los depósitos o puntos de funcionamiento de las bombas. Toda esta información ha sido proporcionada por Gestagua, la empresa que se encarga de la gestión de aguas de la localidad, y por el Excmo. Ayuntamiento de Villarrobledo.

Una vez se ha elaborado el modelo, se ha realizado un análisis para detectar las ineficiencias y se han presentado algunas medidas que podrían mejorar el suministro de la población.

**Palabras Clave:** EPANET, modelo, tubería, depósito, red, suministro, población.

# RESUM

El present Treball de Fi de Grau consisteix en la reproducció del model d'una xarxa d'abastiment d'aigua d'un nucli urbà i en una anàlisi que permeta conèixer el funcionament actual i els possibles punts d'actuació per a la millora del sistema. L'estudi s'ha centrat en el municipi albaceteny de Villarrobledo, una població d'uns 25.000 habitants.

La ciutat presenta dos punts de captació d'aigua, els quals són anomenats "Pou de la Capitana" i "Pou de l'Estació", i dos dipòsits d'emmagatzematge que donen subministrament a la xarxa general, comunament coneguts com a "Dipòsit Carrer Dalí" i "Dipòsit Plaça de Picasso".

Per a la realització del model s'ha partit d'un plànol de les tuberies en AutoCAD, el qual ha sigut transformat en EpaCAD per a obtindre un arxiu d'EPANET. Una vegada s'ha obtingut el model en EPANET cal realitzar una sèrie d'ajustos per a aconseguir una xarxa més semblant al sistema real. Per a açò, és necessària certa informació sobre diversos aspectes de la xarxa com a dades dels consums dels abonats, volums dels dipòsits o punts de funcionament de les bombes. Tota aquesta informació ha sigut proporcionada per Gestagua, l'empresa que s'encarrega de la gestió d'aigües de la localitat, i per l'Excm. Ajuntament de *Villarrobledo.

Una vegada s'ha elaborat el model, s'ha realitzat una anàlisi per a detectar les ineficiències i s'han presentat algunes mesures que podrien millorar el subministrament de la població.

**Paraules clau:** EPANET, model, tuberia, dipòsit, xarxa, subministrament, població.

# ABSTRACT

The present project develops the reproduction of the water supply network of an urban nucleus and also an analysis that allows to acquire knowledge related to the current function and the possible interventions to improve de system.

The study has focused on the municipality of Albacete, which has inhabitants of 25.000.

The city has two points of water catchment, called 'Pozo de La Capitana' and 'Pozo de La Estación'. It also has two storage tanks that supplies the general network, they are commonly known as 'Depósito Calle Dalí' and 'Depósito Plaza de Picasso'.

The starting point to carry out the model was a piping plan on AutoCAD, which has been transformed into EpaCAD to obtain an EPANET File.

Once the EPANET model is obtained it's precise to make some adjustments to achieve a network as similar as possible to the real system.

To be able to this, information about different aspects of the network is required, such as consumption data, tank capacity or pump functioning.

All of this information has been provided by Gestagua, the company in charge of the water management of city, and also by the Town Hall of Villarrobledo.

Once the model has been elaborated, the analysis has been made to identify ineffectiveness and subsequently actions have been considered to improve the supply of the city.

**Keywords:** EPANET, model, piping, storage, network, supply, town.

# ÍNDICE DEL TRABAJO

**MEMORIA**

1. INTRODUCCIÓN
2. DESCRIPCIÓN INSTALACIONES ACTUALES
3. PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO
4. DEFICIENCIAS ENCONTRADAS EN EL MODELO DE LA RED
5. MEJORAS EN LA RED
6. CONCLUSIONES
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**PRESUPUESTO**

**PLANOS**

1. RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA (ZONA NOROESTE)
2. RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA (ZONA NORESTE)
3. RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA (ZONA SUR)

# MEMORIA

# ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.1. OBJETIVO DEL TRABAJO ..... 1
1.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO ..... 1
1.3. ANTECEDENTES ..... 2
1.4. MUNICIPIO DE VILLARROBLEDO ..... 2
1.4.1. Localización ..... 2
1.4.2. Demografía ..... 3
1.4.3. Localización zonas industriales ..... 4
2.1. INTRODUCCIÓN ..... 5
2.2. PUNTOS DE CAPTACIÓN ..... 7
2.2.1. Pozo de La Capitana ..... 7
2.2.2. Pozo de La Estación ..... 7
2.2.3. Pozo de Paporro ..... 7
2.2.4. Tubería Manchega ..... 7
2.3. PUNTOS DE ALMACENAMIENTO ..... 8
2.3.1. Depósito Calle Dalí ..... 8
2.3.2. Depósito Plaza de Picasso ..... 8
2.4. TUBERÍAS ..... 9
2.5. BOMBAS ..... 10
2.5.1. Bomba Pozo de la Capitana ..... 11
2.5.2. Bomba Pozo de la Estación ..... 11
2.5.3. Grupo presión general ..... 11
2.5.4. Grupo presión UMOVI ..... 12
2.6. ELEMENTOS DE REGULACIÓN ..... 13
2.6.1. Válvulas de compuerta ..... 13
2.7. ELEMENTOS DE MEDICIÓN ..... 13
2.8. AUTOMATISMOS Y CONTROLES ..... 13

3.1. DATOS INICIALES ..... 14
3.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EN EPANET ..... 15
3.2.1. Conversión del fichero de AutoCAD a EPANET ..... 15
3.2.2. Corrección de tuberías ..... 16
3.2.3. Asignación de cotas ..... 16
3.2.4. Incorporación de los puntos de captación ..... 16
3.2.5. Incorporación de los puntos de alimentación ..... 17
3.2.6. Introducción de controles simples en los grupos de presión ..... 18
3.2.7. Inconvenientes durante la construcción del modelo ..... 19
3.2.7.1. Conexión entre depósitos ..... 19
3.2.7.2. Conexión de los grupos de presión ..... 20
3.2.7.3. Presiones negativas o muy bajas ..... 21
3.3. CARGA HIDRÁULICA DEL MODELO ..... 22
3.3.1. Demanda base ..... 22
3.3.2. Curva de modulación ..... 24
3.3.3. Introducción de las fugas en el modelo ..... 25
3.4. ANÁLISIS DEL MODELO ..... 26
3.4.1. Comprobación volumen inyectado ..... 26
3.4.2. Balance hídrico de la red ..... 27
3.4.3. Rendimientos hídricos porcentuales ..... 30
3.4.4. Diagnóstico energético de la red ..... 31
3.4.5. Auditoría energética de la red ..... 31
3.4.6. Análisis económico ..... 34
4.1. CONSIDERACIONES DEL FUNCIONAMIENTO ACTUAL DE LA RED ..... 35
4.1.1. Bajas presiones ..... 35
4.1.2. Velocidades bajas ..... 36
4.1.3. Pérdidas unitarias elevadas ..... 38
5.1. CONTROL DEL CLORO ..... 39
5.1.1. Proceso de cloración ..... 39
5.1.2. Nivel de cloro en Villarrobledo ..... 40
5.2. REDUCCIÓN PÉRDIDAS UNITARIAS ..... 41
5.3. AUMENTO DE PRESIONES ..... 41

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

*Ilustración 1. Localización de Villarrobledo* ..... 2
*Ilustración 2. Localización de Villarrobledo en la provincia* ..... 3
*Ilustración 3. Evolución del número de habitantes de Villarrobledo (1900-2017)* ..... 3
*Ilustración 4. Zonas industriales del municipio de Villarrobledo* ..... 4
*Ilustración 5. Esquema captación de agua en Villarrobledo* ..... 5
*Ilustración 6. División por sectores de la ciudad* ..... 6
*Ilustración 7. Detalle división por sectores de la ciudad* ..... 7
*Ilustración 8. Vista exterior depósitos Calle Dalí* ..... 8
*Ilustración 9. Diámetros de las tuberías de la población* ..... 10
*Ilustración 10. Curva característica y de rendimiento de una BVF (Capitana)* ..... 11
*Ilustración 11. Curva característica y de rendimiento de un BVF (Estación)* ..... 11
*Ilustración 12. Curva característica y de rendimiento de una BVV (Grupo presión general)* ..... 12
*Ilustración 13. Curva característica y de rendimiento de una BVV (Grupo presión UMOVI)* ..... 12
*Ilustración 14. Vista del trazado de las tuberías en AutoCAD* ..... 14
*Ilustración 15. Plano en EPANET con fondo* ..... 15
*Ilustración 16. Ventana del editor por grupo* ..... 16
*Ilustración 17. Dimensiones depósito Calle Dalí* ..... 18
*Ilustración 18. Controles simples en los grupos de presión* ..... 18
*Ilustración 19. Conexión entre depósitos* ..... 20
*Ilustración 20. Vista ampliada de la conexión entre depósitos* ..... 20
*Ilustración 21. Grupo de presión antiguo situado en Depósito Plaza Picasso* ..... 21
*Ilustración 22. Mapa de presiones sin el grupo de presión UMOVI* ..... 21
*Ilustración 23. Nudos con demanda base igual a 0* ..... 22
*Ilustración 24. Curva modulación demanda para una población tipo* ..... 24
*Ilustración 25. Controles para el bombeo fuera del periodo de 0 a 8h* ..... 26
*Ilustración 26. Controles para el bombeo de 0 a 8h* ..... 26

*Ilustración 27. Distribución de caudales en el balance hídrico* ..... 28

*Ilustración 28. Calificación de la gestión de un abastecimiento en función del $\eta_g$* ..... 30

*Ilustración 29. Gráfica porcentajes de la energía total consumida* ..... 33

*Ilustración 30. Presiones para la hora de menor demanda (4h)* ..... 35

*Ilustración 31. Presiones para la hora de mayor demanda (8h)* ..... 36

*Ilustración 32. Velocidades para la hora de menor demanda (4h)* ..... 37

*Ilustración 33. Velocidades para la hora de mayor demanda (8h)* ..... 38

*Ilustración 34. Pérdidas unitarias en tuberías* ..... 38

*Ilustración 35. Concentración de cloro al tercer día* ..... 40

*Ilustración 36. Curva característica y de rendimiento de la bomba (grupo presión general)* ..... 41

*Ilustración 37. Curva característica y de rendimiento de la bomba (grupo presión UMOVI)* ..... 42

*Ilustración 38. Presiones en la zona industrial con válvula reductora* ..... 42

*Ilustración 39. Mapa de presiones tras mejora (4h)* ..... 43

*Ilustración 40. Mapa de presiones tras mejora (8h)* ..... 43

*Ilustración 41. Gráfico energía total consumida tras mejora* ..... 44

# ÍNDICE DE TABLAS

*Tabla 1. Diámetros polietileno de baja densidad* ..... 9
*Tabla 2. Diámetros polietileno de alta densidad* ..... 9
*Tabla 3.Diámetros fibrocemento* ..... 9
*Tabla 4. Diámetros PVC y PVC orientado* ..... 9
*Tabla 5. Velocidades relativas para el grupo de presión general* ..... 19
*Tabla 6. Velocidades relativas para el grupo de presión UMOVI* ..... 19
*Tabla 7. Consumos por trimestres en la población para el año 2016* ..... 23
*Tabla 8. Valores demanda base en LPS* ..... 26
*Tabla 9. Comparación volumen inyectado* ..... 27
*Tabla 10. Balance hídrico del sistema para el año 2016* ..... 29
*Tabla 11. Término de potencia y energía para la tarifa 3.1.A* ..... 34
*Tabla 12. Valores totales para el año 2016* ..... 34
*Tabla 13. Punto de funcionamiento grupo presión general* ..... 41
*Tabla 14. Punto de funcionamiento grupo presión UMOVI* ..... 42
*Tabla 15. Comparación energética tras la incorporación de la mejora* ..... 45

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. OBJETIVO DEL TRABAJO

El Trabajo Fin de Grado tiene por objeto abordar la modelación y localización de puntos de mejora de la red de distribución de agua de Villarrobledo mediante el uso del programa de simulación hidráulica EPANET, que sirve para obtener análisis y diagnósticos de redes de abastecimiento de agua, haciendo posible anticipar soluciones a posibles problemas y valorar mejoras en el sistema sin necesidad de ejecutarlas.

Por otro lado, se pretende trabajar sobre el diseño de una red de abastecimiento real que permita estudiar su comportamiento y analizar los resultados para llegar a soluciones que den garantía de un suministro de calidad a la población. Se hace necesario profundizar en el aprendizaje de los numerosos aspectos que existen en un sistema como este: tipo de red, válvulas, curvas de bombas de impulsión, registro de volúmenes inyectados y facturados o volúmenes fugados.

Además, persigue alcanzar los conocimientos pertinentes para saber qué alternativas son las más convenientes ante cada situación desfavorable que se presenta. Cualquier red de abastecimiento real sufre numerosas situaciones anómalas a lo largo de su vida que son objeto de mejora.

Todo ello se basa en considerar los problemas hallados en la red actual y realizar un estudio de mejoras que puedan reparar los defectos encontrados en la instalación. El modelo final servirá de apoyo a la hora de gestionar el abastecimiento de aguas de la localidad de Villarrobledo, al objeto de mejorar no solo la calidad del servicio que se ofrece a los usuarios, sino también optimizar los recursos reduciendo el coste económico y el impacto ambiental.

## 1.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

La estructura del trabajo sigue un orden que coincide con la sucesión de las diferentes etapas en el proceso de creación del modelo de la red y las posteriores mejoras que podrían implantarse para perfeccionar el sistema.

En primer lugar, se hace una presentación del lugar objeto de estudio para conocer la ubicación y características hidráulicas del municipio. Una vez contextualizado el escenario ha sido necesaria la obtención de información acerca de los elementos que conforman la red de aguas para poder introducirlos y simularlos en el modelo. La información requerida ha sido aportada por la empresa gestora de aguas de Villarrobledo (Gestagua).

Con todo lo anterior, se ha analizado un modelo inicial a partir del cual se han realizado modificaciones con el propósito de advertir posibles ineficiencias en el sistema y poder establecer una propuesta para mejorar el sistema de distribución de aguas.

## 1.3. ANTECEDENTES

Desde siempre, Villarrobledo ha tenido grandes problemas para el suministro de agua potable. A pesar de que la ciudad estaba rodeada de humedales (el Carrillo Cerrado, la Carreruela, el Chavarco, la Laguna y la Laguna de Esteban) solo queda constancia de que se utilizaban como abrevadero para las caballerías y ganados. A lo largo de los años, han existido numerosos proyectos para la construcción de infraestructuras hidráulicas que garantizasen el suministro de agua en la ciudad, con obras que van desde la construcción de una canalización desde las Lagunas de Ruidera para traer aguas desde Sotuélamos o el proyecto de construcción de un embalse en Los Castellones. Actualmente, es una red de tres pozos, propiedad del municipio, los que garantizan el abastecimiento de Villarrobledo. Esta agua bombeada desde las captaciones se almacena en dos depósitos, en los cuales se efectúa su tratamiento con desinfectante antes de que el agua llegue a la red de distribución.

El día 1 de octubre de 1989, Gestagua asumió la responsabilidad de la gestión del abastecimiento de Villarrobledo. Pasados unos meses, el día 15 de marzo de 1991, el Excmo. Ayuntamiento de Villarrobledo amplió su confianza en ellos permitiendo además la gestión del servicio de saneamiento de la ciudad. Ahora esta empresa es la que trabaja todas las etapas del ciclo del agua en la localidad, aportando unos conocimientos técnicos capaces de conciliar la gestión con la conservación de los equilibrios naturales.

Gestagua opera el agua en España desde 1986 en medio centenar de municipios, con más de 500.000 habitantes servidos. La filial española Gestagua forma parte del Grupo Saur.

## 1.4. MUNICIPIO DE VILLARROBLEDO

### 1.4.1. Localización

Villarrobledo es un municipio español y una ciudad de la provincia de Albacete (Castilla-La Mancha), situada al noroeste de la provincia y fronteriza con las provincias de Cuenca y Ciudad Real, en la mancomunidad de La Mancha del Júcar-Centro. Villarrobledo cuenta con una extensión territorial de 862,41 km$^2$. Se localiza a 39°16’00’’ latitud Norte y 2°36’00’’ longitud Oeste a una altitud de 724 metros sobre el nivel del mar.

*Ilustración 1. Localización de Villarrobledo*

*Ilustración 2. Localización de Villarrobledo en la provincia*

### 1.4.2. Demografía

En la actualidad el municipio de Villarrobledo cuenta con 25.317 habitantes y una densidad de población de 29,36 hab/km$^2$. Prácticamente la totalidad de la población está concentrada en la ciudad de Villarrobledo. No obstante, el municipio alberga además las pedanías de Casas de Peña (<100 hab.) y Ventas de Alcolea (<100 hab.).

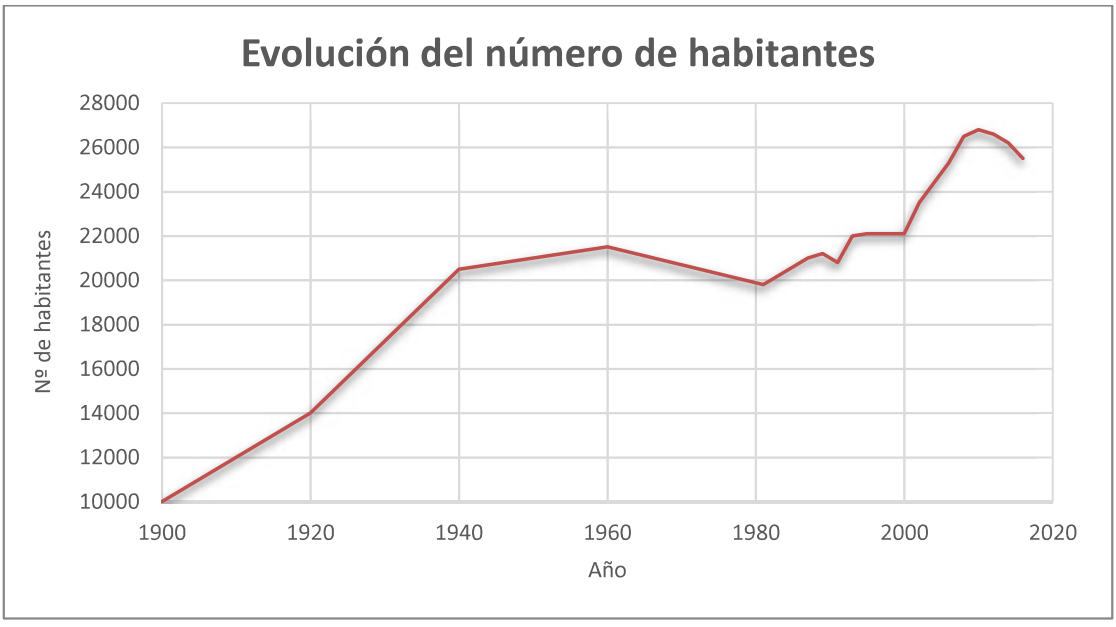



*Ilustración 3. Evolución del número de habitantes de Villarrobledo (1900-2017)*

### 1.4.3. Localización zonas industriales

Villarrobledo cuenta con varias zonas industriales que son relevantes a la hora de realizar el modelo, ya que se proporciona la facturación a los abonados desglosada en uso doméstico y uso industrial, clasificación clave en la asignación de la demanda base. En la siguiente imagen se muestran las tres áreas industriales más importantes del municipio.

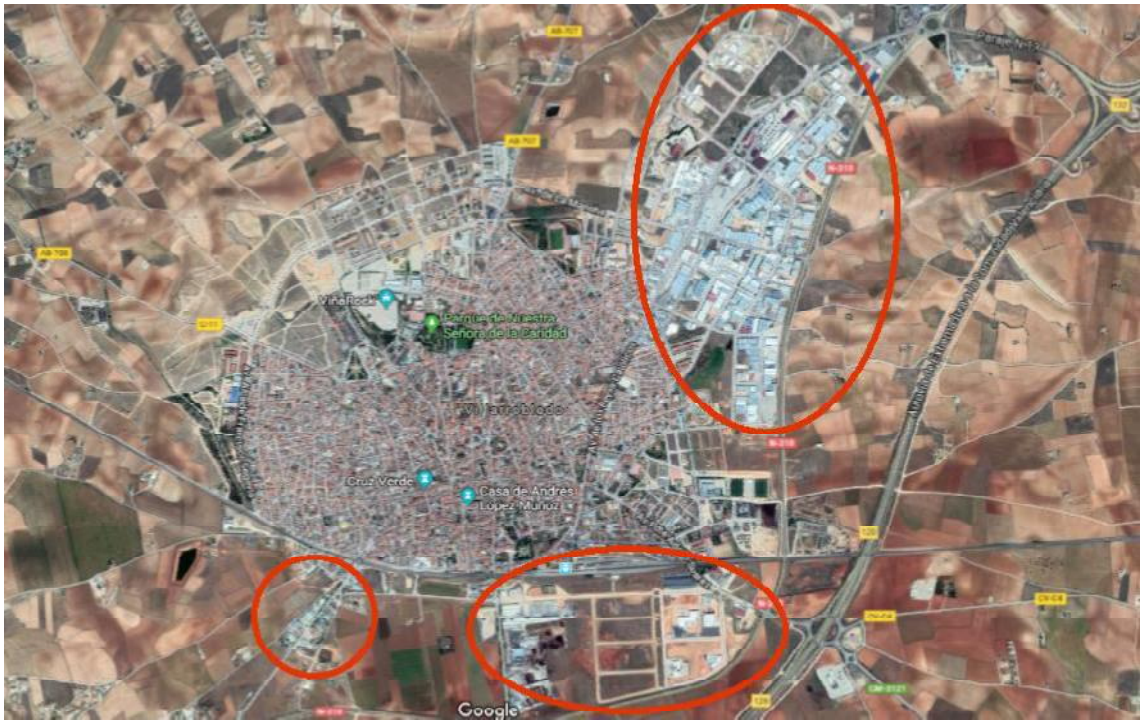



*Ilustración 4. Zonas industriales del municipio de Villarrobledo*

# CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN INSTALACIONES ACTUALES

## 2.1. INTRODUCCIÓN

La empresa encargada de la gestión de aguas de Villarrobledo es Gestagua. Para la realización del trabajo se ha necesitado información, la cual ha sido aportada por personal de las oficinas de esta compañía situadas en el propio municipio. A su vez Gestagua trabaja con información que es propiedad del Excmo. Ayuntamiento de Villarrobledo, por lo que también ha sido necesaria la colaboración del arquitecto municipal a la hora de conseguir documentos del trazado de tuberías de la población.

Es posible darse cuenta de que la red de distribución de aguas de Villarrobledo tiene una antigüedad considerable, pues la mayoría de las tuberías son de fibrocemento, material muy utilizado en España entre 1940 y finales del siglo pasado. Las nuevas instalaciones de tuberías ya se han ido realizando con materiales plásticos como el polietileno (PE) o el policloruro de vinilo (PVC), que presenta mejores propiedades.

La imagen mostrada a continuación presenta la instalación general de los depósitos de Villarrobledo.

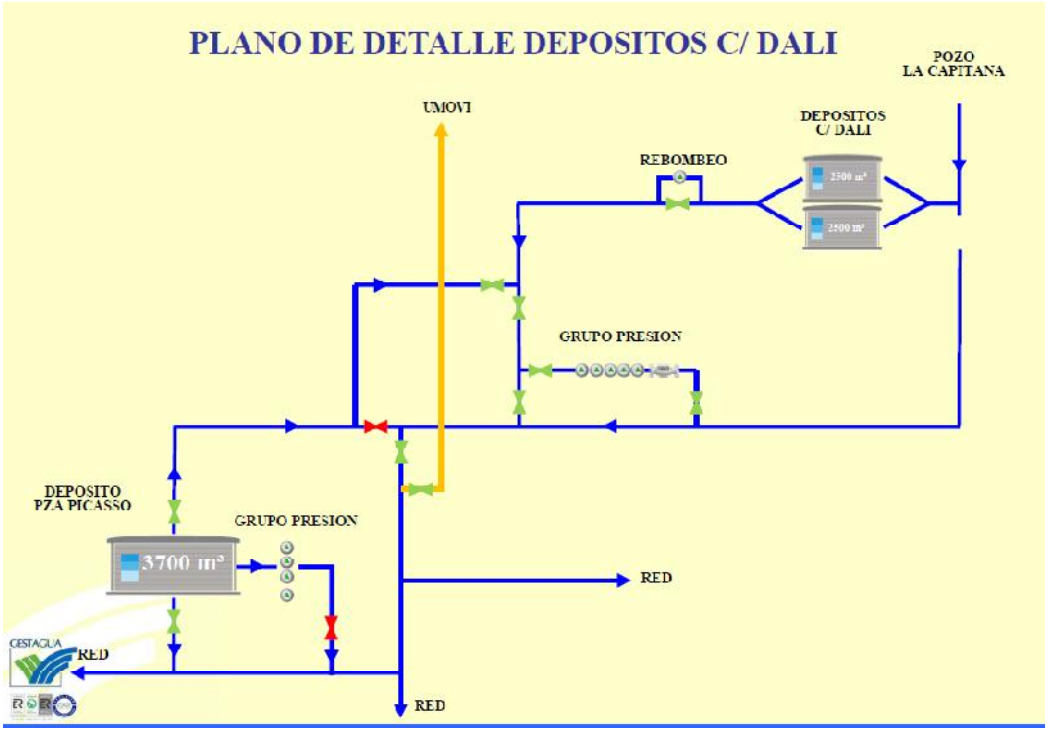



*Ilustración 5. Esquema captación de agua en Villarrobledo*

La captación de agua de la ciudad se realiza mediante el bombeo en dos pozos de los tres existentes, el tercero restante está solo para casos de emergencia por el alto contenido de nitratos, por lo que no se tendrá en cuenta a la hora de reproducir el modelo. El agua de cada pozo es impulsada a un depósito y de allí es bombeada hacia la red general mediante dos grupos de presión existentes, dependiendo de la zona a la que sea dirigida el agua potable. Además, existe una tubería de comunicación entre depósitos que va en un sentido u otro dependiendo de los niveles en éstos. En la ilustración previa, proporcionada por Gestagua, se puede observar un rebombeo y un grupo de presión de cuatro bombas que actualmente no están en funcionamiento. Asimismo, en el esquema falta el grupo de tres bombas que aumenta la presión hacia la Urbanización Molino de Viento (UMOVI).

Por último, señalar que la red de abastecimiento de agua potable de Villarrobledo está distribuida en 10 sectores perfectamente definidos, lo que permite saber el número de abonados, los consumos de los mismos, el caudal y volumen suministrado en cada sector, y así poder mejorar la eficacia en la búsqueda de fugas que se realiza de forma constante en el municipio.

El objetivo principal de la sectorización es detectar averías de forma rápida. Para ello, se cuenta con un contador a la entrada de cada sector que permite saber si hay alguna irregularidad y también se hacen campañas de detección de fugas regularmente. Además, se atiende al consumo de una hora de la noche que coincida con el caudal mínimo nocturno, punto con facilidad para la localización de las fugas, ya que aumentan las presiones y es más fácil que el agua que se encuentra en las tuberías salga por cualquier grieta o falla existente. Si el nivel del volumen nocturno va aumentando suele suponer que la red cada vez tiene más fugas.

La división por sectores en Villarrobledo está implantada desde hace unos 8 o 10 años y aún, actualmente, se siguen creando más subsectores. En las imágenes siguientes se muestra la sectorización de la población:

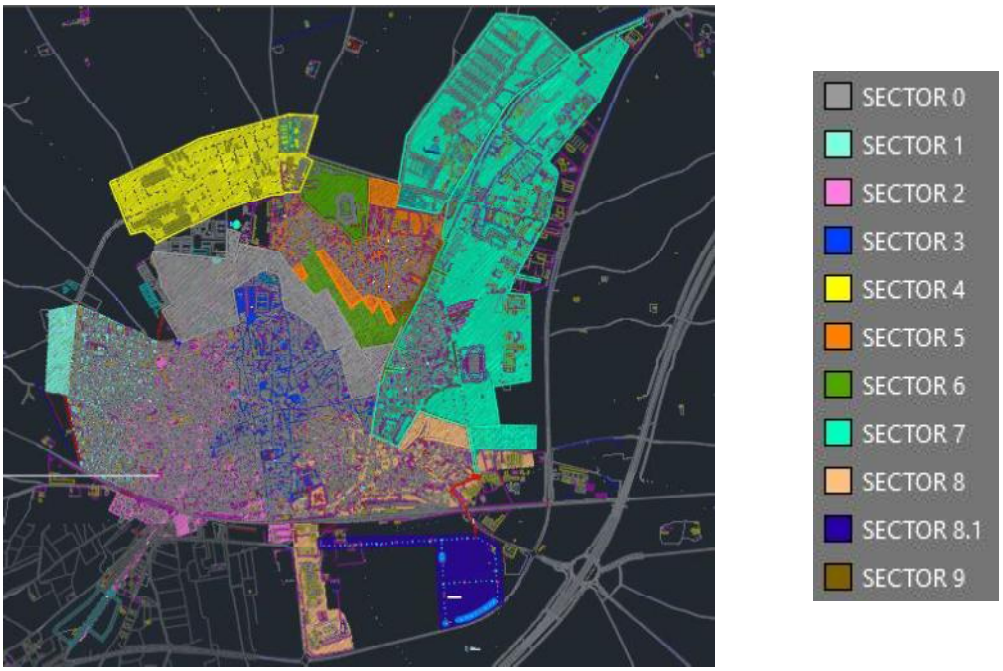



*Ilustración 6. División por sectores de la ciudad*

*Ilustración 7. Detalle división por sectores de la ciudad*

## 2.2. PUNTOS DE CAPTACIÓN

### 2.2.1. Pozo de La Capitana

Es el pozo más importante de los tres que permiten la captación de agua en el municipio de Villarrobledo. Se encuentra al norte de la población a unos 5 km y lleva el agua hasta el Depósito Calle Dalí a través de una tubería de 315 mm de diámetro. Destacar que el nivel dinámico de este pozo está a 33,2 m de profundidad.

### 2.2.2. Pozo de La Estación

Es el otro pozo principal de la población, el cual permite inyectar el resto de agua que demanda Villarrobledo y que no procede del Pozo de La Capitana. Se encuentra ubicado al sureste de la población y lleva el agua hasta el Depósito Plaza de Picasso a través de una tubería de 250 mm de diámetro. Además, apuntar que el nivel dinámico del pozo está a 45,5 m de profundidad.

### 2.2.3. Pozo de Paporro

Este pozo solo se usa en caso de emergencia, cuando no es posible el abastecimiento de toda la demanda mediante los pozos de La Capitana y de La Estación. Esto es debido a la alta presencia de nitratos, uno de los más frecuentes contaminantes en aguas subterráneas en áreas rurales y que debe ser controlado porque niveles excesivos pueden ser perjudiciales para la salud.

### 2.2.4. Tubería Manchega

El Trasvase de la Llanura Manchega o Tubería de la Llanura Manchega es un trasvase que nace en el municipio conquense de Carrascosa del Campo y que concluye en la localidad de Malagón, en el Embalse de Gasset (Ciudad Real). Este trasvase tiene como fin el consumo humano de agua procedente de la Cabecera del Tajo para más de 30 municipios de las provincias de Cuenca, Albacete, Ciudad Real y Toledo.

Esta infraestructura podrá abastecer de agua del acueducto Tajo-Segura a Villarrobledo, en lugar de abastecerse de los diversos pozos comentados previamente. En la actualidad esta tubería llega al Depósito Calle Dalí, pero aún no está en funcionamiento, esperando que en los próximos años pueda ponerse en uso y beneficiar a la población de un agua de mejor calidad.

## 2.3. PUNTOS DE ALMACENAMIENTO

### 2.3.1. Depósito Calle Dalí

Este depósito es el que más volumen acumula de los dos existentes, 5000 $m^3$, y se compone de dos depósitos cilíndricos de 2500 $m^3$ uno al lado de otro. Se encuentra a 735 metros sobre el nivel del mar y está ubicado al noroeste de la ciudad en un recinto al aire libre. En este mismo recinto se encuentran las casetas de los dos grupos de presión que ahora están en funcionamiento. Además, en el Depósito Calle Dalí existe una tubería que conecta con la red general de unos 400 mm de diámetro.

*Ilustración 8. Vista exterior depósitos Calle Dalí*

### 2.3.2. Depósito Plaza de Picasso

Este depósito es rectangular y tiene una capacidad de 3700 $m^3$. Se encuentra a 738 metros sobre el nivel del mar y está ubicado muy cerca del otro, a unos 200 m. El Depósito Plaza de Picasso tiene una salida directa que abastece a la red general de la población, pasando antes por el grupo de presión que se encuentra en el recinto del Depósito Calle Dalí y que permite suministrar a la presión requerida.

## 2.4. TUBERÍAS

El trazado de tuberías que componen la red de distribución de aguas de Villarrobledo está formado por distintos materiales y diámetros. Existen materiales más antiguos como el fibrocemento (FC), que conforman la mayoría del trazado, y materiales más actuales como el polietileno de baja densidad (PEBD) y de alta densidad (PEHD) o el policloruro de vinilo (PVC) y el policloruro de vinilo orientado (PVC-O). En las siguientes tablas se encuentra la clasificación de los diferentes materiales y diámetros de las tuberías que conforman la red del municipio.

| MATERIAL | DIÁMETRO |
|---|---|
| PEBD | 63 |
| | 75 |
| | 90 |

*Tabla 1. Diámetros polietileno de baja densidad*

| MATERIAL | DIÁMETRO |
|---|---|
| PEHD | 75 |
| | 90 |
| | 110 |
| | 140 |
| | 160 |
| | 200 |

*Tabla 2. Diámetros polietileno de alta densidad*

| MATERIAL | DIÁMETRO |
|---|---|
| FC | 50 |
| | 60 |
| | 80 |
| | 100 |
| | 125 |
| | 150 |
| | 200 |
| | 250 |
| | 300 |
| | 400 |
| | 450 |

*Tabla 3.Diámetros fibrocemento*

| MATERIAL | DIÁMETRO |
|---|---|
| PVC | 90 |
| | 110 |
| | 140 |
| | 200 |
| | 250 |
| PVC-O | 110 |
| | 160 |
| | 200 |
| | 250 |
| | 315 |

*Tabla 4. Diámetros PVC y PVC orientado*

Las tuberías de mayor diámetro por lo general corresponden a tuberías que recorren largos trayectos de la población (amarillas y rojas), mientras que las de diámetros menores (azules y verdes) son aquellas que suelen recorrer únicamente pocas calles o pequeños tramos.

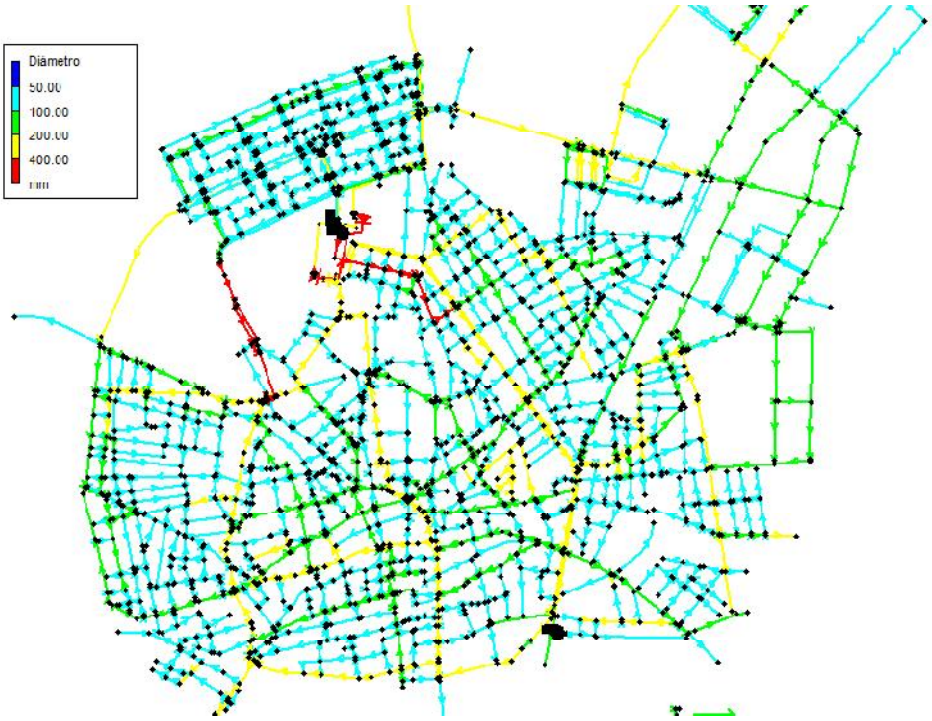



*Ilustración 9. Diámetros de las tuberías de la población*

Asimismo, es posible calcular los kilómetros de tuberías totales que existen en la población, lo que corresponde a 129,45 km.

## 2.5. BOMBAS

Actualmente el municipio cuenta con dos grupos de presión que se encargan de proporcionar la presión necesaria en función de la zona de la ciudad a la que vaya dirigida el suministro. Por otro lado, existe un grupo de presión y un rebombeo que ahora están fuera de servicio, ya que el modo de circulación del agua entre depósitos ha cambiado no hace demasiados años, siendo antes necesario el rebombeo para que el agua fuese del depósito de menor al de mayor cota y de allí impulsar el agua a la red general con el grupo de presión de cuatro bombas que ahora está inutilizado. Igualmente, en cada pozo existe una bomba de impulsión.

En las siguientes gráficas se muestran las curvas de las bombas seleccionadas de catálogo: la curva característica en azul con su punto de funcionamiento en rojo y la curva de rendimiento en granate. Asimismo, en las bombas de velocidad variable (BVV) se muestra en verde cómo iría variando la curva motriz dependiendo de la velocidad de giro (α), correspondiendo la curva azul a una velocidad α=1.

### 2.5.1. Bomba Pozo de la Capitana

La bomba del pozo principal de la población presenta las siguientes particularidades:

- Bomba CAPRARI modelo E14S50-10/3C
- Potencia: 135 kW
- Caudal: 300 $m^3/h$
- Altura: 120 m.c.a.

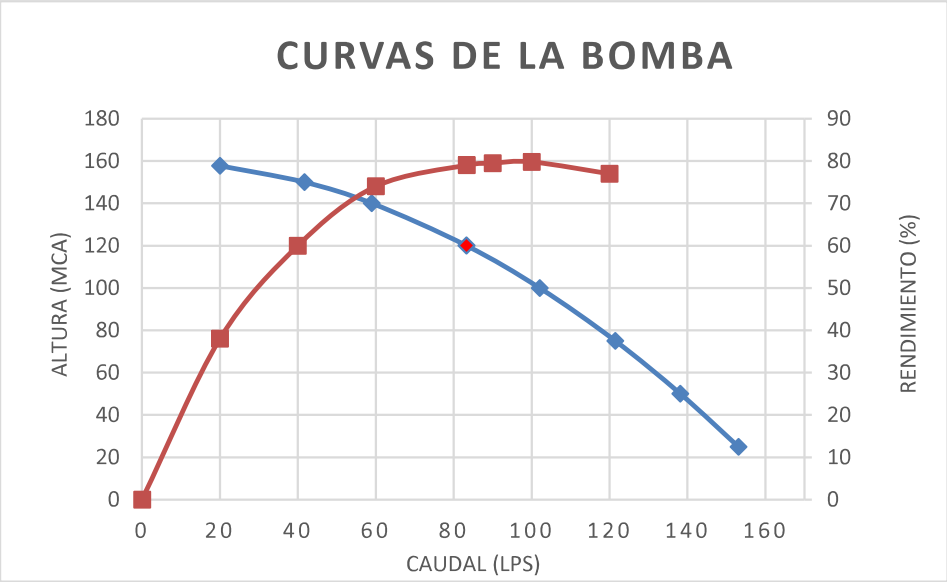



*Ilustración 10. Curva característica y de rendimiento de una BVF (Capitana)*

### 2.5.2. Bomba Pozo de la Estación

La bomba del segundo pozo que abastece al municipio se caracteriza por:

- Bomba CAPRARI modelo XN1H5G
- Potencia: 92 kW
- Caudal: 240 $m^3/h$
- Altura: 100 m.c.a.

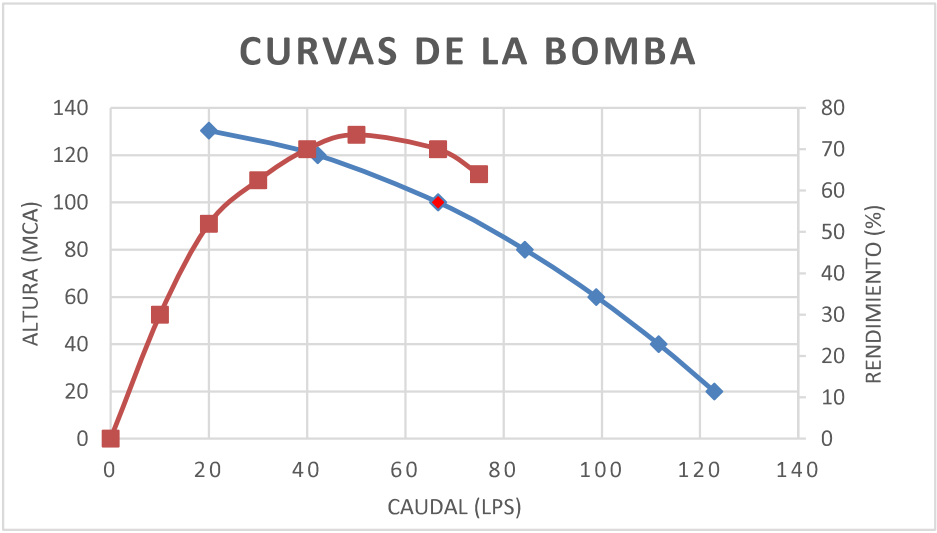



*Ilustración 11. Curva característica y de rendimiento de un BVF (Estación)*

### 2.5.3. Grupo presión general

El grupo de presión general[1], que proporciona altura a toda la localidad, está formado por 5 bombas, situadas a la salida del Depósito Calle Dalí. Con relación a estas bombas no ha sido posible obtener demasiada información, salvo que mantienen una presión constante a la entrada de la red general de 1,3 bar con un consumo de 35 kW.

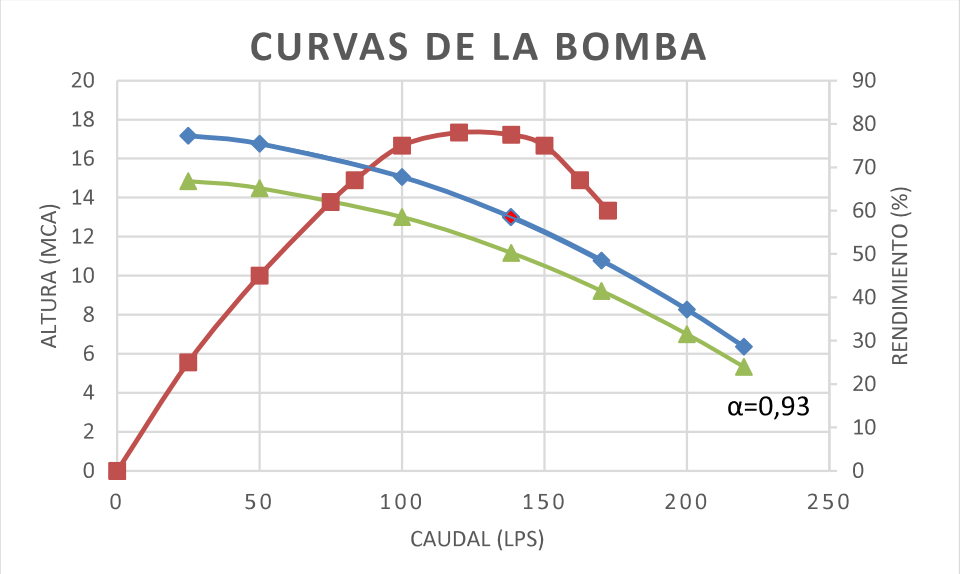



*Ilustración 12. Curva característica y de rendimiento de una BVV (Grupo presión general)*

### 2.5.4. Grupo presión UMOVI

El grupo de presión UMOVI[2] se incorporó para aumentar la presión de la zona más alta y de más reciente construcción de Villarrobledo, la Urbanización Molino de Viento. Se compone de tres bombas que, como en el caso anterior, solamente se sabe que aumentan la presión a la entrada de la urbanización de 1,3 a 3 bar, con un consumo de potencia de 15 kW.

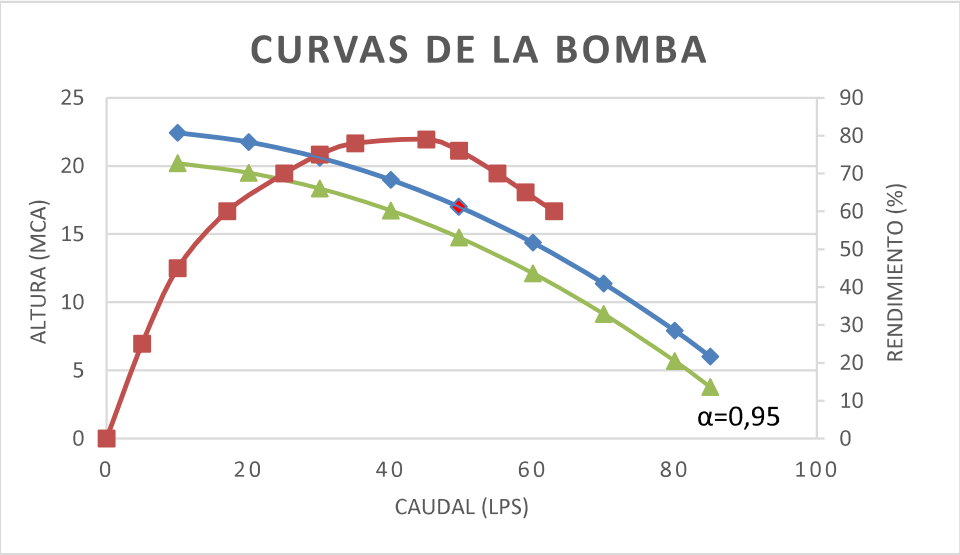



*Ilustración 13. Curva característica y de rendimiento de una BVV (Grupo presión UMOVI)*

[1] Se hará referencia al grupo de presión de 5 bombas como “grupo de presión general”.
[2] Se hará referencia al grupo de presión de 3 bombas como “grupo de presión UMOVI”.

## 2.6. ELEMENTOS DE REGULACIÓN

### 2.6.1. Válvulas de compuerta

Las válvulas de compuerta son elementos destinados a cerrar el paso del agua mediante un obturador deslizante que está alojado dentro de un cuerpo o carcasa y cuyo desplazamiento vertical se lleva a cabo mediante el giro de un eje sobre el cual se aplica el dispositivo de accionamiento.

Su función primordial es la de cierre y apertura, es decir, permitir o impedir, a voluntad, el paso del fluido en la conducción. Por ello, su posición básica de funcionamiento será abierta o cerrada, adquiriendo un carácter de provisionalidad las posiciones intermedias.

La mayor parte de válvulas existentes en la red de distribución de la localidad son de compuerta, incluyendo las que sirven para aislar por sectores.

Algunos aspectos a tener en cuenta sobre las válvulas de compuerta son:

- Alta capacidad
- Cierre hermético
- Poca resistencia a la circulación
- Produce cavitación con baja caída de presión
- La posición para estrangulación producirá erosión del asiento y del disco

## 2.7. ELEMENTOS DE MEDICIÓN

La red de abastecimiento de agua potable de Villarrobledo cuenta con contadores a la salida de la impulsión de todos los pozos, así como a la salida de los depósitos hacia la red general.

Además, existen contadores en cada uno de los 10 sectores en los que se divide la población, lo que permite conocer el caudal y volumen suministrado en cada sector.

## 2.8. AUTOMATISMOS Y CONTROLES

El Servicio de Abastecimiento de Agua de Villarrobledo cuenta con 5 estaciones remotas para el control y automatización de las infraestructuras del servicio, con las cuales se consigue automatizar completamente las instalaciones, procesar alarmas, disponer de registro e históricos de toda la información generada en las instalaciones.

Toda la información generada se centraliza en un puesto central (SCADA[3]), el cual permite la administración y almacenamiento de todos los datos generados en las distintas instalaciones que componen el servicio. La comunicación entre todos los componentes del sistema de telecontrol se realiza mediante radio, tecnología que permite tener los datos en tiempo real.

[3] SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos): software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real y controla el proceso automáticamente.

# CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO

## 3.1. DATOS INICIALES

La empresa de gestión de aguas, Gestagua, junto con el Excmo. Ayuntamiento de Villarrobledo han sido los que han facilitado la información necesaria sobre la red de abastecimiento que permita la reproducción de un modelo lo más próximo a la realidad de la situación actual de la red.

El Ayuntamiento ha proporcionado el plano con el trazado de las tuberías en AutoCAD cuyas capas muestran los diferentes diámetros y materiales con los que se han construido las tuberías, además de los distintos elementos que conforman la red como válvulas, grupos de presión o contadores.

*Ilustración 14. Vista del trazado de las tuberías en AutoCAD*

Por otro lado, Gestagua ha aportado los datos de producción de agua del servicio de abastecimiento, el desglose de facturación a los abonados, volúmenes medidos por los contadores, precio medio del kWh, el volumen de los depósitos y datos de las bombas de los pozos entre otros. Todos los valores anteriores corresponden al año 2016, por lo que el estudio del presente modelo se hará para dicho periodo anual.

## 3.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EN EPANET

Para pasar de una obra de infraestructura hidráulica a un modelo que permita la simulación para un análisis detallado y una posterior optimización se ha utilizado el más famoso software en el campo de la hidráulica del flujo a presión: EPANET.

### 3.2.1. Conversión del fichero de AutoCAD a EPANET

En primer lugar, se ha procedido a convertir el archivo .dxf de AutoCAD en un archivo .inp interpretable por EPANET. Para ello, ha sido necesario un software gratuito intermedio, EpaCAD, que permite esta conversión de forma sencilla siendo capaz de reconocer de forma automática las principales propiedades de los elementos y facilitando así en gran medida el trabajo necesario para generar una red.

EpaCAD es un software desarrollado por el ITA (Instituto Tecnológico del Agua), que es un grupo de investigación de la Universidad Politécnica de Valencia, el cual centra sus actividades de I+D+i en temas relacionados con la ingeniería y la gestión del agua urbana.

Para llevar a cabo la transformación, una vez dentro del programa EpaCAD, se ha abierto el archivo .dxf del trazado de la población, se han seleccionado las capas que se desean mantener y directamente se ha obtenido el archivo en formato .inp, que ya puede ser trabajado en EPANET, donde ha sido preciso corregir algunos errores que se producen en la exportación.

Para facilitar la visualización de la red de la localidad se ha incluido el mapa de fondo en EPANET a partir del plano de AutoCAD.

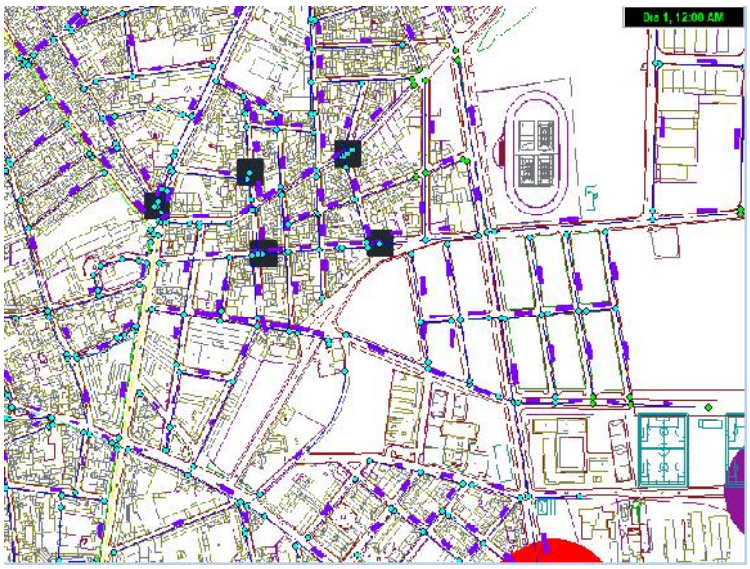



*Ilustración 15. Plano en EPANET con fondo*

### 3.2.2. Corrección de tuberías

El principal error que se ha presentado tras la transformación a un archivo compatible en EPANET ha sido que los diámetros de las tuberías no se han mantenido, presentando todas ellas el que es asignado por defecto en EPANET, por lo que es necesario ir modificando cada uno de estos valores para que la red quede correctamente dimensionada. Esta labor ha requerido ir introduciendo valores tubería por tubería debido a la disposición compleja de éstas, que no han permitido la selección por grupo para agilizar el proceso.

Otro error relacionado con las tuberías es que muchas de ellas parecían conectadas cuando en realidad no, y ha sido posible darse cuenta mirando el nudo de inicio y fin de cada tubería. Esto ha hecho que haya que eliminar bastantes tuberías que tenían el mismo nudo de inicio y final.

Posteriormente, se conectan provisionalmente los depósitos y los pozos a la red para que al simular sea posible detectar aquellas tuberías que no están conectadas a algún punto de la red y, por tanto, no reciben suministro de agua, siendo este otro error de la importación que hay que corregir.

### 3.2.3. Asignación de cotas

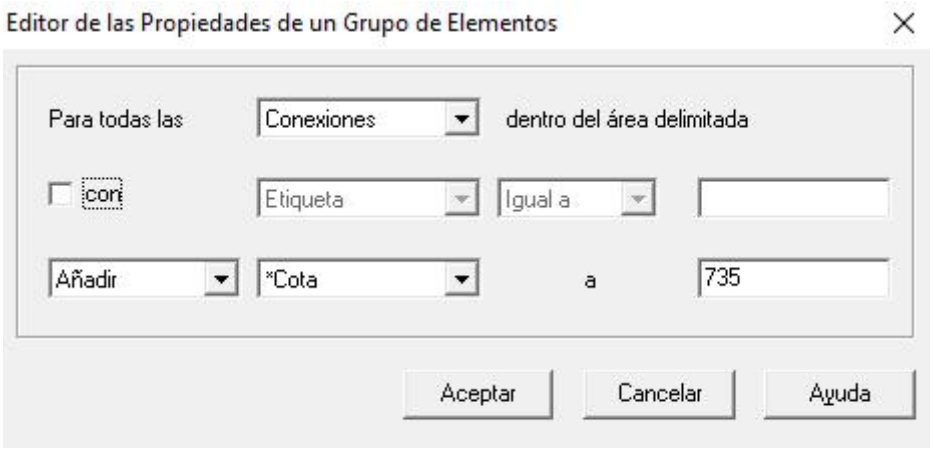



*Ilustración 16. Ventana del editor por grupo*

Para la asignación de cotas ha sido necesario el programa Google Earth Pro, que permite recorrer las calles de la población y mostrar la elevación del terreno. Con la opción de 'Seleccionar región' y 'Editar Grupo' en EPANET se han ido introduciendo los valores de las cotas de una forma más rápida, tanto en nudos, como en pozos y depósitos.

Villarrobledo presenta unos valores de cotas que oscilan entre los 700 y 739 metros sobre el nivel del mar.

### 3.2.4. Incorporación de los puntos de captación

Los pozos de captación de La Capitana y de La Estación se han incorporado como embalses en EPANET, que se entienden como elementos con capacidad ilimitada para suministrar. Para ello, solo ha hecho falta conocer la cota sobre el nivel del mar en estos puntos y la profundidad de la lámina de agua. El procedimiento ha consistido en restar los metros de profundidad de la

lámina de agua a la altura del terreno, y así se ha obtenido el valor necesario para introducir en la casilla de 'Altura Total'.

- El nivel dinámico del pozo de La Estación está a 45,5 metros de profundidad y la cota es de 718 m.
  Altura Total: 672,5 m
- El nivel dinámico del pozo de La Capitana está a 33,2 metros de profundidad y la cota es de 695 m.
  Altura Total: 661,8 m

Una vez incorporados los pozos en el sistema, se introducen las respectivas bombas que permiten suministrar la altura necesaria para la captación de agua, asignándole a cada una de ellas una curva característica con su punto de funcionamiento, ya mostrado anteriormente.

### 3.2.5. Incorporación de los puntos de alimentación

Es necesario conocer todas las características de un depósito para poder trabajar con él en EPANET, en concreto se atienden a los siguientes parámetros:

- Cota: valor del nivel de fondo o solera del depósito.
- Nivel inicial: nivel piezométrico dentro del tanque con el cual se desea comenzar la simulación del modelo. Se debe tener en cuenta que el valor del nivel inicial toma como cero el fondo o solera del depósito. Además, el nivel inicial debe ser un valor comprendido entre el nivel máximo y mínimo.
- Nivel mínimo: nivel mínimo con el cual va a operar el depósito. Cuando el depósito debido a su operación llega a este nivel, detiene el suministro de agua hacia la red. Por lo tanto, se visualizan presiones negativas en las conexiones o nudos, lo cual indica la ausencia de agua dentro de las tuberías.
  Se debe tener en cuenta que el valor del nivel mínimo toma como cero el fondo del tanque, y que la altura de éste con respecto al nivel del mar no interfiere.
- Nivel máximo: establece el nivel máximo que puede alcanzar el agua dentro del tanque. El valor del nivel máximo toma como cero el fondo del tanque, por lo tanto, no importa la altura con respecto al nivel del mar que éste posea.
  El nivel máximo debe ser la máxima capacidad del agua dentro del tanque, mientras que el nivel mínimo debe estar por debajo del máximo como del inicial y, así mismo, el inicial no debe sobrepasar el máximo.
- Diámetro: EPANET modela de manera predeterminada depósitos de forma cilíndrica. Si el depósito que se necesita es de sección cuadrada o rectangular, se debe buscar el diámetro equivalente del área que ocupa dicha sección.

En el caso de Villarrobledo, Gestagua solo ha facilitado el volumen de almacenamiento de los depósitos, por lo que éstos se han dimensionado estableciendo un diámetro y una altura que proporcionase dicho volumen. Aunque también es cierto que visualmente se podía tener una idea aproximada de la altura de los depósitos, lo cual ha sido útil a la hora de dimensionarlos.

Depósito 5

| Propiedad | Valor |
|---|---|
| *ID Depósito | 5 |
| Coordenada-X | 533975.53 |
| Coordenada-Y | 4347431.68 |
| Descripción | |
| Etiqueta | |
| *Cota | 735 |
| *Nivel Inicial | 0.51 |
| *Nivel Mínimo | 0.5 |
| *Nivel Máximo | 5 |
| *Diámetro | 37.61 |
| Volumen Mínimo | 0 |
| Curva de Volumen | |
| Modelo de Mezcla | Mezcla |

*Ilustración 17. Dimensiones depósito Calle Dalí*

Seguidamente al dimensionado de los depósitos se incorporan las bombas de los dos grupos de presión: el grupo de presión general y el grupo de presión UMOVI. Como ya se ha comentado, de estas bombas no se tenían todas las características, por lo que para introducir un punto de funcionamiento en la curva característica se ha tenido que ir probando con distintos caudales para la altura dada.

### 3.2.6. Introducción de controles simples en los grupos de presión

Una vez se han introducido los grupos de presión en la red, es preciso incorporar los variadores de frecuencia en las bombas. Se establece como velocidad nominal de la bomba las 8 horas, pues es la hora con mayor demanda según la curva de modulación ($\alpha = 1$). La altura que tienen que dar las bombas a esa hora con una velocidad relativa de 1 es la siguiente:

- Grupo presión general: 13 m.c.a.
- Grupo presión UMOVI: 17 m.c.a.

Una vez se han conseguido esas alturas modificando el caudal del punto de funcionamiento de la bomba, se buscan las velocidades relativas para que a cada hora también se obtengan 13 y 17 metros respectivamente. Para la incorporación de esto se ha hecho uso de los controles simples, como los que se muestran a continuación.

```
LINK 188 0.9623 AT TIME 0
LINK 188 0.9535 AT TIME 1
LINK 188 0.9505 AT TIME 2
LINK 188 0.9505 AT TIME 3
LINK 188 0.9535 AT TIME 4
LINK 188 0.975 AT TIME 5
LINK 188 0.9755 AT TIME 6
LINK 188 1.0025 AT TIME 7
LINK 188 1 AT TIME 8
LINK 188 1.002 AT TIME 9
```

*Ilustración 18. Controles simples en los grupos de presión*

| Hora | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| α | 0,962 | 0,953 | 0,950 | 0,950 | 0,953 | 0,975 | 0,975 | 1,002 | 1 | 1,002 | 1,001 | 0,993 |
| **Hora** | **12** | **13** | **14** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** | **21** | **22** | **23** |
| α | 0,995 | 1,004 | 0,999 | 0,991 | 0,990 | 0,991 | 1,003 | 1,003 | 1,011 | 1,014 | 0,995 | 0,978 |

*Tabla 5. Velocidades relativas para el grupo de presión general*

| Hora | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| α | 0,942 | 0,931 | 0,927 | 0,927 | 0,931 | 0,962 | 0,962 | 1,002 | 1 | 1,002 | 0,999 | 0,988 |
| **Hora** | **12** | **13** | **14** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** | **21** | **22** | **23** |
| α | 0,992 | 1,006 | 0,998 | 0,986 | 0,984 | 0,985 | 1,004 | 1,005 | 1,018 | 1,022 | 0,992 | 0,966 |

*Tabla 6. Velocidades relativas para el grupo de presión UMOVI*

### 3.2.7. Inconvenientes durante la construcción del modelo

En este apartado se comentan los diferentes problemas que han ido surgiendo a lo largo de la construcción del modelo de la red de abastecimiento de agua del municipio de Villarrobledo.

#### 3.2.7.1. Conexión entre depósitos

Es muy importante realizar bien la conexión entre depósitos y grupos de presión para un correcto funcionamiento del suministro de agua a la población.

A la hora de interpretar la información de la que se disponía surgieron dudas para relacionar el plano de AutoCAD que fue proporcionado por el arquitecto del Ayuntamiento y los datos que aportaba Gestagua.

Uno de los problemas fue detectar si únicamente existía una conexión entre depósitos o existían dos, ya que había una tubería cuyo extremo no dejaba claro si conectaba o no con otra.

*Ilustración 19. Conexión entre depósitos*

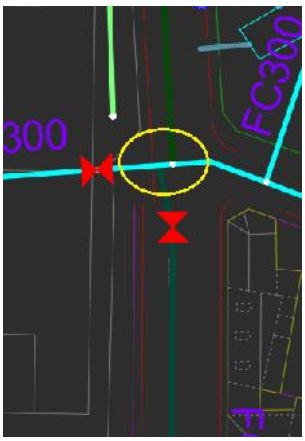



*Ilustración 20. Vista ampliada de la conexión entre depósitos*

Tras preguntar a la empresa de aguas se confirmó que únicamente existía una tubería de conexión entre depósitos (tubería de fibrocemento azul de 300 mm de diámetro), y que en la zona señalada con un círculo amarillo donde convergen dos tuberías verdes oscuras solamente la verde que va hacia arriba tiene conexión con la azul hacia la red, la otra verde que sale para abajo no está conectada a la azul de 300 mm sino que esta procede del grupo de presión general.

#### 3.2.7.2. Conexión de los grupos de presión

Haciendo referencia a la conexión de los grupos de presión se presenta la duda acerca de la posición de éstos. Se sabe que existen dos: el grupo de presión general y el grupo de presión UMOVI.

Mirando en AutoCAD se observa que el plano no está actualizado, pues aparece el grupo de presión que se utilizaba antes, situado en el Depósito Plaza de Picasso y el que es utilizado actualmente no aparece.

Además, en el esquema de la *Ilustración 5* solo aparece el rebombeo y el grupo de 4 bombas que se utilizaban antes y el actual grupo de presión general de 5 bombas, pero el grupo de presión para la Urbanización Molino de Viento no aparece, por lo que antes de saber de la existencia de este último se encontraban presiones negativas en esta urbanización.

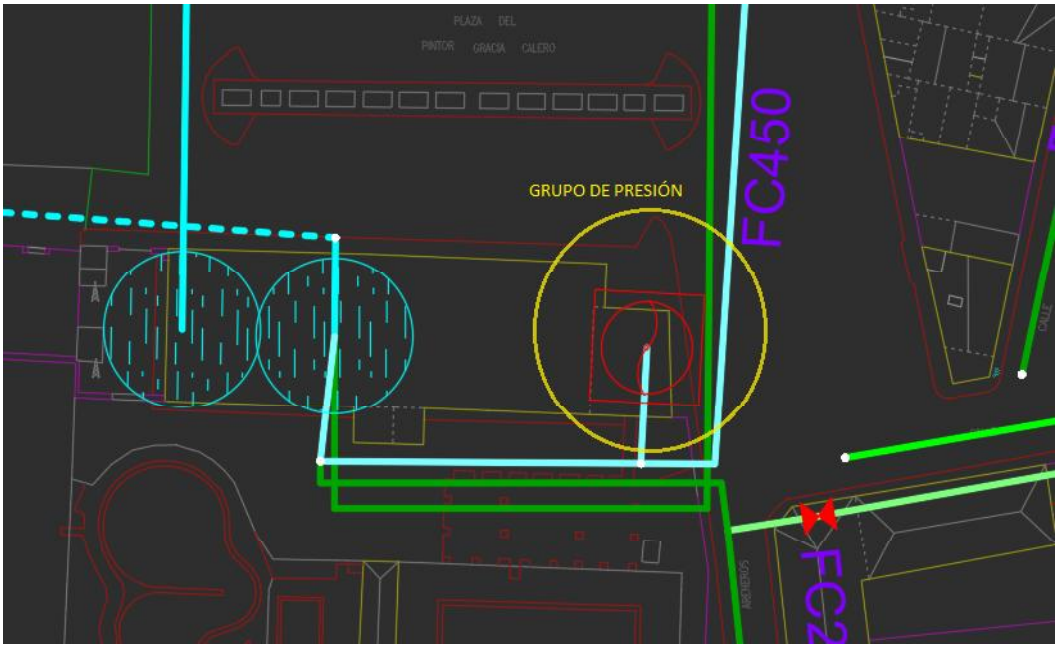



*Ilustración 21. Grupo de presión antiguo situado en Depósito Plaza Picasso*

### 3.2.7.3. Presiones negativas o muy bajas

Como se comentaba anteriormente, inicialmente al desconocer la existencia del grupo de presión UMOVI aparecían numerosos puntos con presiones negativas o menores a 10 m, los cuales no garantizaban la presión mínima, que fueron solucionadas con la introducción de su respectivo grupo de presión.

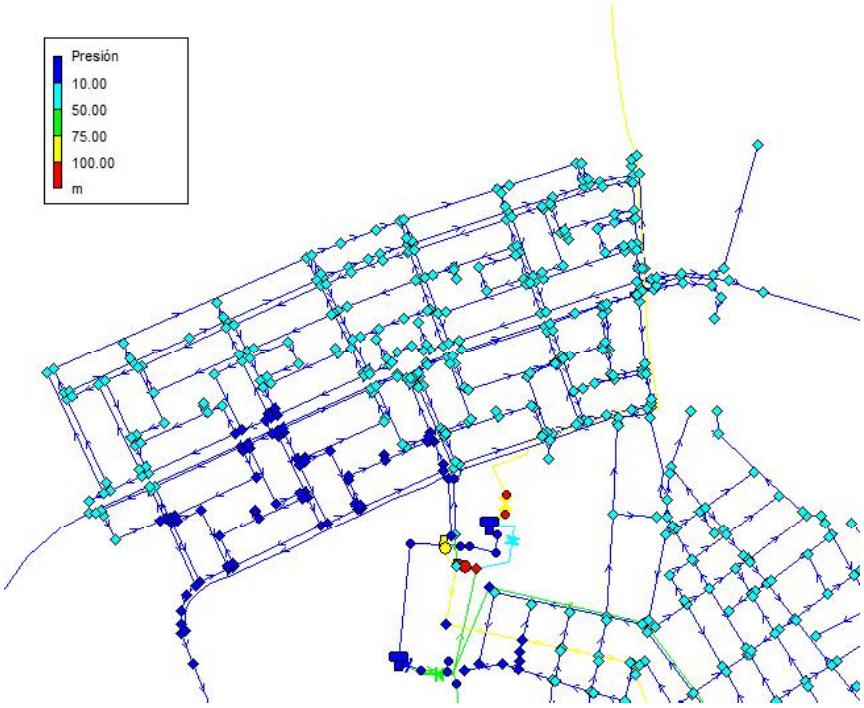



*Ilustración 22. Mapa de presiones sin el grupo de presión UMOVI*

Por otro lado, cuando se consigue acabar con las bajas presiones de esta zona, siguen existiendo presiones negativas no muy relevantes en nudos cercanos al depósito Plaza de Picasso. Esto se ha solucionado poniendo la demanda base igual a 0 en unos cuantos nudos, pues son puntos muy cercanos al depósito, en los cuales es muy probable que no haya demanda. En la imagen siguiente se pueden ver cuáles han sido los nudos cuya demanda se ha cambiado a 0, siendo la forma de éstos circular en lugar de un rombo.

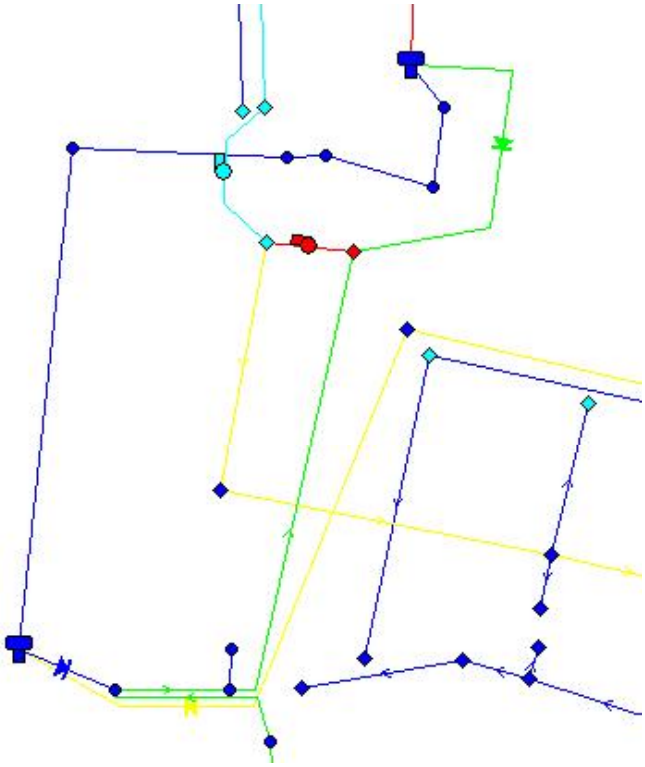


*Ilustración 23. Nudos con demanda base igual a 0*

## 3.3. CARGA HIDRÁULICA DEL MODELO

### 3.3.1. Demanda base

En primer lugar, para introducir la demanda base es necesario saber si los consumos municipales están registrados. En el caso de Villarrobledo sí que están registrados, por lo que deben contemplarse en la demanda base, repartiéndose estos consumos por igual en cada nudo que conforma la red de abastecimiento.

Además, se cuenta con el desglose de facturación a los abonados proporcionado por Gestagua, que está dividido en uso doméstico y uso industrial.

| | Trimestre 1 | Trimestre 2 | Trimestre 3 | Trimestre 4 | Total Anual |
|---|---|---|---|---|---|
| **Uso doméstico ($m^3$)** | 205.057 | 224.759 | 244.351 | 222.839 | 897.006 |
| **Uso industrial ($m^3$)** | 50.371 | 55.008 | 60.391 | 63.024 | 228.794 |
| **Consumos municipales ($m^3$)** | 53.908 | 63.750 | 142.840 | 84.086 | 344.584 |

*Tabla 7. Consumos por trimestres en la población para el año 2016*

Para poder incorporar lo anterior ha sido necesario localizar en el mapa de la red de distribución aquellos nudos que forman parte de la zona industrial de la población. Con esto, es posible repartir por partes iguales el consumo doméstico entre el número de nudos domésticos y el consumo industrial entre el número de nudos de zona industrial.

El hecho de que se haya realizado un reparto igualitario de la demanda en la zona doméstica y en la zona industrial es debido a las características de los datos disponibles. Con esto no se dispone de un modelo exacto, pero es una buena aproximación para realizar la simulación y comprobar si hay fallos en la red.

Otras formas de repartir la demanda podrían ser por longitud de tubería o, si se tuvieran consumos detallados por calles, aumentar la demanda en núcleos donde los consumos fueran más elevados.

En EPANET, con la opción de *Proyecto/Resumen* es posible conocer el número de nudos que forman el sistema de abastecimiento, resultando un total de 2091 incluyendo los nudos de unión a los que se les ha asignado demanda base igual a 0, por lo que se contemplará un total de 2075 nudos sin contar éstos últimos. Por otro lado, existen 1864 nudos en zona doméstica y 211 en zona industrial. De este modo se obtienen los siguientes valores de demanda base:

$$Consumos\ municipales = 0{,}005\ LPS$$

$$Consumo\ industrial\ por\ nudo = 0{,}034\ \ LPS$$

$$Consumo\ doméstico\ por\ nudo = 0{,}015\ \ LPS$$

$$Demanda\ base\ industrial = 0{,}039\ \ LPS$$

$$Demanda\ base\ doméstica = 0{,}021\ \ LPS$$

### 3.3.2. Curva de modulación

La curva de modulación está constituida por una serie de factores que permiten analizar el comportamiento de los nudos de la red a cada hora durante un día. Este factor indica si se multiplica o no la demanda en un nudo en función de lo que se consuma a cada hora.

Destacar que no se disponía de datos de caudales por hora que permitiesen sacar la curva de modulación de la población, por lo que se ha cogido como modelo una ciudad de características similares a Villarrobledo.

Se disponía del caudal inyectado cada cuarto de hora de la población elegida, con lo que es posible sacar una media en LPS del caudal inyectado para cada hora del día. Con el cociente entre esos valores y el caudal total demandado en LPS se ha obtenido un coeficiente de modulación. Posteriormente, se ha sacado el valor promedio de los coeficientes y dividiendo esos coeficientes entre el valor promedio se ha logrado una curva de modulación con media de 1. Al considerar el caudal inyectado para modular la demanda, se obtiene una curva distorsionada, ya que el caudal demandado no es igual al inyectado, pues las fugas tienen un comportamiento inverso al comportamiento de la demanda. Con una demanda de agua mayor, al aumentar el caudal circulante y disminuir la presión de la red, las fugas disminuirán. Dicho de otro modo, los rendimientos dependen del consumo de agua en la ciudad. A mayor consumo, mayor rendimiento y menos fugas.

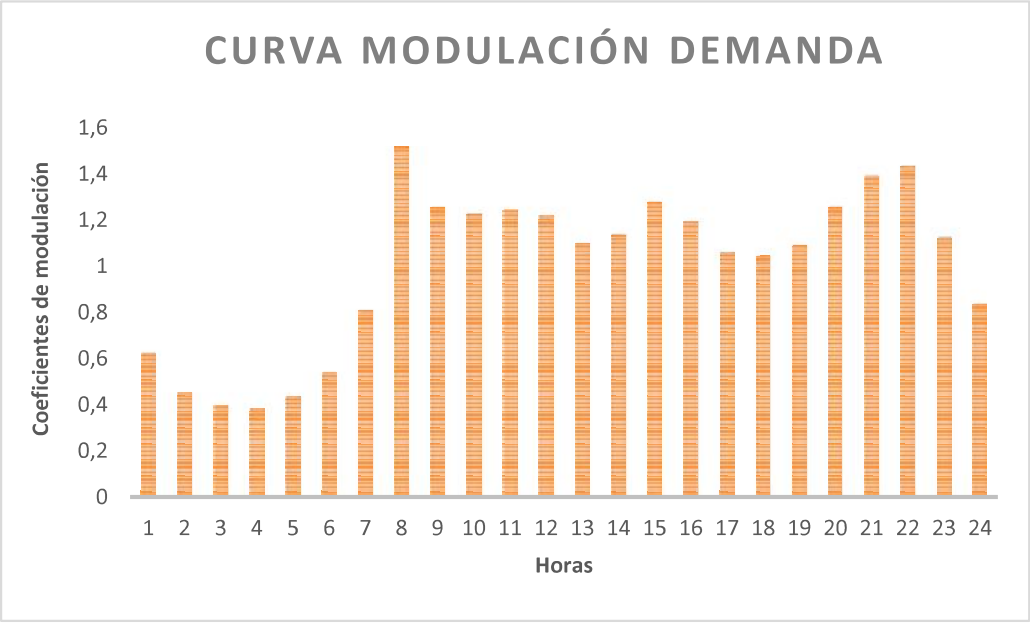



*Ilustración 24. Curva modulación demanda para una población tipo*

Es oportuno indicar que se ha utilizado la misma curva de modulación para todo el periodo de estudio (año 2016), pues Villarrobledo es una población que no cambia el número de habitantes significativamente en verano y en invierno, siendo así la demanda similar durante todo el año.

### 3.3.3. Introducción de las fugas en el modelo

Para introducir las fugas en la red se ha empleado ITAFugas, que es un software libre de uso particular. Este software surge como una necesidad de disponer de una herramienta que permita introducir las fugas en los modelos de EPANET de forma relativamente rápida y, por supuesto, dependientes de la presión. Para ello se requiere el cálculo del coeficiente emisor de los nudos del modelo, lo que implica un proceso de cálculo iterativo, dado que el caudal fugado depende de la presión, y la presión disponible en los nudos depende del caudal que circule por las tuberías.

Este software está basado en la evaluación de las fugas a partir de la simulación de la red en periodo extendido. El objetivo de ITAFugas es estimar los coeficientes emisores de los nudos que modelan las fugas en una red de abastecimiento. La principal ventaja de este es que es capaz de definir un coeficiente diferente para cada nudo en función de su presión, con el objetivo de que el caudal medio a la entrada de la red coincida con el caudal medio inyectado.

Los únicos datos que se requieren son:

- Red en EPANET (fichero .inp).
- Volumen inyectado mensual.
- Volumen facturado al mes (lo lee directamente de las demandas base introducidas en el fichero de EPANET).

En primer lugar se ha calculado el rendimiento de la red que es de un 63,7%:

$$\eta = \frac{Volumen\ registrado^{4}}{Volumen\ inyectado} = \frac{1.470.384}{2.308.364} = 63{,}7\ \%$$

Del total de pérdidas de 36,3% se estima cuánto corresponde con pérdidas aparentes (caudal incontrolado consumido) y cuánto con pérdidas reales (caudal incontrolado fugado). Las pérdidas aparentes corresponden con agua que se ha consumido sin que la compañía tenga constancia de dónde se usa y las pérdidas reales corresponden a fugas en tuberías, acometidas o depósitos. Se ha supuesto que el caudal incontrolado se distribuye en 80% incontrolado fugado y 20% incontrolado consumido.

$$Total\ de\ pérdidas = 837.980\ m^3$$

$$Vol.incontrolado\ asociado\ a\ fugas\ (80\%) = 670.384\ m^3$$

$$Vol.incontrolado\ asociado\ a\ consumo\ (20\%) = 167.596\ m^3$$

El programa ITAFugas distribuye todo el caudal incontrolado consumido entre los nudos aumentando la demanda base de éstos, pues este caudal se supone que se consumirá con la misma evolución diaria que lo hace el caudal registrado (curva de modulación).

[4] El volumen registrado incluye la facturación de los abonados y los consumos municipales.

| | Demanda base inicial (LPS) | Demanda base tras ITAFugas (LPS) |
|---|---|---|
| Zona doméstica | 0,0205 | 0,0234 |
| Zona industrial | 0,0396 | 0,0453 |

*Tabla 8. Valores demanda base en LPS*

Una vez ampliadas las demandas, en el modelo hay que contemplar el caudal fugado. Para ello se calcula un coeficiente emisor K inicial para todos los nudos a partir de una presión media supuesta en la red, la cual sólo sirve para inicializar la iteración. Una vez estimado el K inicial, el siguiente proceso es distribuirlo entre los nudos de la red. La primera iteración se realiza a través de la longitud ponderada de cada nudo, es decir, asumiendo que cuanta más longitud de tubería confluye en cada nudo más posibilidad tiene de fugar.

$$Q_f = K * P^x$$

A partir de este momento se inicia el cálculo. El proceso consiste en ir modificando el K de cada nudo hasta que el caudal inyectado en el modelo coincida con el caudal medio inyectado en la red. Una vez que la solución converge, el programa devuelve un .inp de la red con las demandas aumentadas en función del caudal incontrolado consumido y un coeficiente emisor en cada nudo.

## 3.4. ANÁLISIS DEL MODELO

### 3.4.1. Comprobación volumen inyectado

Como se ha comentado, los dos depósitos que existen en la ciudad se llenan principalmente por dos pozos distintos. Para poder comprobar que el caudal que se inyecta de los pozos anualmente se aproxima a los datos que ha proporcionado Gestagua ha sido necesario realizar algunas medidas en el modelo de la red en EPANET.

En primer lugar, se han introducido controles programados en las bombas de los pozos, de tal forma que se evita que en las horas en las que no se bombea el caudal que dan las bombas sea nulo y no una parte mínima para abastecer las fugas, lo que tendría lugar en caso de no existir controles.

Los controles programados que se han introducido han sido diferentes para las horas en las que se desea el bombeo (de 0 a 8h) y más restrictivos para el resto de las horas, pues solo se debe bombear fuera del periodo establecido cuando sea estrictamente necesario.

```
RULE 1
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 0 AM
AND SYSTEM CLOCKTIME < 8 AM
AND TANK 5 LEVEL BELOW 1.5
THEN PUMP 182 STATUS IS OPEN

RULE 2
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 0 AM
AND SYSTEM CLOCKTIME < 8 AM
AND TANK 5 LEVEL ABOVE 5.7
THEN PUMP 182 STATUS IS CLOSED
```

*Ilustración 26. Controles para el bombeo de 0 a 8h*

```
RULE 3
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 8 AM
AND SYSTEM CLOCKTIME < 12 PM
AND TANK 5 LEVEL BELOW 2
THEN PUMP 182 STATUS IS OPEN

RULE 4
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 8 AM
AND SYSTEM CLOCKTIME < 12 PM
AND TANK 5 LEVEL ABOVE 3.5
THEN PUMP 182 STATUS IS CLOSED
```

*Ilustración 25. Controles para el bombeo fuera del periodo de 0 a 8h*

Además, se encontró que las bombas de los pozos en el modelo no trabajaban en el punto de funcionamiento indicado. Para solucionar este problema y que las bombas funcionen de una forma más similar a la realidad ha sido necesario introducir un coeficiente de pérdidas en la tubería a la salida de la bomba del Pozo de La Estación que va hacia el Depósito Plaza de Picasso. Por otro lado, a la entrada del Depósito Calle Dalí se ha incorporado una válvula reguladora, que también ayuda a que la bomba del pozo funcione cerca de su punto de funcionamiento, pues se requiere simular las pérdidas reales que existen entre la salida de la bomba y el depósito, y concentrarlas todas en la válvula de regulación a la entrada del depósito, que es una forma de contabilizar las pérdidas en todos los elementos, giros y quiebros que no están introducidos en el modelo.

Por último, se han puesto dos válvulas antirretorno en las salidas de los depósitos hacia la red general para conseguir que el agua solo salga de los depósitos y que éstos solo se pueden llenar desde la tubería que procede de los pozos.

Para hacer la comprobación del caudal inyectado por los pozos se hace un análisis para una semana de simulación, ya que hasta entonces no se estabiliza el ciclo de llenado en los depósitos. Con esto, se obtiene el volumen inyectado en $m^3$.

| | EPANET | Gestagua |
|---|---|---|
| **Volumen inyectado al año ($m^3$)** | 2.291.473 | 2.308.364 |

*Tabla 9. Comparación volumen inyectado*

### 3.4.2. Balance hídrico de la red

La correcta gestión técnica de una red de distribución de agua comporta conocer con exactitud el destino final de toda el agua introducida en el sistema a través de los distintos puntos de suministro. Para ello, es necesario establecer un balance hídrico que posibilite el diagnóstico de un sistema a partir del cual se pueda indicar un plan de acción.

En un sistema de distribución de agua el caudal inyectado lo es para ser consumido por los distintos abonados. Sin embargo, una cantidad, dependiente fundamentalmente del estado de conservación de la red y de sus acometidas, se pierde durante el proceso de distribución dando origen a las fugas.

Los diferentes caudales que forman parte del balance hídrico del sistema pueden representarse de la siguiente manera mediante un diagrama arbóreo:

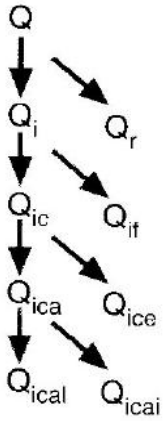



*Ilustración 27. Distribución de caudales en el balance hídrico*

- Caudal inyectado (Q): medido por contadores dispuestos en los puntos de entrada del agua en la red.
- Caudal registrado ($Q_r$): medido por los contadores del sistema.
- Caudal incontrolado ($Q_i$): caudal sin conocimiento de uso final.
- Caudal incontrolado consumido ($Q_{ic}$): consumido por los diferentes abonados o usuarios.
- Caudal incontrolado fugado ($Q_{if}$): caudal perdido por grietas o fallas.
- Caudal incontrolado, consumido y no medido por la ausencia de contadores ($Q_{ica}$).
- Caudal incontrolado, consumido y no registrado debido a un error de medida en el contador ($Q_{ice}$).
- Caudal incontrolado, consumido y no medido dada la ausencia de contadores, por acometida autorizada legal ($Q_{ical}$).
- Caudal incontrolado, consumido y no medido por la ausencia de contadores por acometida subrepticia ilegal ($Q_{icai}$).
- Caudal suministrado a los abonados ($Q_s$), que es la suma del caudal registrado y del caudal incontrolado consumido.

$$Qs = Qr + Qic = Q - Qif$$

A continuación, se va a mostrar el balance hídrico del sistema de abastecimiento de Villarrobledo (Almandoz y col., 2005).

<table>
<tr><td rowspan="3">Caudal Inyectado<br>Medido por los contadores de entrada<br>Q<br>2.308.364 m$^3$</td><td>Caudal Registrado<br>Medido por los contadores de los abonados del sistema<br>$Q_R$<br>1.470.384 m$^3$</td><td></td><td rowspan="2">Caudal Suministrado<br>$Q_S = Q_R + Q_{IC}$<br>1.637.980 m$^3$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Caudal Incontrolado<br>No se conoce con precisión su destino final<br>$Q_I$<br>837.980 m$^3$</td><td>Caudal Incontrolado Consumido<br>Pérdidas aparentes<br>$Q_{IC}$<br>167.596 m$^3$</td></tr>
<tr><td>Caudal Incontrolado Perdido<br>Pérdidas reales<br>$Q_{IF}$<br>670.384 m$^3$</td><td></td></tr>
</table>

*Tabla 10. Balance hídrico del sistema para el año 2016*

Indicar que el caudal inyectado y registrado es proporcionado por Gestagua y que a partir de la diferencia de estos se ha calculado el caudal incontrolado. Como no existen datos suficientes para calcular las pérdidas se han supuesto valores típicos que corresponden con un 20% para las aparentes y un 80% para las reales, siendo posible obtener el caudal incontrolado consumido y perdido y, por último, el caudal suministrado, suma del registrado y el incontrolado consumido.

- Pérdidas reales: fugas en tuberías, fugas en acometidas y fugas en depósitos. El mayor porcentaje de fugas se suele encontrar en las acometidas.
- Pérdidas aparentes: consumos no autorizados[5], errores de los contadores y errores en el tratamiento de datos.

Finalmente, decir que las fugas de una red, la pérdida de volumen del sistema, dependen fundamentalmente de cuatro factores: longitud y presión de la red, tiempo de servicio y número de acometidas. Por ello, algunos de los indicadores relativos más habituales para expresar el nivel de fugas de un sistema son:

- Volumen fugado por unidad de tiempo (m$^3$/h).
- Volumen fugado por unidad de longitud y de tiempo (m$^3$/km y h).
- Fugas por unidad de longitud, tiempo y presión (m$^3$/km h y mca).
- Fugas por unidad de longitud, tiempo y acometida (m$^3$/km h y acometida).

[5] Consumos no autorizados: conexiones ilegales a la red, manipulación de contadores, bypass del contador, conexiones no autorizadas a hidrantes, manipulación de los equipos de telelectura, etc.

### 3.4.3. Rendimientos hídricos porcentuales

Los rendimientos porcentuales que caracterizan la eficiencia hídrica de un abastecimiento de agua potable pueden definirse de la siguiente forma:

- Rendimiento de la red ($\eta_r$): cociente entre el caudal suministrado a los abonados y el caudal total inyectado. Cuantifica el estado físico y modo de operación de la red.

$$\eta_r = \frac{Q_s}{Q} = \frac{1.637.980}{2.308.364} = 0{,}7096$$

- Rendimiento de la gestión técnico-administrativa efectuada ($\eta_m$): relaciona el caudal registrado y el caudal suministrado.

$$\eta_m = \frac{Q_r}{Q_s} = \frac{1.470.384}{1.637.980} = 0{,}8977$$

- Rendimiento global del sistema ($\eta_g$)[6]: es la relación entre el caudal registrado y el caudal total inyectado.

$$\eta_g = \frac{Q_r}{Q} = \frac{1.470.384}{2.308.364} = 0{,}637$$

  Apuntar que el rendimiento global del sistema es el producto de los dos rendimientos precedentes:

$$\eta_g = \eta_m * \eta_r = 0{,}8977 * 0{,}7096 = 0{,}637$$

Atendiendo al rendimiento global porcentual ($\eta_g$) la gestión de Villarrobledo podría ser calificada como *REGULAR* según el criterio de la IWA (International Water Association).

| Rango | Calificación |
|---|---|
| $\eta_s > 0.9$ | Excelente |
| $0.8 < \eta_5 < 0.9$ | Muy bueno |
| $0.7 < \eta_s < 0.8$ | Bueno |
| $0.6 < \eta_5 < 0.7$ | Regular |
| $0.5 < \eta_s < 0.6$ | Malo |
| $0.5 < \eta_s$ | Inaceptable |

*Ilustración 28. Calificación de la gestión de un abastecimiento en función del $\eta_g$*

Destacar que un sistema que presenta alto porcentaje de pérdidas no es estanco y es capaz de aspirar agua contaminada que proceda de las propias fugas de la red o de otro tipo de filtraciones (alcantarillado, aljibes, etc.), siendo esto lo que se conoce como intrusiones patógenas.

[6] En algunas publicaciones el rendimiento global del sistema se indica con una s en el subíndice ($\eta_s$) y no una g ($\eta_g$).

### 3.4.4. Diagnóstico energético de la red

Una vez realizado el balance hídrico de la red conviene llevar a cabo el diagnóstico energético, que supone el cálculo de las energías y rendimientos ideales y reales de la red de distribución.

Apuntar que se ha establecido como presión mínima de servicio 15 mca, es decir que a todos los nudos de la red debe llegar esa presión como mínimo para garantizar un suministro de calidad, debido a que en Villarrobledo la mayoría de las viviendas no son de más de 2 o 3 plantas y se podría funcionar bien con una presión como esta. Teniendo en cuenta el rendimiento global, la presión mínima de suministro, la demanda en cada nudo y las cotas máximas y mínimas se ha procedido a calcular las distintas energías que constituyen un diagnóstico energético (Cabrera et al., 1999).

- $E_{uo}$ (Energía mínima requerida por los usuarios): *181.976,63 kWh/año*
- $E_{ti}$ (Energía topográfica del sistema[7]): *64.779,76 kWh/año*
- $E_{ei}$ (Exceso de energía del sistema): *0 kWh/año*
- $E_{si}$ (Energía suministrada a inyectar): *246.756,39 kWh/año*
- $E_{srp}$ (Energía suministrada por las bombas): *913.294,68 kWh/año*
- $E_{srn}$ (Energía suministrada natural[8]): *272.595,58 kWh/año*
- $E_{sr}$ (Energía total suministrada real): *1.185.890,26 kWh/año*

$$\eta_{ideal} = \frac{Euo}{Esi} = \frac{181.976,63}{246.756,39} = 0,73$$

$$\eta_{real} = \frac{Euo}{Esr} = \frac{181.976,63}{1.185.890,26} = 0,15$$

Se puede comprobar que el rendimiento ideal, que no tiene en cuenta ningún tipo de pérdidas, es muy superior al rendimiento real. Por tanto, la diferencia entre ambos rendimientos es directamente toda la energía perdida. Cuanto mayor sea esta diferencia mayor será el margen de mejora en el sistema, siendo el máximo rendimiento de la red el valor del rendimiento ideal (inalcanzable por otro lado) que supone un sistema sin ningún tipo de pérdidas.

La energía suministrada por las bombas es la más significativa, lo que es un indicativo a tener en cuenta a la hora de realizar mejoras en la red. Principalmente se debería incidir en alternativas de mejora para las estaciones de bombeo, en la impulsión de agua al sistema, pues el ahorro de energía en esta parte supondrá un ahorro económico y energético importante.

### 3.4.5. Auditoría energética de la red

La auditoría energética es de vital importancia en el proceso de mejora, siendo un aspecto clave para tener una visión íntegra del perfil de consumo de energía de una instalación. Con toda la información obtenida se determinan y cuantifican las posibilidades de mejora y su

[7] La energía topográfica del sistema es debida a la irregularidad del terreno.
[8] La energía natural es la energía potencial disponible en los embalses.

viabilidad económica, todo esto con objeto de facilitar la toma de decisiones a la hora de abordar las inversiones.

Para realizar la auditoría energética se ha empleado un software del ITA (Instituto Tecnológico del Agua) conocido como ITAEnergy, cuyo objetivo principal es permitir realizar la auditoría energética de una red de agua a presión a partir de su modelo matemático en EPANET.

El programa determina cuál es el destino de la energía que se introduce en el sistema a través de las bombas y embalses. Es decir, si esa energía es entregada a los usuarios (energía útil) y en qué forma (mínima requerida o en forma de sobrepresiones), o si se trata de energía perdida en el sistema, a través de las fugas de agua, por fricción, o por ineficiencias en los grupos de bombeo.

Para obtener los valores de la auditoría energética de la red, únicamente se requiere del modelo matemático de la red en EPANET (archivo .inp). El software de auditorías no analiza el sistema, sino que únicamente utiliza los resultados de la simulación que proporciona EPANET para realizar los cálculos energéticos, esto significa que la validez de los resultados de la auditoría está sujeta a la validez del modelo.

Una vez abierto el archivo .inp es posible seleccionar los parámetros de tiempo y la presión mínima que se ha de garantizar. Se presiona la casilla de *Calcular* y una vez realizados los cálculos se obtiene un fichero de texto con los resultados.

En este caso los parámetros seleccionados han sido una semana (7 días) para la duración de la simulación, el intervalo de cálculo de una hora y una presión de referencia de 15 m. A partir de los resultados se han sacado los valores correspondientes a un año.

- **Energía total aportada: 5.561.056,28 kWh**

  - ✓ **Energía total aportada por las bombas: 1.178.525,23 kWh**
    Energía proporcionada por la bomba 1: 439.021,70 kWh
    Energía proporcionada por la bomba 2: 506.727 kWh
    Energía proporcionada por la bomba 3: 141.499,26 kWh
    Energía proporcionada por la bomba 4: 91.276,74 kWh
  - ✓ **Energía aportada por los embalses: 4.382.536,28 kWh**
    Energía proporcionada por el embalse 1: 1.868.911,03 kWh
    Energía proporcionada por el embalse 2: 2.513.625,26 kWh

- **Energía total consumida: 5.778.146,57 kWh**

  - ✓ **Energía entregada a los usuarios: 3.468.080,06 kWh**
    Energía mínima requerida: 3.389.541,68 kWh
    Energía topográfica: 59.187,43 kWh
    Energía de exceso: 18.385,02
  - ✓ **Energía disipada por fricción: 205.310,31 kWh**

- ✓ **Energía disipada en las válvulas: 86.132,35 kWh**
- ✓ **Energía perdida a través de las fugas: 1.910.891,23 kWh**
- ✓ **Energía perdida en las bombas: 291.227,76 kWh**

  Energía perdida en la bomba 1: 93.594,56 kWh

  Energía perdida en la bomba 2: 133.646,99 kWh

  Energía perdida en la bomba 3: 36.372,87 kWh

  Energía perdida en la bomba 4: 27.613,18 kWh
- ✓ **Energía de compensación: -183.483,64 kWh**

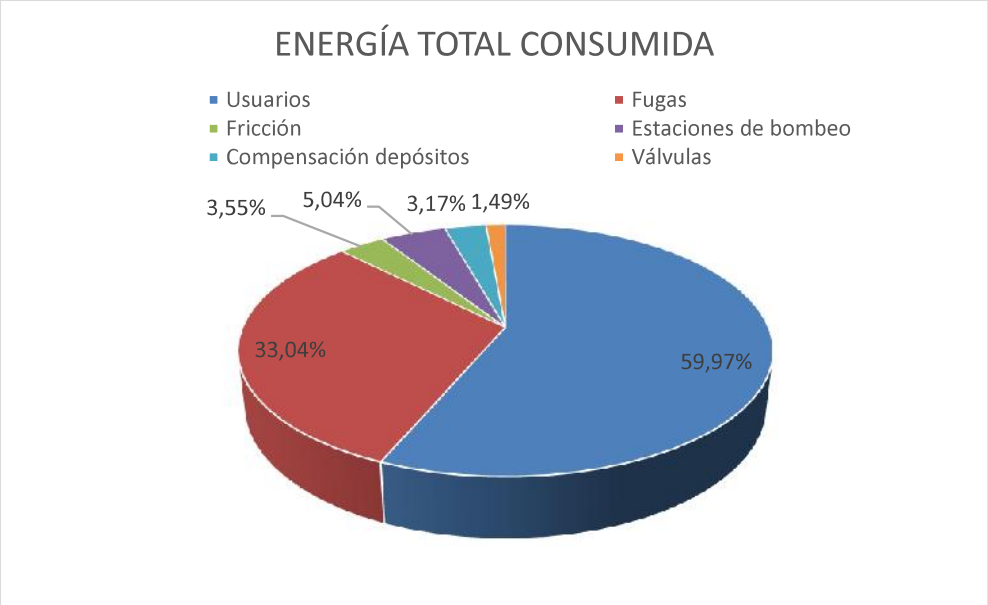



*Ilustración 29. Gráfica porcentajes de la energía total consumida*

Se procede a hacer una breve explicación sobre algunos de los términos de energía que se han calculado:

- Energía total aportada: energía total que se inyecta en el sistema, suma de la energía consumida por todas las bombas y la energía aportada de forma natural.
- Energía total consumida: se trata de todas las energías salientes de la red. Esta energía puede considerarse como energía útil cuando se entrega a los usuarios en forma de caudal y presión o perdida, siendo una pérdida toda la energía que se consume y que no se entrega a los usuarios.
- Energía disipada por fricción: energía disipada debida al rozamiento del agua con las tuberías.
- Energía disipada en las válvulas: debida a las pérdidas de carga que se da en las válvulas. Las pérdidas introducidas por medio de coeficientes de pérdidas en las tuberías se suman a las pérdidas por fricción.

Con los resultados obtenidos en la auditoría energética se puede contemplar que las mayores pérdidas en la red son debidas a fugas del sistema y a las estaciones de bombeo. Por tanto, serían dos puntos clave donde realizar estrategias de mejora.

Las estrategias encaminadas a reducir las fugas y mejorar la eficiencia de los sistemas son la renovación o rehabilitación de las tuberías, la regulación de la presión y el control activo de las fugas. Por otro lado, para la reducción de la energía perdida en estaciones de bombeo se atiende a estrategias como la reprogramación de las horas de bombeo, la selección de una nueva bomba y/o punto de funcionamiento o la selección de un nuevo esquema de funcionamiento.

### 3.4.6. Análisis económico

Haciendo referencia al coste del término de energía y potencia se utiliza la tarifa 3.1.A de Iberdrola. El periodo estudiado es el año 2016, en el que existen 115 días festivos y 251 días laborables.

| Tp (€/kW año) | | | Te (€/kWh) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **P1** | **P2** | **P3** | **P1** | **P2** | **P3** |
| 59,1734 | 36,4906 | 8,3677 | 0,1074 | 0,0971 | 0,0758 |

*Tabla 11. Término de potencia y energía para la tarifa 3.1.A*

En primer lugar, es necesario calcular la potencia contratada para cada bomba que compone el sistema de abastecimiento de Villarrobledo, que corresponderá a la mayor de las obtenidas durante las distintas horas. Con esto, se ha calculado la parte fija de la factura eléctrica, el término de potencia, teniendo en cuenta el precio de cada periodo.

Término de potencia

- Bomba Pozo La Capitana: 14.358,57 €/año
- Bomba Pozo de la Estación: 11.023,98 €/año
- Grupo de presión general: 2.657,33 €/año
- Grupo de presión UMOVI: 1352,55 €/año

Posteriormente, se obtienen los distintos valores de energía consumida para cada periodo, distinguiendo entre días laborables y festivos, y se le asignan los precios €/kWh correspondientes para conseguir el valor variable de la factura eléctrica, el término de energía.

Término de energía

- Bomba Pozo La Capitana: 42.521,08 €/año
- Bomba Pozo de la Estación: 57.785,54 €/año
- Grupo de presión general: 15.358,92 €/año
- Grupo de presión UMOVI: 8.232,36 €/año

| Tp (€/año) | Te (€/año) | TOTAL (€/año) |
|---|---|---|
| 29.392,44 | 123.897,89 | 153.290,33 |

*Tabla 12. Valores totales para el año 2016*

# CAPÍTULO 4. DEFICIENCIAS ENCONTRADAS EN EL SISTEMA

## 4.1. CONSIDERACIONES DEL FUNCIONAMIENTO ACTUAL DE LA RED

### 4.1.1. Bajas presiones

La presión de un abastecimiento es un indicador de la calidad de la red. Teniendo en cuenta la presión mínima a garantizar de 15 mca, es posible darse cuenta de que la red de Villarrobledo presenta presiones bastante bajas, pues en una buena parte de los nudos no se superan los 25 mca a lo largo de todo el día.

Para ello, se van a mostrar las presiones en las dos horas más críticas, que corresponden con la hora de menor demanda (4h) y la de mayor demanda (8h).

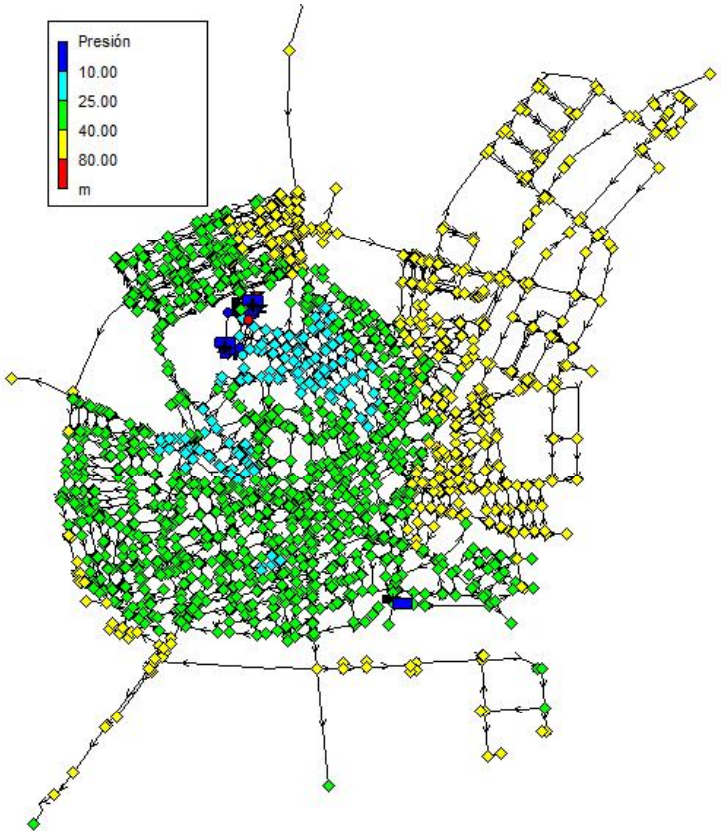



*Ilustración 30. Presiones para la hora de menor demanda (4h)*

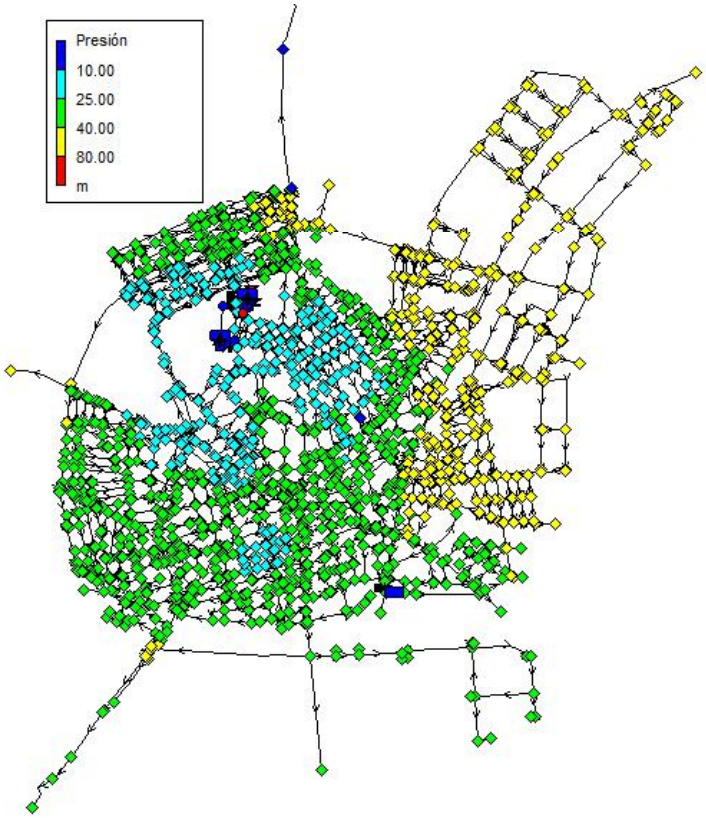



*Ilustración 31. Presiones para la hora de mayor demanda (8h)*

Se puede observar que ambas imágenes son muy similares, coincidiendo la existencia de presiones más altas al este de la ciudad (nudos amarillos). Además, es posible apreciar presiones más altas en la zona al noroeste en la hora de menor demanda (más nudos verdes y amarillos), pues en ese horario nocturno la demanda es menor y, por tanto, las presiones aumentan.

Las zonas con presiones más altas coinciden principalmente con la zona industrial de la población (nudos amarillos), donde se presentan cotas más bajas.

En consecuencia, se detecta que en numerosas zonas de la población va a ser muy difícil garantizar la presión mínima de servicio de 15 mca a los usuarios que asegure calidad en el suministro de agua potable, por lo que será un aspecto importante a mejorar.

### 4.1.2. Velocidades bajas

Las velocidades para una ciudad de terreno llano se recomiendan entre 0,5 y 2,5 m/s. En Villarrobledo la mayoría de las tuberías alcanzan un máximo de 1 m/s. En cambio, hay una gran cantidad de ellas que no alcanzan el 0,1 m/s, por lo que se puede decir que las velocidades son más bajas de lo que sería conveniente y que los caudales son muy bajos para los grandes diámetros que se presentan.

Se aconsejan velocidades mayores a 0,1 m/s para evitar que el carbonato cálcico que hay en suspensión deposite y para controlar que la concentración de cloro en los distintos tramos sea,

al menos, la mínima estipulada para que actúe como agente desinfectante. El cloro introducido en la red en los distintos depósitos es un aspecto clave a tener en cuenta para garantizar un suministro de calidad, por lo que debería controlarse tanto la concentración como la velocidad en cada tramo de la red.

Por otro lado, se aconsejan velocidades menores de 2,5 m/s para evitar las pérdidas por rozamiento en tuberías. La ecuación de Darcy-Weisbach engloba estas pérdidas:

$$h_c = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

Una vez conocidos el factor de fricción (f), la longitud y diámetro de la tubería se pueden modificar las pérdidas de carga aumentando el diámetro de la tubería, por lo que conviene revisar bien las tuberías que presentan altas pérdidas para comprobar que el diámetro que se ha introducido en el modelo sea el que le corresponde.

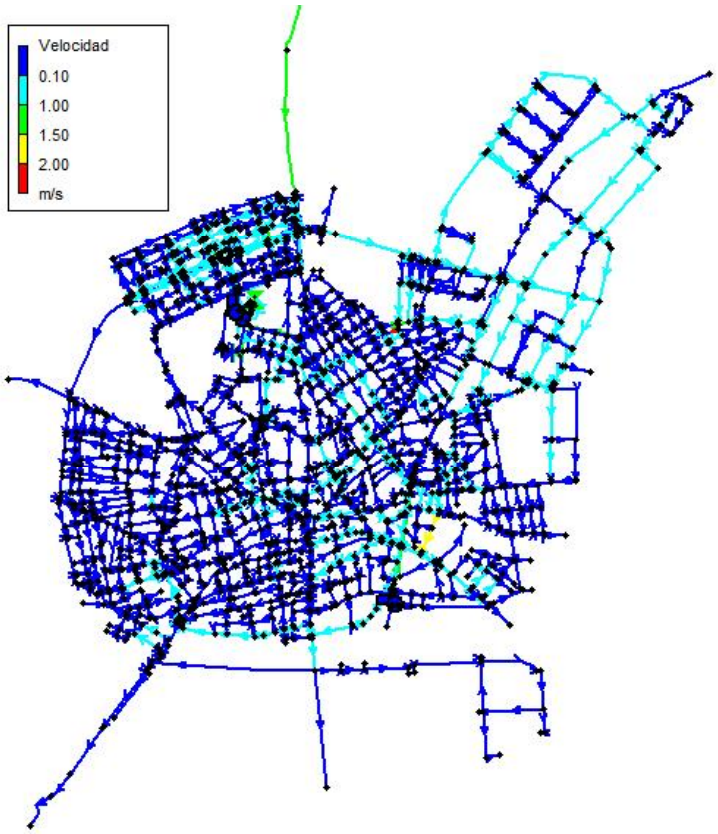



*Ilustración 32. Velocidades para la hora de menor demanda (4h)*

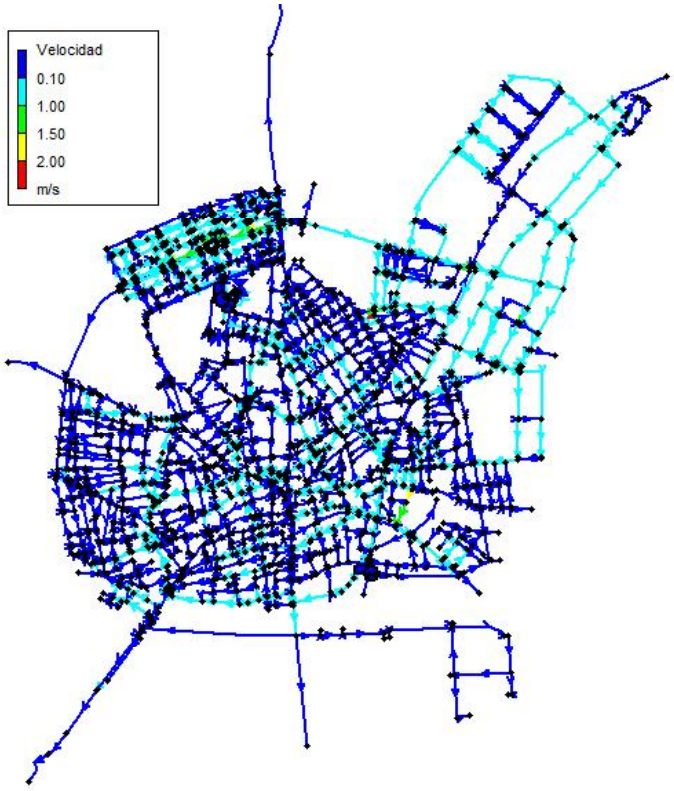



*Ilustración 33. Velocidades para la hora de mayor demanda (8h)*

### 4.1.3. Pérdidas unitarias elevadas

La pérdida unitaria o pérdida de carga en una tubería es la pérdida de presión que se produce en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce.

En el caso del modelo en EPANET se encuentran varias con pérdidas unitarias muy elevadas. Una vez localizadas en la red de tuberías, todas ellas coinciden con un valor de diámetro de 50 mm y corresponden a las seis últimas de la tabla siguiente.

| ID Línea | Diámetro mm | Pérd. Unit. m/km |
|---|---|---|
| Tubería p322 | 60 | 21.42 |
| Tubería p1354 | 63 | 28.04 |
| Tubería p1353 | 63 | 28.28 |
| Tubería p1735 | 63 | 28.53 |
| Tubería p1737 | 63 | 29.53 |
| Tubería p1355 | 60 | 35.56 |
| Tubería p115 | 60 | 41.26 |
| Tubería p35 | 50 | 47.98 |
| Tubería p89 | 50 | 79.57 |
| Tubería p1923 | 50 | 80.74 |
| Tubería p91 | 50 | 87.88 |
| Tubería p33 | 50 | 201.98 |
| Tubería p34 | 50 | 203.44 |

*Ilustración 34. Pérdidas unitarias en tuberías*

# CAPÍTULO 5. MEJORAS EN LA RED

## 5.1. CONTROL DEL CLORO

### 5.1.1. Proceso de cloración

Se entiende por cloración la operación que consiste en añadir cloro al agua con el propósito de desinfectarla.

La cloración se puede realizar mediante la aplicación de cloro gas o de soluciones de hipoclorito sódico. La utilización de soluciones de hipoclorito sódico es la práctica más extendida a la hora de aplicar el cloro para la desinfección del agua de consumo humano.

Es importante tener en cuenta que el cloro activo de la solución se pierde a lo largo del tiempo. Esta pérdida es más relevante si aumenta la temperatura, si incide la luz solar, si el tiempo de almacenamiento es largo y si hay materiales en contacto con el agua.

Cuando se añade cloro al agua se producen una serie de reacciones químicas, según la cantidad de producto que se utiliza:

- **Etapa 1.** Las primeras cantidades de cloro reaccionan con la materia orgánica del agua. El cloro medido en esta etapa es cero, porque se gasta todo en esa reacción.
- **Etapa 2.** El cloro empieza a reaccionar con los compuestos nitrogenados: amoníaco y compuestos aminonitrogenados que pueda haber.
  Si hay presencia de amonio, el cloro reacciona formando cloraminas. Se puede medir la cantidad de cloro residual, pero no corresponde a cloro activo libre, sino a esas cloraminas: formas combinadas de cloro que tienen menos capacidad desinfectante que el cloro libre.
- **Etapa 3.** Si se añade más cloro, el cloro medido disminuye. En esta etapa, el nuevo cloro introducido destruye los compuestos formados durante la etapa anterior, hasta el llamado punto de ruptura o break point, que marca el final de la demanda de cloro del agua.
- **Etapa 4.** En esta etapa final, el cloro que se añade sí se puede medir ya como cloro residual libre, y es en este momento cuando se puede garantizar una desinfección eficaz del agua y un efecto residual adecuado.

La aplicación de cloro al agua de consumo humano se debe hacer a la entrada del depósito de red y de forma que se pueda garantizar una buena homogeneización con el agua, un tiempo de contacto elevado y una cantidad adecuada.

### 5.1.2. Nivel de cloro en Villarrobledo

El control de la velocidad de circulación en un abastecimiento es muy importante en cuanto a la calidad del agua, pues es clave para la concentración de cloro en cada tramo.

Como ya se ha analizado anteriormente, en Villarrobledo la mayor parte de las tuberías presentan una velocidad muy baja, lo que conlleva a problemas de cloro.

Una alternativa para evitar esto sería introducir varias estaciones de recloración a lo largo de la red. De esta forma, habría más de un punto donde se suministre cloro y no únicamente a la entrada de los depósitos, por lo que sería más fácil que circule una concentración de cloro adecuada en todas las zonas. Apuntar que el rango establecido para el nivel de cloro en Castilla-La Mancha está entre los 0,2 y 1 mg/L.

Por tanto, con la incorporación de más estaciones de cloración no se soluciona la baja velocidad de circulación en la red, pero sí que se podría acabar con los problemas de déficit de cloro en distintos puntos del municipio, consiguiendo suministrar agua de buena calidad.

A continuación, se muestra una imagen del estado de concentración de cloro que presenta Villarrobledo durante el tercer día, ya que deben pasar unos dos días desde el momento en que se clora hasta que el agua se suministra. Se observa que hay numerosos puntos en la red los cuales no superan los 0,2 mg/L, que es considerada una baja concentración.

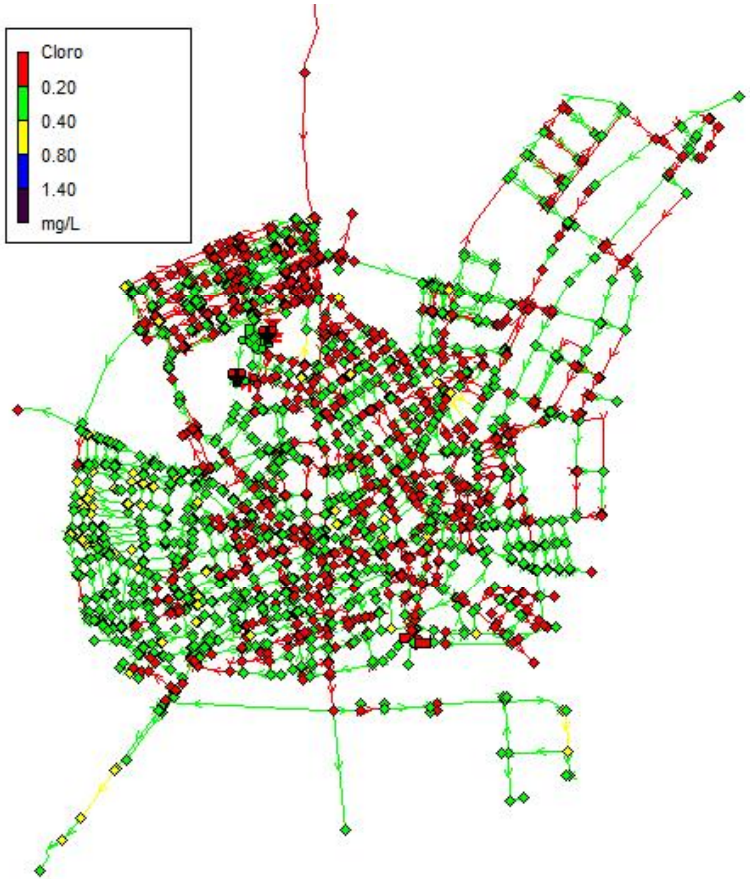



*Ilustración 35. Concentración de cloro al tercer día*

### 5.2. REDUCCIÓN PÉRDIDAS UNITARIAS

Como se ha comentado previamente existen algunas tuberías que presentan altas pérdidas unitarias y todas ellas tienen un diámetro de 50 mm.

Para reducir estas pérdidas sería conveniente la sustitución de este diámetro tan pequeño por uno mayor. Es posible comprobar que con el aumento del diámetro a 80 mm se acaba con las pérdidas tan elevadas y además se disminuye la velocidad de circulación, pues al principio también resulta demasiado alta.

### 5.3. AUMENTO DE PRESIONES

Es sabido que las presiones en la ciudad de Villarrobledo no son demasiado altas, llegando a dificultar la aportación de la presión mínima en diversos puntos de la red. Por ello, en este apartado se van a introducir distintos elementos que hagan que estas presiones aumenten en aquellas zonas donde son más necesarias, para intentar conseguir tener una red más uniforme en presiones que permita dar mejores prestaciones.

Dos zonas importantes a considerar en el mapa de presiones del abastecimiento son: la zona alrededor de los depósitos que presenta presiones bajas y la zona correspondiente al polígono industrial de la localidad al noreste que presenta las presiones más altas, no llegando éstas a ser demasiado exageradas.

Para solucionar las presiones bajas en las zonas cercanas a los depósitos se han incorporado dos nuevos grupos de presión con sus nuevos puntos de funcionamiento cada uno.

| Altura (mca) | Caudal (LPS) |
|---|---|
| 16 | 94 |

*Tabla 13. Punto de funcionamiento grupo presión general*

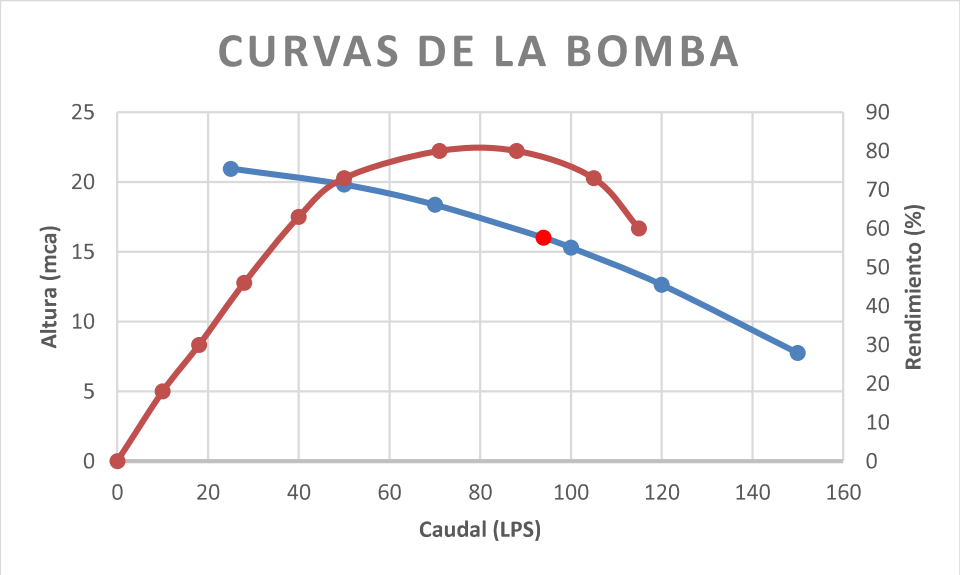



*Ilustración 36. Curva característica y de rendimiento de la bomba (grupo presión general)*

| Altura (mca) | Caudal (LPS) |
|---|---|
| 15 | 43 |

*Tabla 14. Punto de funcionamiento grupo presión UMOVI*

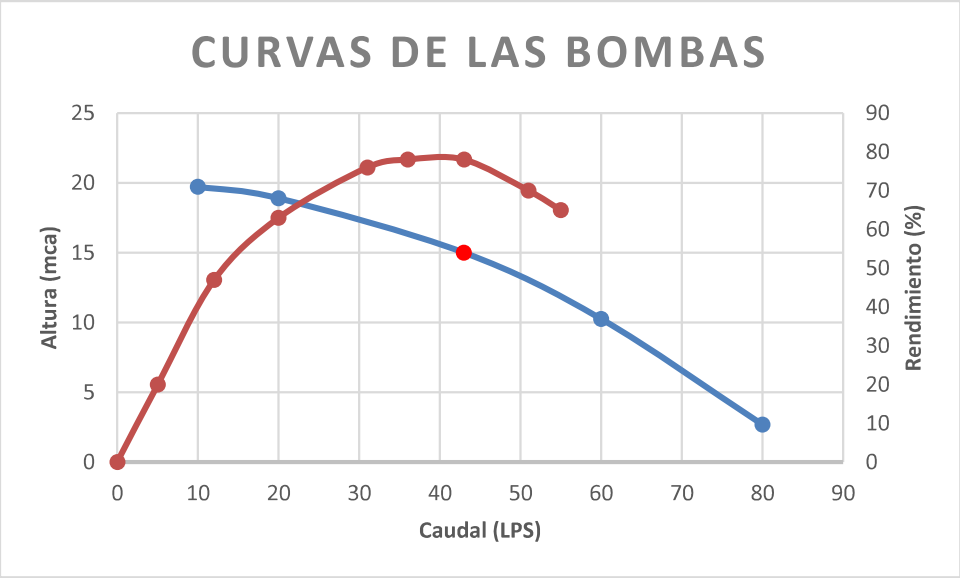



*Ilustración 37. Curva característica y de rendimiento de la bomba (grupo presión UMOVI)*

Con el propósito de regular las presiones de la zona industrial que siempre presentan valores más elevados que el resto de la población se ha incorporado una válvula reductora de presión a la entrada de esta zona con una consigna de 30 mca. Este tipo de válvulas fijan la presión aguas abajo al valor deseado. Una vez fijada esta presión de salida, se mantiene constante independientemente de las variaciones de caudal y de la presión aguas arriba. Asimismo, cuando el consumo es nulo, la válvula se cierra para mantener esa presión de salida regulada. En la imagen que se muestra a continuación se ve cómo los nudos de esta parte de la localidad se presentan ahora entre unos valores de 20 y 40 mca.

*Ilustración 38. Presiones en la zona industrial con válvula reductora*

El mapa de presiones con las nuevas bombas y la válvula reductora a la entrada de la zona industrial queda de la siguiente forma, presentando unas presiones que rondan los 20-40 m y acabando con las presiones menores de 20 m casi en su totalidad.

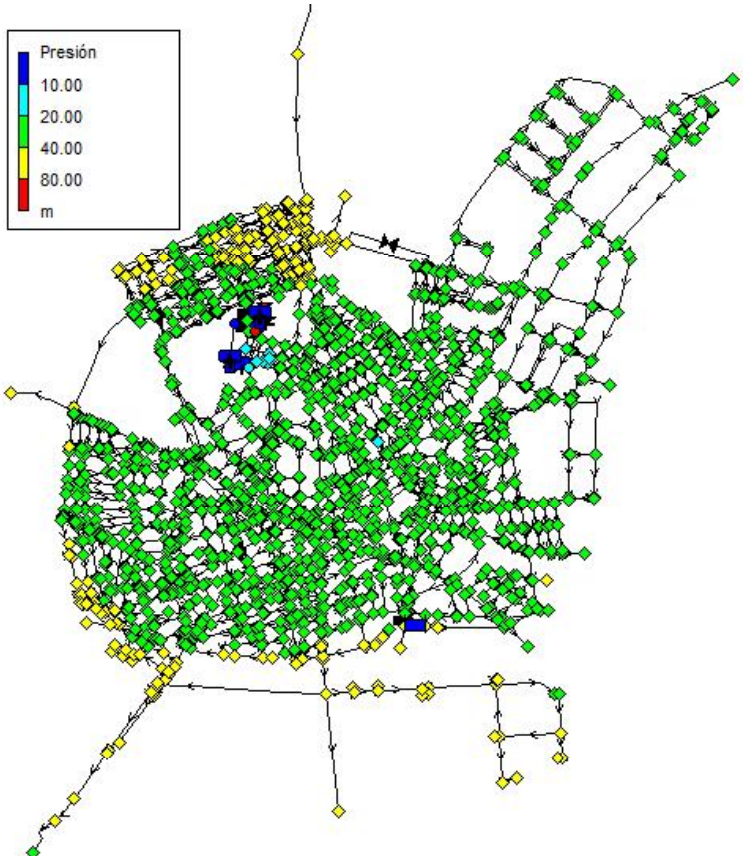



*Ilustración 39. Mapa de presiones tras mejora (4h)*

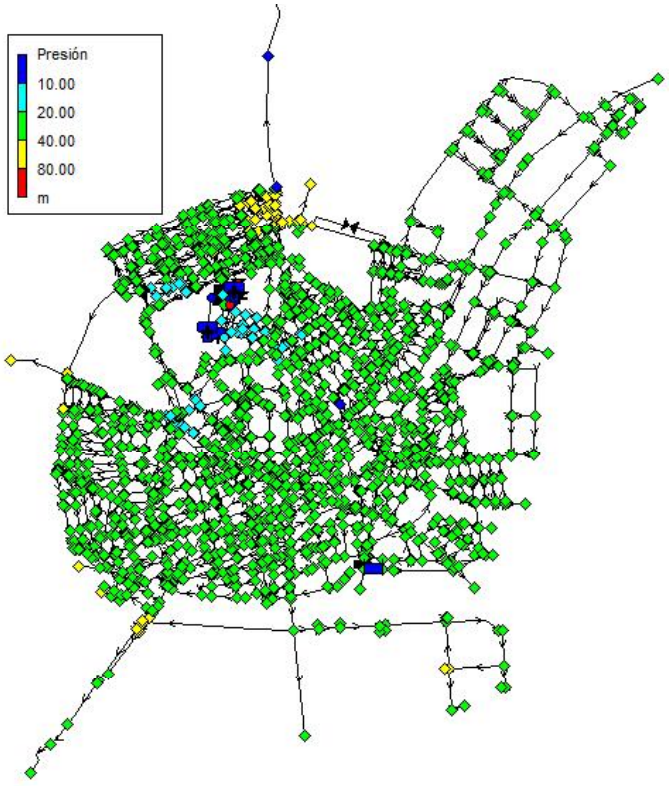



*Ilustración 40. Mapa de presiones tras mejora (8h)*

Conviene realizar la auditoría energética del modelo con los nuevos grupos de presión, la válvula reductora y las nuevas tuberías para ver las mejoras conseguidas, presentando un desglose de energías como el que sigue:

- **Energía total aportada: 4.904.447,06 kWh/año**

  - ✓ **Energía aportada por las bombas: 1.021.359,6 kWh/año**
    Energía de la bomba 1: 297.792,76 kWh/año
    Energía de la bomba 2: 525.398,23 kWh/año
    Energía de la bomba 3: 146.511,37 kWh/año
    Energía de la bomba 4: 51.656,35 kWh/año
  - ✓ **Energía aportada por los embalses: 3.883.092,69 kWh/año**
    Energía del embalse 1: 1.274.213,31 kWh/año
    Energía del embalse 2: 2.608.879,37 kWh/año

- **Energía total consumida: 5.140.919,66 kWh/año**

  - ✓ **Energía entregada a los usuarios: 3.453.136,8 kWh/año**
    Energía mínima requerida: 3.389.499,86 kWh/año
    Energía topográfica: 56.479,03 kWh/año
    Energía de exceso: 5.236,83 kWh/año
  - ✓ **Energía disipada por fricción: 185.577,16 kWh/año**
  - ✓ **Energía disipada en las válvulas: 78.410,79 kWh/año**
  - ✓ **Energía perdida a través de las fugas: 1.649.198,48 kWh/año**
  - ✓ **Energía perdida en bombas: 255.610,74 kWh/año**
    Energía perdida en la bomba 1: 63.345,18 kWh/año
    Energía perdida en la bomba 2: 138.479,24 kWh/año
    Energía perdida en la bomba 3: 36.177,68 kWh/año
    Energía perdida en la bomba 4: 17.608,42 kWh/año
  - ✓ **Energía de compensación: -480.954,32 kWh/año**

*Ilustración 41. Gráfico energía total consumida tras mejora*

Si se compara la auditoría energética con la que se mostró anteriormente cuando estaban los otros grupos de presión, no había válvula reductora y las tuberías de 80 mm eran de 50 mm, se observa una disminución en la energía perdida, lo cual es debido al aumento del diámetro en las tuberías más críticas y la disminución de presión en el polígono.

| | Antes mejora | Tras mejora |
|---|---|---|
| **Energía disipada por fricción (kWh)** | 205.310,31 | 185.577,16 |
| **Energía disipada en las válvulas (kWh)** | 86.132,35 | 78.410,79 |
| **Energía perdida a través de fugas (kWh)** | 1.910.891,23 | 1.649.198,48 |
| **Energía en las bombas (kWh)** | 291.227,77 | 255.610,74 |

*Tabla 15. Comparación energética tras la incorporación de la mejora*

Se contempla un valor muy alto para la energía perdida a través de las fugas, que una vez más hace ver que las pérdidas de agua son un claro obstáculo a la sostenibilidad y que deben reducirse en la medida de lo posible para conseguir unos costos de producción y consumo de energía reducidos.

Es posible comentar que al haber menos fugas tras la mejora el volumen inyectado en el sistema se ha reducido (volumen fugado menor), mientras que el volumen consumido sigue siendo el mismo, lo cual hace que el rendimiento volumétrico de la red aumente casi un 10% en comparación al modelo sin la implantación de la mejora.

# CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

El presente Trabajo Fin de Grado ha consistido en la elaboración del modelo matemático en EPANET de la red de abastecimiento de agua del municipio de Villarrobledo. Este modelo permite tener un control superior sobre la red, lo que es útil a la hora de tomar decisiones y mejorar la gestión del suministro de agua.

El análisis del modelo ha permitido descubrir funcionamientos indeseables en la red relacionados con la conexión entre depósitos y sus respectivos bombeos, las presiones reducidas o las bajas velocidades de circulación.

Se ha detectado que actualmente las presiones en la población son bastante bajas en general, existiendo zonas críticas que a determinadas horas no llegan a la presión mínima de servicio establecida en la localidad. Esto se remedia con nuevos grupos de presión que dan mayor altura.

Por otro lado, el modelo también ha sido de utilidad para homogeneizar las presiones en toda la red, mediante la instalación de una válvula reductora a la entrada de una de las zonas con mayores presiones, el polígono industrial.

Ha servido para reflejar la importancia que tiene una buena selección del diámetro de las tuberías a la hora de disminuir las pérdidas por fricción excesivas.

Además, se ha realizado un estudio detallado de los volúmenes inyectados y demandados, se han presentado las distintas energías aportadas y consumidas, así como los rendimientos, que son tratados como indicadores para la evaluación de la eficiencia de la red.

Se ha percibido una gran relevancia de las fugas en el sistema, muy relacionadas con las presiones, lo que hace aún más importante la reducción de las pérdidas de agua por parte de la empresa, ya que llevaría a una mayor eficiencia económica y ecológica y a un mejor servicio para los clientes.

En definitiva, el trabajo ha servido para plasmar la importancia que tiene la gestión de la presión, entendida como la práctica de manejar presiones del sistema a niveles óptimos de servicio que asegure un suministro suficiente y eficiente.

# CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


- Municipio de Villarrobledo. https://es.wikipedia.org/wiki/Villarrobledo
- Demografía de Villarrobledo (Albacete). https://www.foro-ciudad.com/albacete/villarrobledo/habitantes.html
- Válvulas de compuerta. http://www.valvulasymedidores.com/valvulas_de_compuerta.html
- Automatismos y controles. https://villarrobledo.gestagua.es/index.php/control-de-proceso/
- Pérdidas de carga. https://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A9rdida_de_carga
- Catálogo Bombas. Bombas Ideal.
- http://www.bombasideal.com/wp-content/uploads/catalogos/CP.pdf
- Guía para la reducción de las pérdidas de agua. Gestión de la presión. https://www.giz.de/fachexpertise/downloads/giz2011-es-guia-reduccion-perdidas-agua-resolucion-baja.pdf
- Niveles de cloro. Límite inferior de cloro. https://www.facsa.com/el-cloro/ http://www.elaguapotable.com/cloracion1.htm https://www.diba.cat/documents/713456/725868/salutpublica-descarrega-manuagua-pdf.pdf
- Manual EPANET. https://www.iiama.upv.es/iiama/src/elementos/Software/2/epanet/EN2Manual_esp_v20012_ext.pdf
- Manual EpaCAD. Instituto Tecnológico del Agua.
- Manual ITAFugas. Instituto Tecnológico del Agua.
- Manual ITAEnergy. Instituto Tecnológico del Agua.
- Enrique Cabrera Marcet. *Una aproximación a la problemática de las pérdidas de agua en redes urbanas.*
- Cabrera E., Almandoz, J., Arregui, F., y García-Serra, J. (1999). *Auditoría de redes de distribución de agua*, Ingeniería del Agua, 6(4), 291-303.

# PRESUPUESTO

# PRESUPUESTO

| RESUMEN PRESUPUESTO GENERAL | | |
|---|---|---|
| | | Importe |
| 1 | TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL | 24.332,05 € |
| 2 | TOTAL PRESUPUESTO GESTIÓN DE RESIDUOS | 991,03 € |
| 3 | TOTAL PRESUPUESTO SEGURIDAD Y SALUD | 730,00 € |
| | | |
| TOTAL PRESUPUESTO | | 26.053,09 € |

## ANEJO DE JUSTIFICACIÓN DE PRECIOS

### 1. DEMOLICIÓN PAVIMENTOS EXISTENTES ASFALTO/ACERA

| Nº de Código | Ud | Descomposición | Rend. | p.s. | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| **DMF010** | **m²** | **Demolición de pavimento de aglomerado asfáltico de 15 cm de espesor medio, con martillo neumático, y carga manual sobre camión o contenedor.** | | | |
| **mq05mai030** | h | Martillo neumático. | 0,121 | 4,12 | 0,50 |
| **mq05pdm110** | h | Compresor portátil diesel media presión 10 m³/min. | 0,061 | 6,98 | 0,43 |
| **mo041** | h | Oficial 1ª construcción de obra civil. | 0,044 | 17,64 | 0,78 |
| **mo087** | h | Ayudante construcción de obra civil. | 0,106 | 16,95 | 1,80 |
| | % | Costes directos complementarios | 2,000 | 3,51 | 0,07 |
| | | | | **TOTAL** | **3,58** |

### 2. EXCAVACIÓN EN ZANJA POR MEDIOS MECÁNICOS/MANUALES

| Nº de Código | Ud | Descomposición | Rend. | p.s. | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| **ACE040** | **m³** | **Excavación en zanjas en terreno de tránsito compacto, de hasta 1,25 m de profundidad máxima, con medios mecánicos, retirada de los materiales excavados y carga a camión.** | | | |
| mq01ret020b | h | Retrocargadora sobre neumáticos, de 70 kW. | 0,28 | 36,86 | 10,28 |
| mo087 | h | Ayudante construcción de obra civil. | 0,20 | 16,95 | 3,37 |
| | % | Costes directos complementarios | 2,00 | 10,28 | 0,21 |
| | | | | **TOTAL** | **13,86** |

### 3. INSTALACIÓN DE TUBERÍA

| Nº de Código | Ud | Descomposición | Rend. | p.s. | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| **IUA020** | **m** | **Tubo de polietileno PE 100, de color negro con bandas azules, de 90 mm de diámetro exterior y 5,4 mm de espesor, SDR17, PN=10 atm.** | | | |
| mt37tpa020bha | m | Tubo de polietileno PE 100, de color negro con bandas azules, de 90 mm de diámetro exterior y 5,4 mm de espesor, SDR17, PN=10 atm, según UNE-EN 12201-2, | 1 | 8,8 | 8,8 |
| mo011 | h | Oficial 1ª construcción. | 0,035 | 16,12 | 0,5642 |
| mo060 | h | Peón ordinario construcción. | 0,035 | 14,21 | 0,49735 |
| mo008 | h | Oficial 1ª fontanero | 0,059 | 18,13 | 1,06967 |
| mo107 | h | Ayudante fontanero | 0,059 | 16,4 | 0,9676 |
| | % | Medios auxiliares | 2 | 10,84 | 0,22 |
| | | | | | |
| | | | | **TOTAL** | **12,12 €** |

| | Ud | Válvula reductora de acción directa no pilotada, Ramus REDAR, de 250 mm de diámetro, con pistón y anillo de cierre completamente en acero inoxidable. | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Ud | Válvula reductora de acción directa no pilotada, Ramus REDAR, de 250 mm de diámetro, con pistón y anillo de cierre completamente en acero inoxidable. | 1 | 2983,64 | 2983,64 |
| | h | Oficial 1ª construcción. | 0,035 | 16,12 | 0,5642 |
| | h | Peón ordinario construcción. | 0,035 | 14,21 | 0,49735 |
| | h | Oficial 1ª fontanero | 0,059 | 18,13 | 1,06967 |
| | h | Ayudante fontanero | 0,059 | 16,4 | 0,9676 |
| | % | Medios auxiliares | 2 | 10,84 | 0,22 |
| | | | | | |
| | | | | **TOTAL** | **2.986,96 €** |

| | Ud | Bomba Ideal horizontal centrífuga, sobre bancada, de 1450 rpm, 255 mm de diámetro, RNI 150-26. | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Ud | Bomba Ideal horizontal centrífuga, RNI 150-26, sobre bancada, de 1450 rpm, 255 mm de diámetro, 21,2kW. | 1 | 9051 | 9051 |
| | h | Oficial 1ª construcción. | 0,035 | 16,12 | 0,5642 |
| | h | Peón ordinario construcción. | 0,035 | 14,21 | 0,49735 |
| | h | Oficial 1ª fontanero | 0,059 | 18,13 | 1,06967 |
| | h | Ayudante fontanero | 0,059 | 16,4 | 0,9676 |
| | % | Medios auxiliares | 2 | 10,84 | 0,22 |
| | | | | | |
| | | | | TOTAL | 9.054,32 € |

| | Ud | Bomba Ideal horizontal centrífuga, sobre bancada, de 1450 rpm, 245 mm de diámetro, RNI 100-26H. | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Ud | Bomba Ideal horizontal centrífuga, RNI 100-26H, sobre bancada, de 1450 rpm, 245 mm de diámetro, 9,3kW. | 1 | 5558 | 5558 |
| | h | Oficial 1ª construcción. | 0,035 | 16,12 | 0,5642 |
| | h | Peón ordinario construcción. | 0,035 | 14,21 | 0,49735 |
| | h | Oficial 1ª fontanero | 0,059 | 18,13 | 1,06967 |
| | h | Ayudante fontanero | 0,059 | 16,4 | 0,9676 |
| | % | Medios auxiliares | 2 | 10,84 | 0,22 |
| | | | | | |
| | | | | TOTAL | 5.561,32 € |

## 4. REPOSICIÓN DE ZANJA

| Nº de Código | Ud | Descomposición | Rend. | p.s. | Precio partida |
|---|---|---|---|---|---|
| **ADR010** | **m³** | **Relleno principal de zanjas para instalaciones, con zahorra artificial caliza, y compactación al 95% del Proctor Modificado mediante equipo manual con pisón vibrante.** | | | |
| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | p.s. | Precio partida |
| mt01var010 | m | Cinta plastificada. | 1,1 | 0,14 | 0,154 |
| mt01zah010ba | t | Zahorra de machaqueo o artificial, cantera caliza. | 2,2 | 9,47 | 20,834 |
| mq04dua020 | h | Dumper autocargable de 2 t de carga útil, con mecanismo | 0,117 | 9,27 | 1,08459 |
| mq02rop020 | h | Pisón vibrante de 80 kg, con placa de 30x30 cm, tipo rana. | 0,879 | 3,5 | 3,0765 |
| mq02cia020 | h | Camión con cuba de agua. | 0,012 | 40,08 | 0,48096 |
| mo060 | h | Peón ordinario construcción. | 0,308 | 16,16 | 4,97728 |
| | % | Costes directos complementarios | 2 | 30,6 | 0,61 |
| | | | | TOTAL | 31,22 |

| ACR020 | m³ | Relleno de zanjas con arena de 0 a 5 mm de diámetro, y compactación en tongadas sucesivas de 25 cm de espesor máximo con medios mecánicos, hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 90% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado, realizado según UNE 103501. El precio no incluye la realización del ensayo Proctor Modificado. | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | p.s. | Precio partida |
| mt01ara030 | t | Arena de 0 a 5 mm de diámetro, para relleno de zanjas. | 1,8 | 9,01 | 16,218 |
| mq02cia020j | h | Camión cisterna de 8 m³ de capacidad. | 0,005 | 40,59 | 0,20295 |
| mq01pan010a | h | Pala cargadora sobre neumáticos de 120 kW/1,9 m³. | 0,011 | 40,6 | 0,4466 |
| mq02rov010i | h | Compactador monocilíndrico vibrante autopropulsado, de 129 kW, de 16,2 t, anchura de trabajo 213,4 cm. | 0,054 | 63,1 | 3,4074 |
| mo087 | h | Ayudante construcción de obra civil. | 0,022 | 16,95 | 0,3729 |
| | % | Costes directos complementarios | 2 | 0 | 0 |
| | | | | TOTAL | 20,65 |

| **ADR010** | **m³** | **Relleno principal de zanjas para instalaciones, con hormigón no estructural HM-20/P/25/IIa fabricado en central y vertido desde camión.** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Descompuesto | Ud | Descomposición | Rend. | p.s. | Precio partida |
| mt10hmf011bacbbaa | m³ | Hormigón no estructural HNE-20/B/20, fabricado en central, vertido desde camión. | 1 | 73,13 | 73,13 |
| mq05cop010 | h | Compresor estacionario eléctrico media presión 2 m³/min. | 0,171 | 2,36 | 0,40356 |
| mq08vib010a | h | Vibrador neumático de hormigón 50 mm. | 0,171 | 0,81 | 0,13851 |
| mo011 | h | Oficial 1ª construcción. | 0,086 | 17,54 | 1,50844 |
| mo060 | h | Peón ordinario construcción. | 0,166 | 16,16 | 2,68256 |
| | % | Costes directos complementarios | 2 | 77,32 | 1,55 |
| | | | | **TOTAL** | **79,41** |

| **UXF010** | **m²** | **Pavimento de mezcla bituminosa continua en caliente de composición semidensa, tipo S12, de 5 cm de espesor.** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| mt47aag020bcaa | t | Mezcla bituminosa continua en caliente de composición semidensa, tipo S12, con árido granítico y betún asfáltico de penetración. | 0,115 | 53,01 | 6,10 |
| mq11ext030 | h | Extendedora asfáltica de cadenas 110 CV. | 0,001 | 80,34 | 0,08 |
| mq02ron010aa | h | Rodillo vibrante tándem autopropulsado, de 2300 kg, anchura de trabajo 105 cm. | 0,002 | 16,58 | 0,03 |
| mq11com010 | h | Compactador de neumáticos autopropulsado 12/22 t. | 0,001 | 58,20 | 0,06 |
| mo027 | h | Oficial 1ª de obra pública. | 0,003 | 17,54 | 0,05 |
| mo060 | h | Peón ordinario construcción. | 0,012 | 16,43 | 0,20 |
| | % | Costes directos complementarios | 2,000 | 6,52 | 0,13 |
| | | | | **TOTAL** | **6,65** |

| **UXF010** | **m²** | **Pavimento de mezcla bituminosa continua en caliente de composición semidensa, tipo S20, de 5 cm de espesor.** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| mt47aag020bdaa | t | Mezcla bituminosa continua en caliente de composición semidensa, tipo S20, con árido granítico y betún asfáltico de penetración. | 0,138 | 53,01 | 7,32 |
| mq11ext030 | h | Extendedora asfáltica de cadenas 110 CV. | 0,002 | 80,34 | 0,16 |
| mq02ron010aa | h | Rodillo vibrante tándem autopropulsado, de 2300 kg, anchura de trabajo 105 cm. | 0,002 | 16,58 | 0,03 |
| mq11com010 | h | Compactador de neumáticos autopropulsado 12/22 t. | 0,002 | 58,20 | 0,12 |
| mo027 | h | Oficial 1ª de obra pública. | 0,003 | 17,54 | 0,05 |
| mo060 | h | Peón ordinario construcción. | 0,014 | 16,43 | 0,23 |
| | % | Costes directos complementarios | 2,000 | 7,91 | 0,16 |
| | | | | **TOTAL** | **8,07** |

| **U49206** | **Ud** | **Slurry Seal** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| T46032 | Tm | Betún asfaltico | 1,000 | **308** | **308,00** |
| % | | Medios auxiliares | 3,000% | **308** | **9,24** |
| % | | Costes indirectos | 3,000% | **317,5** | **9,53** |
| | | | | **TOTAL** | **326,77** |

## Mediciones y Presupuesto ampliación de redes

### OBRA CIVIL nº 1 DEMOLICIÓN PAVIMENTO EXISTENTE ASFALTO / ACERA PAVIMENTADA

| Nº | Ud | Descripción | Medición | Longitud | Anchura | Altura | CanPres | Precio | Importe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.01 | m | **Corte de pavimento de aglomerado asfáltico, mediante máquina cortadora de pavimento, y carga manual sobre camión o contenedor.** | | | | | | | |
| | | Demolición para instalación de red de distribución de agua potable ira por calzada | | 112,00 | 0,60 | 0,10 | 6,72 | 3,58 | **24,06** |
| | | Demolicion para construcción de arqueta | | 1,65 | 1,30 | 0,10 | 0,21 | 3,58 | **0,77** |
| | | | | | | | | | **24,83** |
| | | | | | | | | **TOTAL** | **24,83** |

### OBRA CIVIL nº 2 EXCAVACIÓN EN ZANJA POR MEDIOS MECÁNICOS / MANUALES.

| Nº | Ud | Descripción | Medición | Longitud | Anchura | Altura | CanPres | Precio | Importe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.01 | m³ | **Excavación en zanjas en terreno de tránsito compacto, de hasta 1,25 m de profundidad máxima, con medios mecánicos, retirada de los materiales excavados y carga a camión.** | | | | | | | |
| | | Excavación para alojamiento de tubería agua potable | 100% | 112,00 | 0,60 | 1,06 | 71,23 | 13,86 | **987,28** |
| | | Excavación para construccion de arqueta | 100% | 1,65 | 1,30 | 1,60 | 3,43 | 13,86 | **47,57** |
| | | | | | | | | | **1.034,84** |
| | | | | | | | | **TOTAL** | **1.034,84** |

### OBRA MECÁNICAnº 3 INSTALACIÓN DE TUBERÍAS Y EQUIPOS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

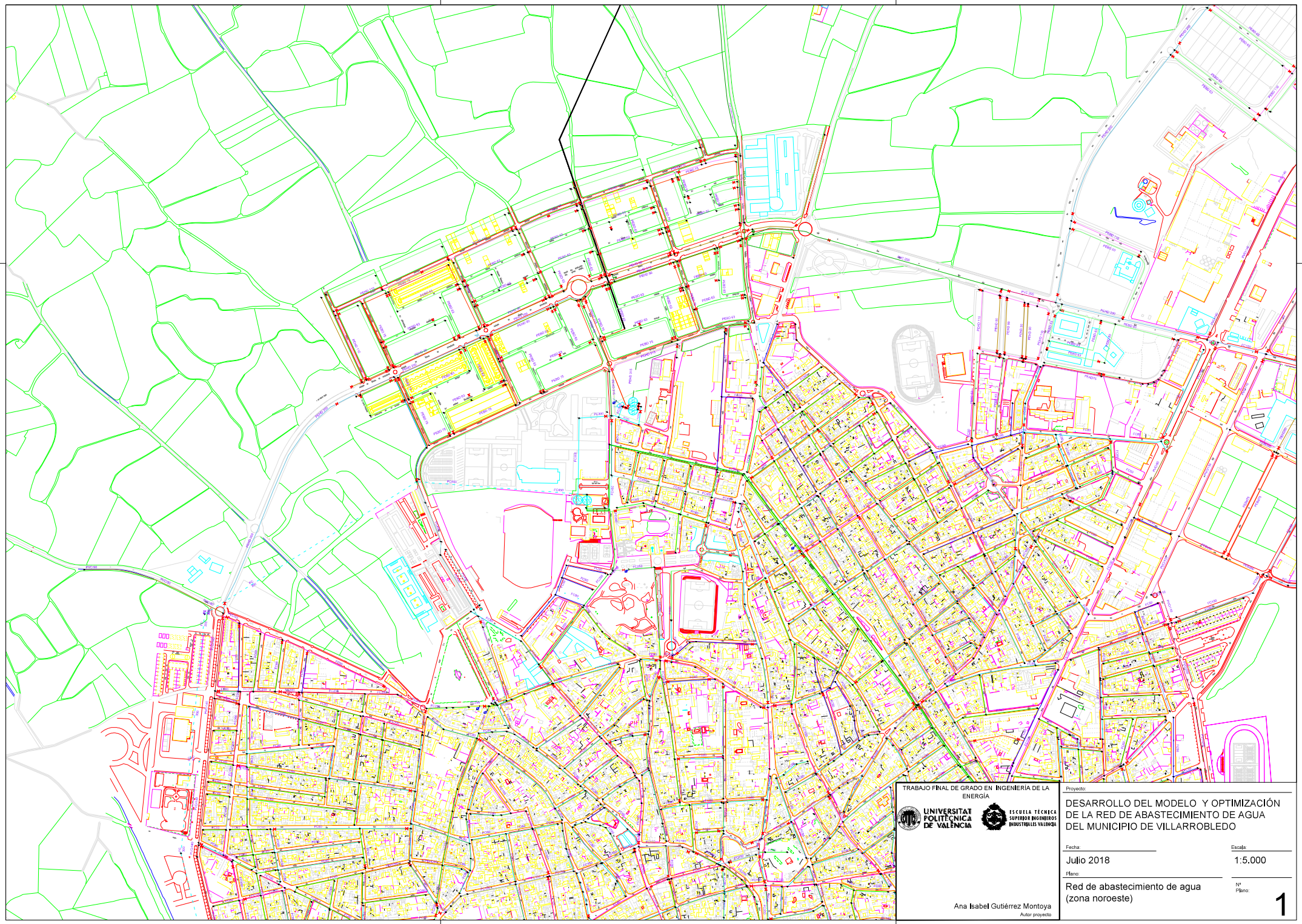
| Nº | Ud | Descripción | Medición | Longitud | Anchura | Altura | CanPres | Precio | Importe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.01 | ml | **Tubo de polietileno PE 100, de color negro con bandas azules, de 90 mm de diámetro exterior y 5,4 mm de espesor, SDR17, PN=10 atm.** | | | | | | | |
| | | PE 90 mm | | 112,00 | | | 112,00 | 12,12 | **1.357,31** |
| | | | | | | | | | **1.357,31** |
| 3.02 | Ud | **Bomba Ideal horizontal centrífuga, sobre bancada, de 1450 rpm, 255 mm de diámetro, RNI 150-26.** | | | | | | | |
| | | RNI 150-26 | | | | | 1,00 | 9051 | **9.051,00** |
| | | | | | | | | | **9.051,00** |
| 3.03 | Ud | **Bomba Ideal horizontal centrífuga, sobre bancada, de 1450 rpm, 245 mm de diámetro, RNI 100-26H.** | | | | | | | |
| | | RNI 100-26H | | | | | 1,00 | 5558 | **5.558,00** |
| | | | | | | | | | **5.558,00** |
| 3.04 | Ud | **Válvula reductora de acción directa no pilotada, Ramus REDAR, de 250 mm de diámetro, con pistón y anillo de cierre completamente en acero inoxidable.** | | | | | | | |
| | | REDAR 250 mm | | | | | 1,00 | 2983,64 | **2.983,64** |
| | | | | | | | | | **2.983,64** |
| | | | | | | | | **TOTAL** | **18.949,95** |

| OBRA CIVIL nº 4 REPOSICIÓN DE ZANJA, PAVIMENTOS ASFALTOS / ACERA PAVIMENTADA. | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Nº* | *Ud* | *Descripción* | *Medición* | *Longitud* | *Anchura* | *Altura* | *CanPres* | *Precio* | *Importe* |
| **4.01** | **m³** | **Relleno principal de zanjas para instalaciones, con zahorra artificial caliza, y compactación al 95% del Proctor Modificado mediante equipo manual con pisón vibrante.** | | | | | | | |
| | | Reposición para alojamiento de tubería agua potable | | 112,00 | 0,60 | 0,55 | 36,96 | 31,22 | **1.153,79** |
| | | | | | | | | | **1.153,79** |
| **4.02** | **m³** | **Relleno de zanjas con arena de 0 a 5 mm de diámetro, y compactación en tongadas sucesivas de 25 cm de espesor máximo con medios mecánicos, hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 90% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado, realizado** | | | | | | | |
| | | Reposición para alojamiento de tubería agua potable | | 112,00 | 0,60 | 0,34 | 22,85 | 20,65 | **471,76** |
| | | | | | | | | | **471,76** |
| **4.02** | **m³** | **Relleno principal de zanjas para instalaciones, con hormigón en masa HM-20/P/25/IIa fabricado en central y vertido desde camión.** | | | | | | | |
| | | Reposición para alojamiento de tubería agua potable | | 112,00 | 0,60 | 0,32 | 21,50 | 79,41 | **1.707,70** |
| | | | | | | | | | **1.707,70** |
| **4.03** | **m²** | **Pavimento de mezcla bituminosa continua en caliente de composición semidensa, tipo S12, de 5 cm de espesor.** | | | | | | | |
| | | Reposición para alojamiento de tubería agua potable | | 112,00 | 0,60 | | 67,20 | 6,65 | 446,88 |
| | | | | | | | | | **446,88** |
| **4.04** | **m²** | **Pavimento de mezcla bituminosa continua en caliente de composición semidensa, tipo S20, de 5 cm de espesor.** | | | | | | | |
| | | Reposición para alojamiento de tubería agua potable | | 112,00 | 0,60 | | 67,20 | 8,07 | 542,30 |
| | | | | | | | | | **542,30** |
| | | | | | | | | **TOTAL** | **4.322,44** |

| Presupuesto Gestión de Residuos | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Nº* | *Tipología de RCD* | *Estimación en Tn* | *Estimación en m³* | *Precio gestión en Planta/Vertedero/ Cantera/Gestor (€/tn)* | *Cantidad de contenedores necesarios* | *Precio de transporte contenedor (€)* | *Importe total (€)* |
| ***ESCOMBRO*** | | | | | | | |
| **1.01** | **Tierras y piedras de excavación (LER 17 05 04)** | 31,25 | 25,00 | 0,015 | 3 | 100 | **300,47** |
| **1.02** | **Gravas y rocas trituradas (LER 01 04 08)** | 15,63 | 12,50 | 0,015 | 2 | 100 | **200,23** |
| **1.03** | **Hormigón (LER 17 01 01)** | 6,25 | 5,00 | 0,015 | 1 | 100 | **100,09** |
| **1.04** | **Mezclas hormigón (LER 17 01 07)** | 3,13 | 2,50 | 0,015 | 1 | 100 | **100,05** |
| **1.05** | **Mezclas bituminosas (LER 17 03 02)** | 6,25 | 5,00 | 0,015 | 1 | 100 | **100,09** |
| ***PAPEL, CARTÓN, MADERA*** | | | | | | | |
| **1.06** | **Madera (LER 17 02 01)** | 0,0034 | 0,0027 | 0,015 | 1 | 100 | **100,00** |
| **1.07** | **Papel (LER 20 01 01)** | 0,0011 | 0,0009 | 0,015 | | | |
| **1.08** | **Pásticos (LER 17 02 03)** | 0,0112 | 0,0090 | 0,015 | | | |
| | | | | | | ***TOTAL*** | **900,94** |
| **Presupuesto parcial, RESTO DE COSTES DE GESTIÓN.** | | | | | | | |
| **1.09** | **10 % del presupuesto por costes de gestión, alquileres, etc…** | | | | | | **90,09** |
| **TOTAL PRESUPUESTO ESTUDIO GESTIÓN RCDs** | | | | | | | **991,03** |

| PRESUPUESTO SEGURIDAD Y SALUD | | |
|---|---|---|
| **INSTALACIONES DE BIENESTAR** | Cantidad | Importe |
| Maletin botiquin portatil para primeros auxilios | 0 | 5,30 € |
| Reposición Botiquín | 0 | 3,66 € |
| Toalla | 2 | 0,98 € |
| Jabonera industrial 1 litro | 1 | 1,57 € |
| Espejo vestuarios y aseos | 2 | 8,17 € |
| Papel higienico | 6 | 4,90 € |
| Papelera | 2 | 5,23 € |
| Banco de madera para 5 personas | 5 | 39,24 € |
| armario | 1 | 15,70 € |
| Taquillas Individual | 8 | 32,31 € |
| Secamanos Eléctrico | 2 | 11,77 € |
| Percha para Ducha o Aseo | 8 | 6,21 € |
| Alquiler caseta Aseo | 0 | 36,60 € |
| Acometida Eléctrica (Caseta) | 0 | 1,99 € |
| Costo Mensual Limpieza y Desinfeción | 0 | 41,77 € |
| **Total** | | **215,41 €** |
| | | |
| **SEÑALIZACION** | Cantidad | Importe |
| Baliza luminosa | 14 | 13,73 € |
| Señal cuadrada | 4 | 13,08 € |
| Señal circular | 4 | 15,70 € |
| Señal triangolar | 4 | 16,35 € |
| Señalista | 10 | 16,35 € |
| Cono de balizamiento reflectante | 8 | 5,23 € |
| **Total** | | **80,44 €** |
| | | |
| **PROTECCIONES COLECTIVAS** | Cantidad | Importe |
| Vallas de proteccion | 30 | 58,86 € |
| Palastro | 8 | 13,08 € |
| Entibacion | 12 | 15,70 € |
| Extintor polovo seco | 3 | 13,08 € |
| **Total** | | **100,71 €** |
| | | |
| **PROTECCIONES INDIVIDUALES** | Cantidad | Importe |
| Casco de seguridad | 8 | 22,39 € |
| Gafas de seguridad | 3 | 3,49 € |
| Protector auditivo | 3 | 6,28 € |
| Máscara de proteccion respiratoria | 1 | 1,70 € |
| Máscara de proteccion respiratoria | 1 | 1,70 € |
| Equipos de Respiración Artificial (ERA's) | 1 | 19,20 € |
| Guantes | 8 | 4,97 € |
| Botas de seguridad | 8 | 18,24 € |
| Plantillas anticlavos | 3 | 0,70 € |
| Botas de agua | 3 | 6,98 € |
| Cinturón antivibratorio | 3 | 4,89 € |
| Faja de proteccion dorsolumbar | 3 | 7,68 € |
| Impermeable | 8 | 8,29 € |
| Parka 3/4 | 3 | 33,17 € |
| Equipo para trabajos verticales y horizontales | 4 | 15,93 € |
| Mono de trabajo | 8 | 52,24 € |
| Chaleco reflectante | 8 | 12,44 € |
| **Total** | | **220,29 €** |
| | | |
| **FORMACIÓN** | Cantidad | Importe |
| Oficial encargado de Seguridad y Salud | 16 | 73,36 € |
| Curso de formacion de prevencion de | 4 | 39,78 € |
| **Total** | | **113,15 €** |
| | | |
| | **TOTAL** | **730,00 €** |

# PLANOS



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Ana Isabel Gutiérrez Montoya
Autor proyecto

Proyecto:

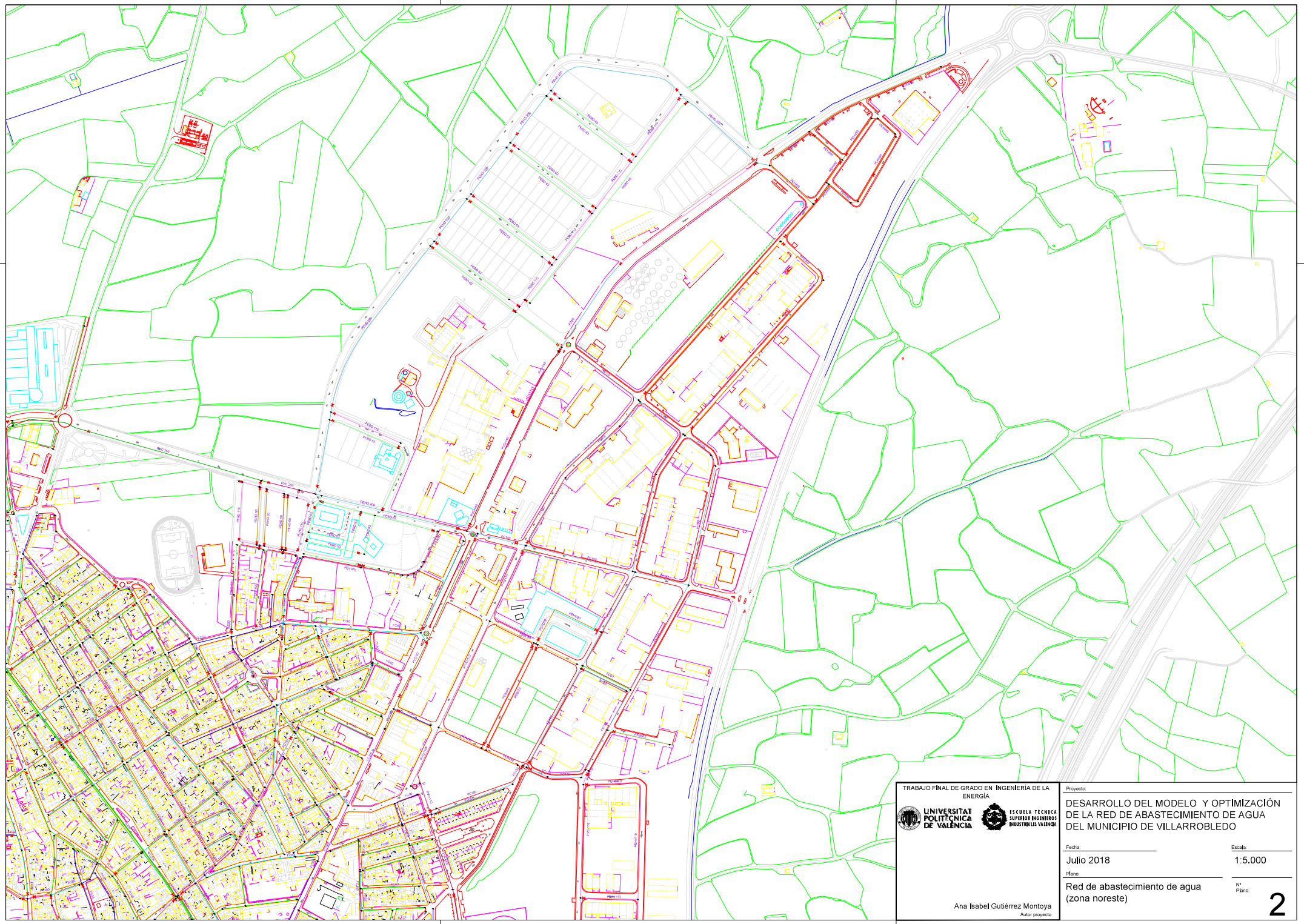
# DESARROLLO DEL MODELO Y OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DEL MUNICIPIO DE VILLARROBLEDO

Fecha: Julio 2018

Escala: 1:5.000

Plano: Red de abastecimiento de agua (zona noroeste)

Nº Plano: 1



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto:

DESARROLLO DEL MODELO Y OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DEL MUNICIPIO DE VILLARROBLEDO

Fecha:

Julio 2018

Escala:

1:5.000

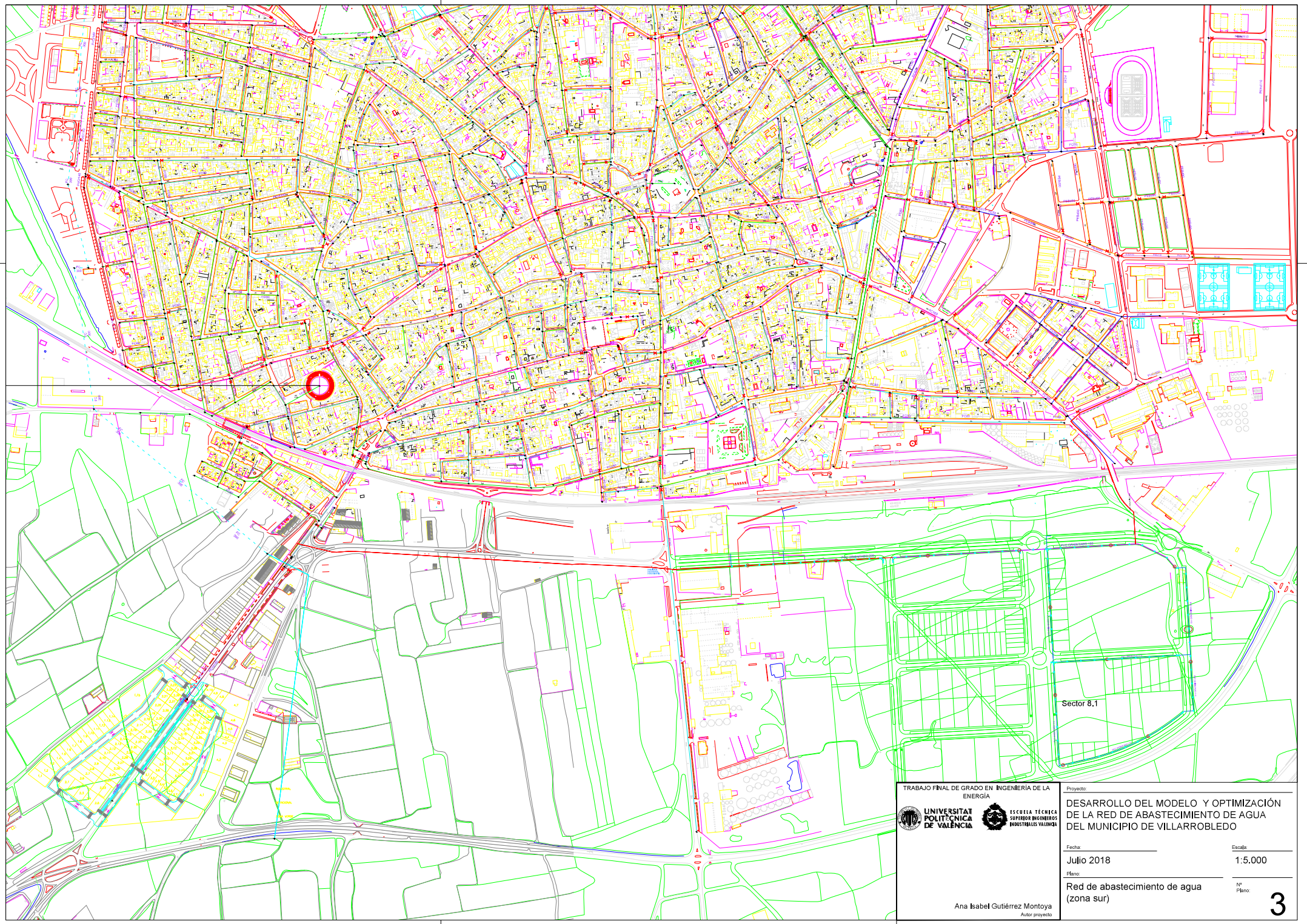
Plano:

Red de abastecimiento de agua (zona noreste)

Nº Plano:

2

Ana Isabel Gutiérrez Montoya
Autor proyecto




TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto:

DESARROLLO DEL MODELO Y OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DEL MUNICIPIO DE VILLARROBLEDO

Fecha:

Julio 2018

Escala:

1:5.000

Plano:

Red de abastecimiento de agua (zona sur)

Nº Plano:

3

Ana Isabel Gutiérrez Montoya

Autor proyecto