

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS Y PROPUESTA DE MEJORAS EN EL SISTEMA DE RIEGO DE LA COMUNIDAD DE REGANTES LA HUERTA Y PARTIDAS DE VILLENNA (ALICANTE)

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

JOSE LUIS FUENTES CATENA

Director:

DRA. ELENA GÓMEZ SELLÉS

Codirector/es:

JOSÉ FRANCISCO PONS AUSINA

SEPTIEMBRE, 2017



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihmma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Análisis y propuesta de mejoras en el sistema de riego de la comunidad de regantes La Huerta y Partidas de Villena (Alicante)

Título del TFM en inglés: Analysis and improvements proposal at the irrigation community La Huerta y Partidas de Villena (Alicante)

Título del TFM en Valenciano: Anàlisi i proposta de millores en la comunitat de regans La Huerta y Partidas de Villena (Alacant)

Alumno: Jose Luis Fuentes Catena.

Director: Dra. Elena Gómez Sellés

Codirector/es:

José Francisco Pons Ausina

Director experimental:

Fecha de Lectura: SEPTIEMBRE, 2017

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es realizar un análisis del funcionamiento actual del sistema de riego de la comunidad de regantes de “La Huerta y Partidas” de Villena (Alicante), evaluando, entre otros, los problemas de presión existentes en la red y planteando soluciones. Para realizar este análisis se parte de los datos de consumo de cada regante y de las características de funcionamiento del sistema, estudiando el comportamiento de los usuarios en el tiempo.

En primer lugar, sobre el modelo existente, se analizarán diferentes cargas de éste, ya que se conocen los valores globales de volúmenes consumidos pero no cómo han sido consumidos en el tiempo, desconociendo por tanto los caudales instantáneos en cada hidrante, y por tanto el caudal circulante por las tuberías. Se analizará la repercusión que tiene en la simulación, y por tanto en el comportamiento del sistema, las diferentes consideraciones de la simultaneidad de los consumos.

Posteriormente, y una vez elegidos los caudales y estado de pérdidas de agua que mejor se ajusten al comportamiento real del sistema, se proponen mejoras desde el punto de vista del consumo energético del sistema. Por un lado se estudiará una posible sectorización de la red, una vez sectorizada, se contempla una

nueva regulación en la estación de bombeo y por último, la viabilidad de una nueva conexión a un trasvase cercano. La realización de este estudio se ha apoyado en el modelo hidráulico de EPANET para la simulación del comportamiento hidráulico, y los datos aportados por la comunidad de regantes.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

L'objectiu d'aquest Treball Fi de Màster és realitzar una anàlisi del funcionament actual del sistema de reg de la comunitat de regants de "L'Horta i Partides" de Villena (Alacant), avaluant, entre uns altres, els problemes de pressió existents en la xarxa i plantejant solucions. Per a realitzar aquesta anàlisi es parteix de les dades de consum de cada regant i de les característiques de funcionament del sistema, estudiant el comportament dels usuaris en el temps.

En primer lloc, sobre el model existent, s'analitzaran diferents càrregues d'aquest, ja que es coneixen els valors globals de volums consumits però no com han sigut consumits en el temps, desconeixent per tant els cabals instantanis en cada hidrant, i per tant el cabal circulat per les canonades. S'analitzarà la repercussió que té en la simulació, i per tant en el comportament del sistema, les diferents consideracions de la simultaneïtat dels consums.

Posteriorment, i una vegada triats els cabals i estat de pèrdues d'aigua que millor s'ajusten al comportament real del sistema, es proposen millores des del punt de vista del consum energètic del sistema. D'una banda s'estudiarà una possible sectorització de la xarxa, una vegada sectoritzada, es contempla una nova regulació en l'estació de bombeig i finalment, la viabilitat d'una nova connexió a un transvasament proper. La realització d'aquest estudi s'ha recolzat en el model hidráulic d'EPANET per a la simulació del comportament hidráulic, i les dades aportades per la comunitat de regants.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

This final master's project aims to perform an analysis of the current functioning of the irrigation system of the irrigators community of "La Huerta y Partidas" of Villena (Alicante), evaluating, among others, the pressure problems in the network and proposing solutions. In order to carry out this analysis, it is based on the consumption data of each irrigator and the operating characteristics of the system, studying the behavior of the users over time.

First, on the existing model, different loads will be analyzed, since the global values of volumes consumed are known, but not how they have been consumed over time, thus ignoring the instantaneous flows in each hydrant, and therefore the flow through the pipes. It will analyze the impact that has on the simulation, and therefore on the behavior of the system, the different considerations of the simultaneity of the consumptions.

Subsequently, and once the flow rates and state of water losses that best fit the actual behavior of the system are chosen, improvements are proposed from the point of view of the system's energy consumption. On the one hand, a possible sectorization of the network will be studied, once sectorized, a new regulation is contemplated in the pumping station and finally, the viability of a new connection to a near transfer. The performance of this study has been supported by the hydraulic model of EPANET for the



simulation of hydraulic behavior, and the data provided by the irrigation community.

Palabras clave español (máximo 5): riego, análisis, modelo hidráulico, sectorización, regulación

Palabras clave valenciano (máximo 5): reg, anàlisi, model hidràulic, sectorització, regulació

Palabras clave inglés (máximo 5): irrigation, analysis, hydraulic model, sectoritation, regulation



Tabla de Contenido

1. Introducción.....	6
1.1. El regadío en España.....	6
1.2. El regadío en Alicante.....	7
1.3. Comunidades de regantes y proyectos de modernización.....	8
1.4. Sobreexplotación de acuíferos.....	11
1.5. La producción de aguas desaladas.....	12
1.6. La reutilización de aguas residuales.....	13
1.7. Eficiencia energética.....	14
1.8. Trasvase Júcar-Vinalopó.....	15
2. Objetivos.....	18
3. Antecedentes.....	19
4. Localización y emplazamiento.....	21
5. Caso de estudio.....	22
5.1. Descripción general.....	22
5.2. Climatología.....	23
5.3. Descripción del funcionamiento de la red.....	24
5.4. Organización del riego.....	25
5.5. Diámetros.....	26
5.6. Materiales.....	26
5.7. Estaciones de bombeo.....	27
5.8. Embalses.....	29
6. Análisis de la demanda.....	30
6.1. Análisis del volumen registrado.....	31
6.2. Características de la demanda.....	32
6.3. Modulación de la demanda.....	35
6.4. Volumen incontrolado.....	37
7. Análisis de la situación actual.....	39
7.1. Velocidades.....	41
7.2. Pérdidas de carga.....	42
7.3. Presiones.....	45



8.	Propuesta de mejoras	47
8.1.	Sectorización.....	47
8.2.	Regulación del bombeo.....	50
8.3.	Trasvase.....	55
8.4.	Riego por turnos.....	59
9.	Análisis de los resultados	74
10.	Conclusiones	77
11.	Referencias y bibliografía	79
	ANEJOS	81
A.	DEMANDA ANUAL Y EN PERIODO ESTIVAL.....	81
B.	CAUDAL DEMANDADO MÁXIMO DIARIO.....	83
C.	PLANO GENERAL DE LA RED	87



Índice de figuras

Figura 1. Distribución del regadío en Alicante	8
Figura 2. Cronología construcción trasvase Júcar - Vinalopó.....	16
Figura 3. Localización de la provincia de Alicante	21
Figura 4. Localización de Villena	21
Figura 5. Situación de la comunidad de regantes.....	21
Figura 6. Red de riego del trabajo	22
Figura 7. descripción de la red	24
Figura 8. Distribución de diámetros en la red	26
Figura 9. Curva característica EB El Rubial.....	27
Figura 10. Curva característica EB Zúñiga.....	28
Figura 11. Demanda promedio 2016	32
Figura 12. Demanda promedio época estival	33
Figura 13. Patrones de demanda	35
Figura 14. Caudal demandado periodo estival	36
Figura 15. Velocidades de la red.....	41
Figura 16. Porcentaje de distribución de velocidad	42
Figura 17. Distribución de la pérdida de carga	43
Figura 18. Pérdidas unitarias de la red.....	43
Figura 19. Pérdidas de carga en tubería L-47	44
Figura 20. Evolución temporal de pérdidas unitarias.....	44
Figura 21. Presiones en el primer momento crítico	45
Figura 22. Presiones en el segundo momento crítico.....	46
Figura 23. Sectorización propuesta	48
Figura 24. Situación crítica 1 con sectorización.....	49
Figura 25. Situación crítica 2 con sectorización.....	49
Figura 26. Estación de bombeo Rubial en funcionamiento	50
Figura 27. Puntos conflictivos de la red con alimentación por bombeo	51
Figura 28. Uso de todo el bombeo disponible en la comunidad de regantes	52
Figura 29. Curvas características estación de bombeo Rubial.....	53
Figura 30. Puesta en marcha del trasvase	55



Figura 31. Puntos de presiones bajas solucionados	55
Figura 32. Bajas presiones abasteciendo con el trasvase.....	56
Figura 33. Uso conjunto bombeo y trasvase a la demanda.....	57
Figura 34. Gráfica de caudal inyectado desde trasvase.....	57
Figura 35. Periodos de facturación (ENDESA, 2017).....	59
Figura 36. Turnos de riego	60
Figura 37. Sectores para riego por turnos	61
Figura 38. Presiones en el sector 1	62
Figura 39. Bajas presiones en el sector 3	63
Figura 40. Arranque de bomba para sector 1	64
Figura 41. Arranque de bomba para sector 3.....	64
Figura 42. Punto de funcionamiento bombeo con Solana	65
Figura 43. Puntos de funcionamiento de la estación de bombeo Rubial.....	67
Figura 44. Punto de funcionamiento estación de bombeo Zúñiga.....	67
Figura 45. Presiones bajas con dos entradas desde el trasvase.....	69
Figura 46. Uso conjunto de bombeo y trasvase	69
Figura 47. Aporte conjunto de caudal desde trasvase y Casa Zúñiga.....	71
Figura 48. Puntos de funcionamiento Rubial con trasvase.....	71
Figura 49. Punto de funcionamiento Zúñiga con trasvase.....	72
Figura 50. Inyección de caudal trasvase	72
Figura 51. Punto de funcionamiento EB Rubial.....	74



Índice de tablas

Tabla 1. Longitudes totales de la red en función del diámetro de la tubería.....	26
Tabla 2. Volúmenes registrados en el año 2016	31
Tabla 3. Calificación de la gestión de una red de abastecimiento	38
Tabla 4. Valores de pérdida de carga recomendados	41
Tabla 6. Uso y coste de bombeo regulado a la demanda	54
Tabla 7. Coste bombeo conjunto con trasvase desde Rubial.....	58
Tabla 8. Demandas de cada sector.....	61
Tabla 9. Bombas en marcha por turno	66
Tabla 10. Bombas en marcha con ajuste de tarifa	66
Tabla 11. Consumo eléctrico bombeo	68
Tabla 12. Coste diario bombeo turnos.....	68
Tabla 13. Consumo eléctrico estación de bombeo Rubial durante turnos de riego..	73
Tabla 14. Coste del abastecimiento con trasvase con turnos de riego.....	73
Tabla 15. Coste bombeo más trasvase con turnos	73
Tabla 16. Tarifas compañía Endesa 2017.....	75
Tabla 17. Coste agua trasvasada.....	76
Tabla 18. Comparativa de costes	76
Tabla 19. Caudales promedio.....	83
Tabla 20. Caudal máximo demandado.....	86



1. Introducción

1.1. El regadío en España

El agua es considerada como el recurso más crítico para el desarrollo sostenible en la mayoría de los países mediterráneos (Keller, 2006). Eso es esencial no sólo para la agricultura, la industria y el crecimiento económico, sino también es el componente más importante del medio ambiente, con un impacto significativo en la salud y la conservación de la naturaleza. En la actualidad, la agricultura de riego, el desarrollo industrial y el cambio climático, son aspectos importantes que hay que tomar en cuenta, por temas como la cantidad y calidad, ya que tienen como base el recurso natural más importante. Debido a los crecientes problemas, el hombre ha comenzado a darse cuenta de que ya no puede seguir una metodología de "uso y descarte" con recursos hídricos o cualquier otro recurso natural. En consecuencia, la necesidad de una política coherente de gestión racional de los recursos hídricos es evidente. El área irrigada global ha aumentado más de seis veces en el último siglo, de aproximadamente 40 millones hectáreas en 1900 a más de 260 millones de hectáreas (Postel, 2003, FAO, 2006). Hoy el 40% de los alimentos del mundo proviene del 18% de las tierras de cultivo irrigadas. Las áreas irrigadas aumentan casi un 1% por año (Jensen, 2007) y la demanda de agua de riego aumentará en un 13,6% para 2025 (Rosegrant y Cai, 2002). Por otro lado, el 8-15% del suministro de agua dulce será desviado de la agricultura para satisfacer la demanda creciente de uso doméstico y de la industria. Además, la eficiencia del riego es muy baja, ya que sólo el 55% del agua es utilizada por el cultivo (Postel, 2003). A superar la escasez de agua para la agricultura es esencial para aumentar la eficiencia del uso del agua y para utilizar aguas marginales (regenerado, salino, drenaje) para el riego.

El regadío español consume alrededor de 24.500 hm³ de agua al año, del orden de dos terceras partes procedentes de aguas superficiales y una tercera parte de aguas subterráneas. Por lo tanto, la presión del regadío sobre los recursos hídricos es elevada, sobre todo en gran parte de la España central y en las zonas mediterráneas.



En España las comunidades de regantes se encargan de la gestión de aproximadamente el 70% de la superficie regable, por lo que tienen una gran repercusión en el consumo energético global del sector agrícola. Según el IDAE, las instalaciones de riego de las comunidades de regantes, se estima que en 2010 consumieron unas 425 ktep, siendo el 80% del consumo correspondiente a energía eléctrica y el 20% a motobombas de gasóleo.

1.2. El regadío en Alicante

Según datos de la ESYRCE 2016 (Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos de 2016) la superficie regada en España en 2016 fue de 3.589.743 hectáreas, que son un 21,1% de las zonas totales de cultivo. A nivel provincial, según ESYRCE 2016 se clasificaron 76.725 hectáreas de la Provincia de Alicante como regadío, un 26,8% de la Comunidad Valenciana. En la figura 1 se puede ver una comparativa entre los cultivos de secano y de regadío de Alicante.

La provincia de Alicante recibe anualmente 426 mm. de precipitación distribuida desigualmente en el espacio y en el tiempo. Los recursos teóricos superficiales y subterráneos renovables se estiman en 590 hm³/año de los que 150 hm³/año corresponden a la escorrentía superficial y 440 hm³/año a la subterránea (Ciclo Hídrico).

El escaso potencial del régimen natural es el origen de los problemas de falta de agua, así como de su baja calidad (procedentes del río Segura) cuando las disponibilidades del recurso deben ser de buena calidad para el desarrollo agrario. Es decir, el incremento de la rentabilidad de las explotaciones agrarias dependerá tanto de la solución a los problemas de escasez natural de agua para riego como de su calidad (Sanchez Rubio, CJ, 2007).

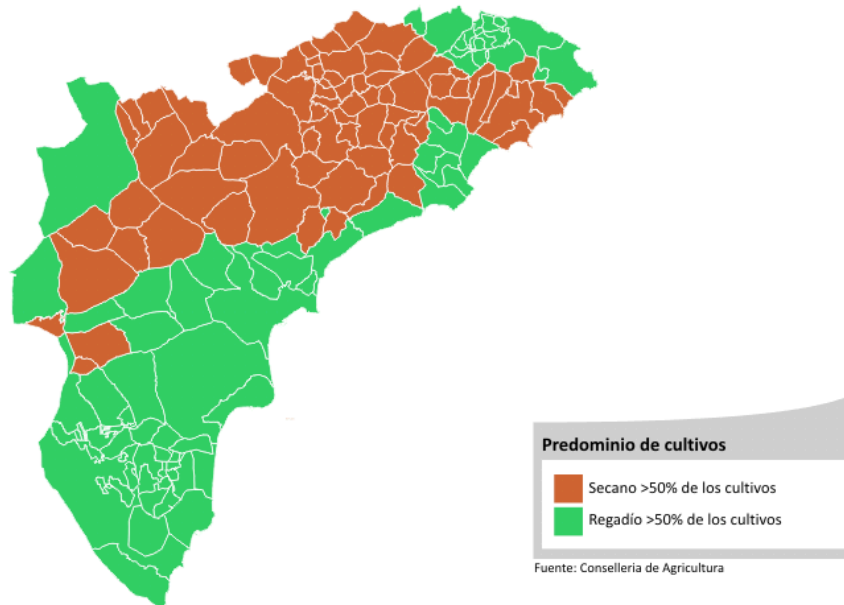


Figura 1. Distribución del regadío en Alicante

Las necesidades de agua de los cultivos varían a lo largo del año, de igual forma que cambian las estaciones del año. Estos cambios influyen en las presiones y caudales a suministrar en los grupos de bombeos de la red, especialmente en los sistemas que operan a la demanda (Lamaddalena y Sagardoy, 2000). Por este motivo, la selección del grupo de bombeo adecuado y su operación son un factor clave para garantizar un uso eficiente del agua en el suministro del agua.

1.3. Comunidades de regantes y proyectos de modernización

Los sistemas de distribución de agua están diseñados para proporcionar un nivel aceptable de suministro (en términos de presión, disponibilidad y calidad del agua) en todo momento bajo unas condiciones de operación. El grado en que el sistema es capaz de lograr esto, en condiciones normales y anormales, se denomina su fiabilidad. Una indicación del sistema.

En principio, la fiabilidad puede calcularse mediante la simulación de estados una matriz de diferentes condiciones de red y configuraciones (Maier et al., 2001). Sin embargo, esto es probable que sea intensivo desde el punto de vista computacional e inviable si las soluciones óptimas del sistema son que se busca. Para superar esta limitación, se han desarrollado varios indicadores que



para representar la fiabilidad todavía no tienen los requisitos computacionales asociados con las técnicas de análisis directo (Baños et al., 2011).

Las Comunidades de Regantes son organismos adscritos a las diferentes confederaciones hidrográficas que gestionan y administran el agua de riego y se encargan de distribuir el agua hasta las parcelas de riego de los distintos usuarios. Además, tienen estatutos y ordenanzas propias por los que se rigen. La gestión de una comunidad de regantes requiere tener conocimiento sobre los distintos elementos del sistema hidráulico de la red.

Con los avances tecnológicos, los modelos hidráulicos suponen un gran progreso en la gestión de redes de distribución de agua. Con los modelos se puede reproducir la complejidad de elementos como tuberías, depósitos, bombas, embalses, etcétera.

Los modelos hidráulicos no sólo son útiles para grandes abastecimientos como pueden ser las redes de agua potable urbanas, sino que son un instrumento de apoyo en las funciones de operación, así como en la toma de decisiones de posibles mejoras de redes más pequeñas. Uno de estos modelos hidráulicos es EPANET, un software para analizar sistemas de distribución de agua. El programa es de dominio público y fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). La versión traducida del software al español ha sido desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia.

En la actualidad, los modelos hidráulicos comienzan a ser motivo de atención para los pequeños gestores. Ya que existe interés por renovar los diferentes elementos de la red, conocer el funcionamiento del sistema o para implementar mejoras.

Tratar de mejorar la eficiencia en el uso del agua los procesos de modernización de los sistemas de riego ha sido una práctica común en los últimos años. Las infraestructuras hidráulicas se han mejorado y los antiguos canales de distribución de redes abiertas han sido sustituidos por las nuevas redes de presión (Plusquellec, 2009).

El proceso de modernización de regadíos consiste en la ejecución de las obras y actuaciones necesarias para mejorar la eficiencia técnica del uso del agua,



reducir el impacto ambiental del regadío y mejorar su productividad económica. La finalidad es el ahorro de agua y el aumento de su productividad económica (MAPA, 2001).

La modernización de las estructuras agrarias incrementó notablemente la capacidad productiva y favoreció una diversificación en la que el clima mediterráneo es fundamental.

Así, entre 1986 y 2009 se produjo un aumento de la superficie regada de unas 700.000 hectáreas, es decir un crecimiento algo superior 20%.

En la última década se han modernizado en España miles de hectáreas, un tercio del total de los regadíos, con una financiación pública del orden del 65% de la inversión.

Los proyectos de modernización de los regadíos que se realizan en Comunidades de Regantes tratan de alcanzar algunas de las siguientes finalidades (Alcon et al, 2008):

- Mejora de la eficiencia del riego y el ahorro del agua.
- Aprovechamiento conjunto y óptimo de recursos hídricos de distintas procedencias.
- Incorporación y/o sustitución de nuevos caudales de agua para riego.
- Gestión integral y optimizada de la explotación de la zona.
- Mantenimiento de las condiciones medioambientales.
- Reducción de costes energéticos.

Uno de esos procesos de modernización que ha realizado la Comunidad de Regantes de “La Huerta y Partidas” es la incorporación de un trasvase a la red. Los trasvases son obras hidráulicas con la finalidad de incrementar la disponibilidad de agua agregando agua de cuencas vecinas o como es este caso, para liberar a los embalses que vierten agua a las parcelas de cultivo. Permitiendo la recuperación de estos para su posterior uso.



1.4. Sobreexplotación de acuíferos

A medida que la población aumenta en número de personas, la demanda de agua crece con el consiguiente aumento de residuos que son capaces a deteriorar la calidad de otras aguas. En las zonas con clima húmedo este aumento de demanda suele repercutir sobre la calidad del agua. En aquellas otras con clima árido o semiárido, el aumento de demanda provoca problemas más graves en la cantidad. En éstas, las condiciones climáticas son favorables a los cultivos de primor, de alta rentabilidad. Debido a ésta alta rentabilidad, la demanda aumenta de forma continuada degenerando frecuentemente en una explotación minera de los acuíferos (PULIDO BOSCH, 1985)

Las precipitaciones registradas en el sureste peninsular son escasas y poco eficaces, ya que muchas veces son de fuerte intensidad y las aguas circulan rápidamente hacia el mar. Además, la insolación y la duración de los períodos de sequía favorecen una elevada evapotranspiración potencial y, por tanto, aridez. Todos estos factores hacen que la garantía del suministro sea un reto en estas tierras, que se encuentran, en gran medida, bajo unas condiciones de escasez estructural. Esta falta de agua permanente ha sido un factor limitante para el crecimiento y el desarrollo económico de la provincia de Alicante.

En consecuencia, la oferta de recursos disponible, además de escasa y limitada, está sujeta a una intensa utilización, lo que ha desencadenado graves problemas de sobreexplotación, degradación y contaminación tanto de las aguas superficiales como de las subterráneas.



1.5. La producción de aguas desaladas

En cuanto a la desalinización, en 2010, la provincia de Alicante disponía de una capacidad de producción instalada de agua desalinizada de unos 85 hm³/año distribuida en 67 plantas construidas a partir de 1990. Por comarcas la que más agua desalinizaba era la de l'Alacantí (con un 38% de la capacidad total de producción) al contar con las desalinizadoras del Canal de Alicante I y II, seguida de la Marina Alta (33%), que cuenta con las desalinizadoras de Jávea, capacidad 27.000 m³/día (10hm³/año) y Denia (9 hm³/año). En 2015 entró en funcionamiento la desalinizadora de Mutxamel-Campello con una capacidad de producción de 50.000 m³/día (28 hm³/año) y la de Torreveija, con una capacidad de producción máxima de 240.000 m³/día (80 hm³/año), la mayor de Europa, de esa potencial producción 40 hm³ son para regadío y 40 para abastecimientos. Los costes de producción de estas plantas por metro cúbico se sitúan en torno a los 0,71 €/m³ y su consumo energético se sitúa en torno a los 4 kWh/m³. Los decretos de sequía de 2015-2016 y 2017 están permitiendo subvencionar el agua desalinizada para los regadíos del trasvase Tajo-Segura, de forma que a los agricultores les cuesta a 0,35 €/m³ puesta en el embalse de La Pedrera.



1.6. La reutilización de aguas residuales

Se conoce que en la provincia de Alicante había un total de 153 EDAR situadas hasta el año 2007, con un caudal total de depuración de 139,33 hm³/año. Como se puede observar en el siguiente mapa (fuente: Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales), la mayoría de las EDAR se encuentran situadas en la comarca de la Marina Alta dando un total de 49 depuradoras, seguida de la Vega Baja con 31 depuradoras y El Comptat con 26 depuradoras. Respecto al caudal tratado, el mayor volumen de depuración se produce en las comarcas de la Vega Baja (38,8 hm³/año) y L'Alacantí (34,2 hm³/año). Respecto a la reutilización, los mayores caudales corresponden a las comarcas de la Vega Baja (16,2 hm³/año), Baix Vinalopó (14,0 hm³/año), la Marina Baixa (9,8 hm³/año) y L'Alacantí (7,3 hm³/año). Es importante enfatizar que en el Baix Vinalopó se reutiliza prácticamente el 100 % del agua depurada.

En el año 2015, el 31% del agua depurada en la Comunitat Valenciana (133 hm³) fue tomada directamente de la planta depuradora con el fin de que fuera re - utilizada, el 28% (122 hm³) se reincorporó a los cauces naturales y el 41% (176 hm³) fue dispersada en el mar. La finalidad principal de la reutilización está centrada en la agricultura, llegando a alcanzar un el 97% del total. Los precios del agua purificada que ha sido previamente regenerada, (incluido el coste de depuración) asciende a un 0,33 €/m³ (0,27 €/m³ del tratamiento secundario y 0,06 €/m³ del tratamiento terciario). Entonces, si se toma en cuenta los valores de la reutilización, el precio del agua regenerada puede llegar a un costo de 0,68 €/m³ (0,27 €/m³ del tratamiento secundario, 0,06 €/m³ del tratamiento terciario, 0,25 €/m³ del tratamiento avanzado y 0,1 €/m³ de la distribución).



1.7. Eficiencia energética

En la actualidad se están dando con mayor frecuencia fenómenos atmosféricos variantes e inusuales, sufriendo así largos periodos de sequía, y es en este punto donde se puede ver la importancia del agua, generando entonces una mayor demanda.

Se conoce que el consumo de energía en el área de la agricultura tiene muy poco consumo comparado a los demás sectores. Sin embargo, dentro del sector de la agricultura, el consumo de energía sí que es significativo, puesto que los trabajos mecanizados por las maquinarias agrícolas y los sistemas de riego, hacen elevar el valor. En este punto, el aumento del regadío frente a la sequía y la modernización de los sistemas de riego, están altamente relacionados a un mayor consumo de agua y de energía. Por lo anterior, se puede estimar que el coste de energía por el funcionamiento de las máquinas y de los equipos de bombero durante el riego puede llegar a suponer para un agricultor alrededor del 30 – 40% de los costes totales del cultivo.

La eficiencia energética mide la capacidad de producción de la energía que es consumida. Las mejoras que se puedan realizar en la eficiencia energética tienen como objetivo mejorar la energía que se está consumiendo, reduciendo el consumo de energía sin necesidad de disminuir la capacidad de producción, es decir, con una menor energía se puede llegar a producir los mismos e incluso prestar más servicios. En el caso de los riegos, se intenta suministrar el mismo volumen de agua, pero consumiendo la menor energía posible, lo que llevaría entonces a asociar un ahorro económico significativo, además de beneficios medioambientales como la reducción de gases emisores del CO₂ y de otros gases que producen el efecto invernadero.



1.8. Trasvase Júcar-Vinalopó

El sistema Vinalopó-Alacantí (provincia de Alicante) es un área que se caracteriza por la escasez de recursos hídricos y por tener un gran desarrollo de aguas subterráneas, específicamente a partir de mediados del siglo XX. Gracias a esta agua, se ha podido permitir el abastecimiento de la gran mayoría de los municipios de la provincia y sobre todo ha logrado ayudar a que la agricultura sea muy avanzada, puesto que es conocida por su eficiencia y su productividad.

Retomando la historia, desde los años 1420, se ha planteado desviar aguas del río Júcar situado en la provincia de Valencia, al río Vinalopó en Alicante, algunos estudios e informes lo aseguran, puesto que se podría afirmar que se trata de uno de los proyectos de trasvase entre los dos ríos con más antigüedad en España.

Con el objetivo de disminuir los problemas de la sobreexplotación de las aguas subterráneas, el plan Hidrológico de la cuenca del Júcar del año 1988 pronosticó la realización de un trasvase desde el Júcar al Vinalopó, ambos dentro de la misma zona Hidrográfica. El trasvase fue aceptado por unanimidad, con el voto favorable de todos los afectados. Posteriormente, fue declarado de interés general por el Estado y sus obras se incluyeron en el Plan Hidrológico Nacional de 2001.



Un proyecto lleno de desavenencias

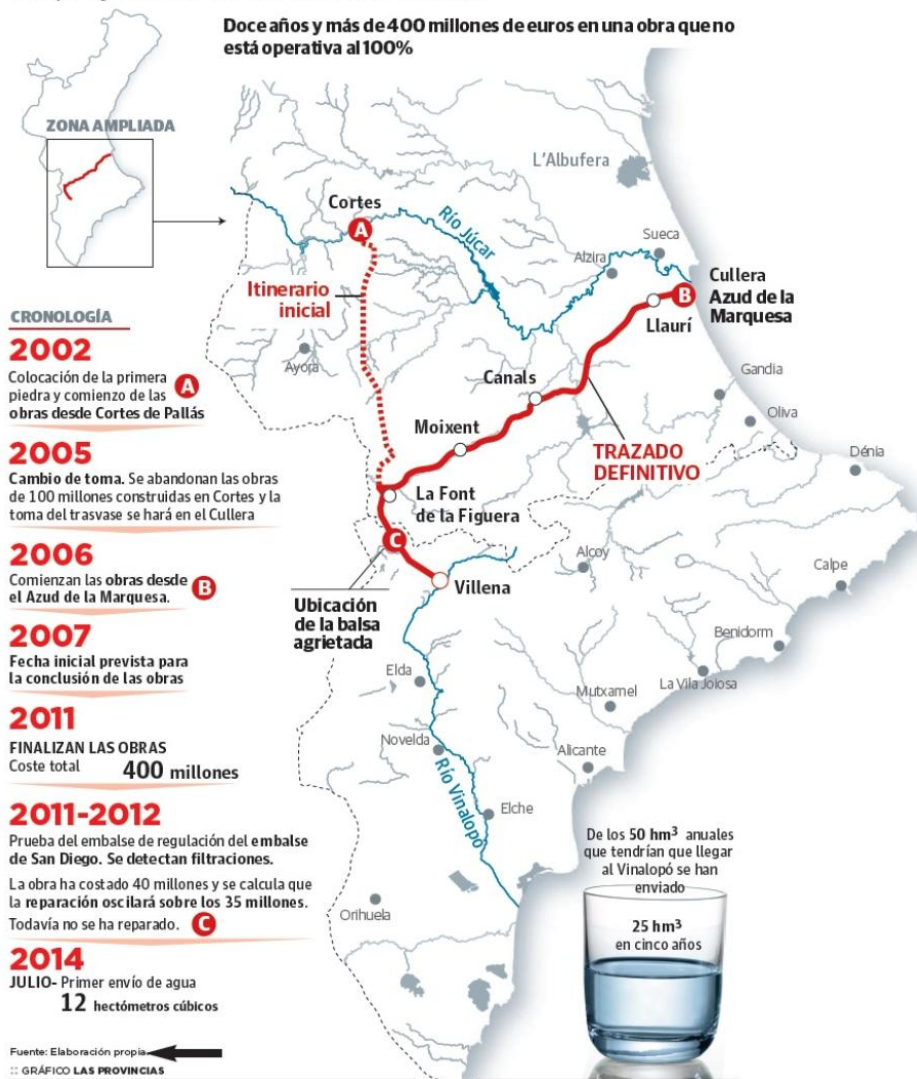


Figura 2. Cronología construcción trasvase Júcar – Vinalopó (Las Provincias, 2017)

En el año 2002, se inició la obra del trasvase, para esto se contó con la declaración de impacto ambiental favorable, dispuso del informe favorable del Banco Europeo de Inversiones y de financiación europea a través de los Fondos FEDER, junto con las aportaciones del Ministerio de Medio Ambiente y, lo mejor de todo el plan, fue que los usuarios también aportaron con un compromiso financiero. El trasvase se encomendó a la sociedad estatal Aguas del Júcar S.A., con la que la Junta Central de Usuarios del Vinalopó, Alacantí y Consorcio de Aguas de la Marina Baja (JCU) consintió un convenio de financiación y explotación de la obra. En el mes de marzo del año 2004, Las Elecciones Generales, pasaron por un cambio de Gobierno y un viraje extraordinario de la política hidráulica seguida hasta el momento por el



Ministerio de Medio Ambiente. Por lo tanto, uno de los efectos que produjo el cambio, fue la modificación fundamental del proyecto de actuación del trasvase Júcar-Vinalopó, pese a que se había ejecutado ya más de 52 % del presupuesto de las obras. En el mes de julio del 2005, el Ministerio de Medio Ambiente, de forma unilateral, transformó absolutamente el proyecto que se llevaba en ejecución, cambiando entonces, el punto de toma y el trazado del trasvase, el cual tenía repercusiones sobre la disponibilidad de caudales, la calidad del agua trasvasada, los costes de construcción y explotación, la financiación tanto de la UE como de los particulares, y en los plazos de ejecución y puesta en servicio de la infraestructura.

El proyecto que superó la evaluación de impacto ambiental en mayo de 2006 tiene una longitud total de 77,670 Km., se inicia 50 m aguas arriba del azud de la Marquesa (Cullera), donde se prevé un caudal en continuo de 2,6 m³/s durante las 24 horas del día, y desde el cual las aguas entran en la cántara de la estación de bombeo del azud de la Marquesa, de 26,8 m de altura de elevación manométrica y 1.149 kW. de potencia total, que funcionaría durante 24 h/día durante 264 días/año, lo que se traduce en un caudal de diseño de la estación de bombeo de 3,5 m³/s. Este caudal es llevado mediante una conducción en 6.873 m de longitud, denominada Impulsión Marquesa-Panser.



2. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo fin de master son:

- Determinar el actual estado de la red perteneciente a la comunidad de regantes de “La Huerta y Partidas” de Villena (Alicante), teniendo en cuenta que funciona bajo riego a la demanda.
- Ajustar el modelo hidráulico de la red a su situación actual, estudiar su funcionamiento, encontrar problemas en su funcionamiento u optimizar su rendimiento. Una vez realizado esto se propondrán soluciones y posibles mejoras como una sectorización de la red, regulación del bombeo o abastecerse del trasvase Júcar-Vinalopó.

Además, la comunidad de regantes ha realizado recientemente una inversión para incorporar a la red un trasvase que suministre agua al sistema y así libere a alguno de los embalses que componen la red. Permitted que recuperen sus niveles. El trasvase que abastece a la red es el Júcar-Vinalopó que viene a cubrir necesidades de riego de las provincias de Alicante y Murcia. El trasvase además de cubrir las necesidades de agua proporcionará alivio a los embalses de la zona. El agua se enviará desde el azud de la Marquesa en Cullera por un precio político de 0.18€ el metro cúbico (el precio real serían 0.30€ sin incorporar la desalación), la tarifa máxima que pueden pagar los usuarios. Para alcanzar los objetivos anteriormente descritos se realizarán las siguientes tareas:

- Analizar los consumos y demandas de la red con los datos facilitados por la comunidad.
- Crear varios escenarios que simulen diferentes periodos de tiempo y tipos de consumo.
- Determinar cuál de estos escenarios es el indicado para simular y analizar su funcionamiento introduciendo previamente el caudal fugado que se determinará previamente.
- Solucionar posibles problemas y proponer mejoras.
- Estudiar el funcionamiento de la red utilizando el trasvase y evaluar su utilización en sustitución de las estaciones de bombeo.



3. Antecedentes

La comunidad de regantes de la Huerta y Partidas, fue creada por el ayuntamiento de Villena alrededor de 100 años atrás. Se creó con el fin de dar una respuesta a la amenaza que se había por parte de la exportación de aguas de las sociedades mercantiles, además de la pérdida de caudales de las diferentes fuentes públicas y de la exigencia de modernizar la canalización que existía en aquella época.

Anteriormente la organización de la huerta era regulada mediante la Alcaldía de Aguas y sus Ordenanzas, las cuales eran aprobadas por SM Felipe V en el año de 1726.

En el año de 1966, se llegaron a una serie de acuerdos realizados por la junta General y la Dirección General de Obras Hidráulicas, después de haber comprobado por parte de la Comisaría de Aguas, que, los manantiales de aguas públicas que dieron lugar a la constitución de la Comunidad, se habían agotado y que habían quedado vestigios de su existencia. A partir de este hecho y considerando que la Comunidad ya no disponía de aguas públicas, se declaró extinguida por orden del Ministro de Obras Públicas en mayo de 1969.

Sin embargo, la comunidad de regantes ignoró la resolución y decidió continuar con su actividad rutinaria aun así sin tener los permisos adecuados de los distintos organismos públicos relacionados con la administración del agua.

La Comunidad de Regantes podía regularizar su situación gracias a la nueva Ley de Aguas en 1985, la cual consideraba públicas todas las aguas continentales (subterráneas o superficiales). Así entonces; pasando inexorablemente por la redacción de unos nuevos Estatutos y la solicitud de la correspondiente Concesión para el aprovechamiento de aguas.

En la fecha 15/12/1998, La Comunidad de Regantes de la Huerta y Partidas de Villena, fue declarada finalmente como constituida, por resolución del Comisario de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Júcar.



Hoy en día, la Comunidad de Regantes cuenta con tres aprovechamientos para abastecer de riego a la Huerta y Partidas de Villena con una superficie de 1,730 Hectáreas

El goteo y la Aspersión son los dos sistemas de riego utilizados actualmente, tras la culminación que se dio en el año 2005.

Es importante que se conozca que la gestión documental y la implementación de telecontrol para el manejo de los diferentes elementos de la red hidráulica, pozos, embalses, valvulería etc., Sin olvidar aspectos como GIS y la modelización de redes para la correcta gestión del recurso.

La última incorporación al proceso de modernización de la Comunidad de Regantes es el trasvase que viene a liberar de su excesivo uso el embalse de Rubial, permitiendo su recuperación hidrológica



4. Localización y emplazamiento

La red de riego del trabajo se localiza en Villena, provincia de Alicante. Concretamente al sur de la localidad donde, además, se encuentran situadas sus oficinas centrales.



Figura 3. Localización de la provincia de Alicante



Figura 4. Localización de Villena

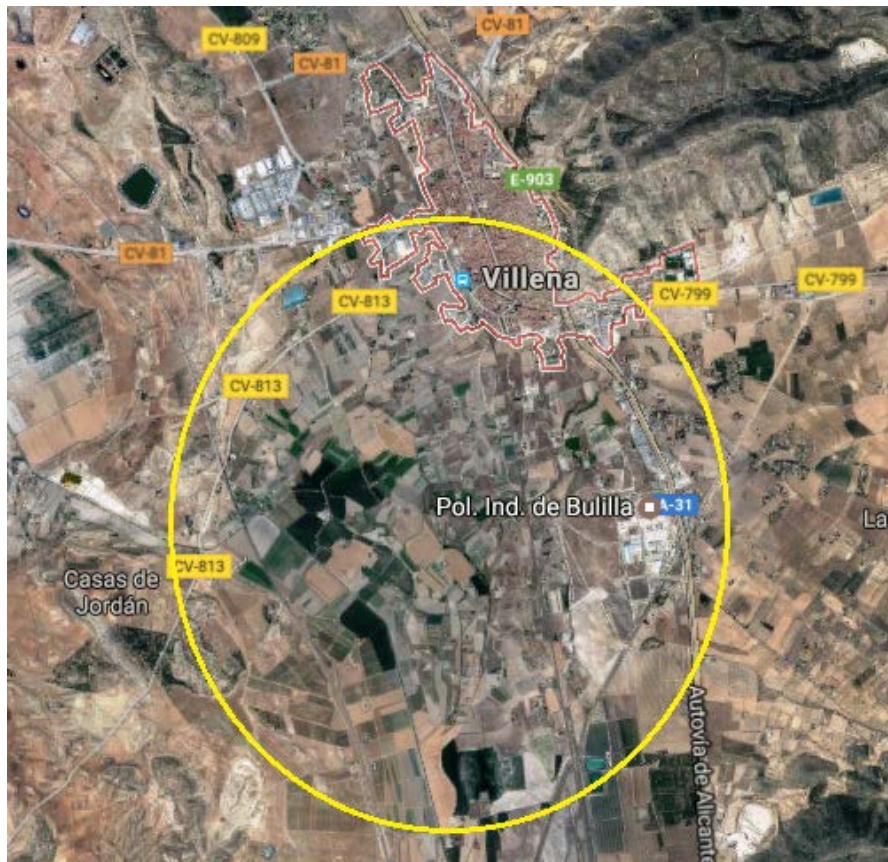


Figura 5. Situación de la comunidad de regantes



5. Caso de estudio

5.1. Descripción general

La Comunidad de Regantes de Huerta y Partidas tiene una superficie de 1,730 Ha, las cuales son regadas mediante aspersión o por goteo. Cuenta con más de 200 usuarios. La infraestructura de la red dispone de una captación de agua superficial, proveniente de los embalses de Rubial, Casa Zúñiga y Solana.

La topografía de la red presenta poco desnivel, teniendo sus cotas más bajas desde los 484 msnm, llegando hasta los 497 msnm. El sistema tiene una extensión de 4,4 km de norte a sur y 3,2 km de este a oeste.

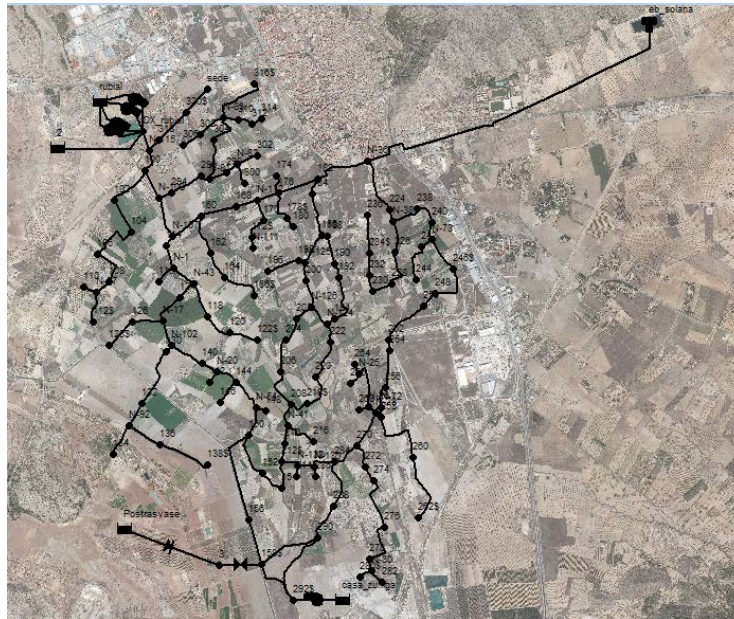


Figura 6. Red de riego del trabajo

A continuación, se enumeran las instalaciones que componen la red de riego:

- 2 estaciones de bombeo: Casa Zúñiga y Rubial.
- 4 puntos de captación.
- 1 centro de control.
- 105 hidrantes.
- 1 trasvase con 2 entradas a la red.



5.2. Climatología

Pese a la cercanía de la costa, las montañas de la zona son un obstáculo para recibir la influencia del mar y su altitud media de 500 metros hace que el clima en ciertas épocas del año sea demasiado drástico.

Villena presenta unas temperaturas extremas que suelen oscilar entre los -3°C y los 35°C . El 17 de enero de 1957 se registraron -24°C , mientras que el 10 de agosto de 2012 se registraron $45,1^{\circ}\text{C}$. Por su parte la temperatura media se sitúa en torno a los 24°C . Térmicamente Villena presenta características de un clima continental de la meseta, que se manifiesta en la existencia de un verdadero invierno, y un verano en el que se constata un aumento de las temperaturas en las horas centrales del día con noches muy refrescantes.

El periodo de máximas lluvias se registra durante los meses de primavera y otoño con cotas muy bajas: entre 350 y 380 mm. El número de días de lluvia en otoño en Villena es, por término medio, de 11, mientras que la primavera se caracteriza por unas precipitaciones de tono más débil o moderado. Las altas temperaturas y la escasez de precipitaciones junto con la irregularidad de éstas, ilustran la aridez de la llanura villenense.



5.3. Descripción del funcionamiento de la red

El funcionamiento del sistema de riego de la Comunidad de Regantes se concentra en las operaciones de arranque y paro de la estación de bombeo del embalse de Rubial o Casa Zúñiga cuando la presión o cantidad de agua proveniente del embalse de Solana sea insuficiente.

El embalse de Rubial se encuentra situado a 502 m de altura y cuenta una estación de bombeo con cuatro bombas en paralelo. Este embalse es el principal apoyo al embalse de Solana.

Al sur de la red se puede ver el embalse de Casa Zúñiga situado a 485 m de altura, cuenta con una bomba para impulsar agua, principalmente a la parte sur de la red.

Por ultimo al oeste se puede observar las dos conexiones al trasvase

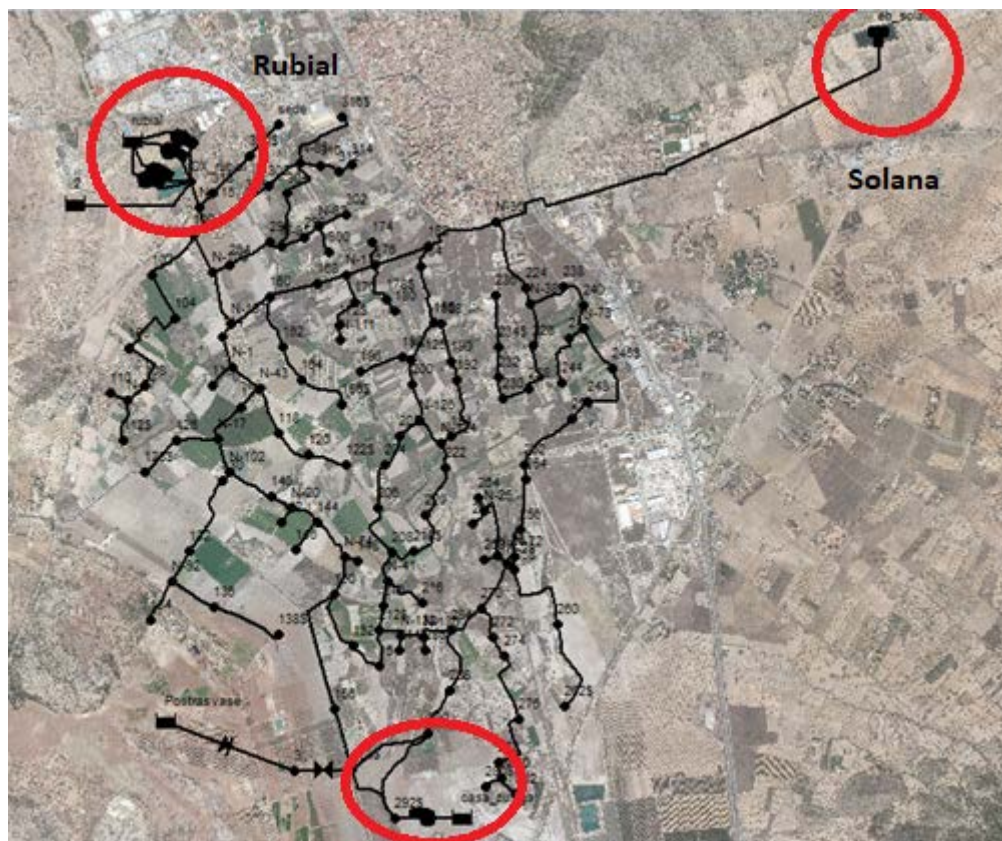


Figura 7. descripción de la red

Se partirá de una situación inicial en la que solo estará en funcionamiento el embalse de Solana para ir introduciendo sistemas de entrada a medida que la red lo requiera.



5.4. Organización del riego

Actualmente, el riego de la Comunidad de Regantes de La Huerta y Partidas está organizado por riego a la demanda. La organización del riego de una red, admite diferentes posibilidades según las restricciones de funcionamiento de los hidrantes (Clemmens, 1987) Hoy por hoy las redes de riego suelen organizarse a la demanda ya que permiten libertad a la hora de regar garantizando el suministro. Por otro lado, las mejoras tecnológicas actuales permiten el uso de sistemas de telecontrol que permiten una fácil implantación del sistema de riego por turnos. La organización por turnos permite una reducción de los caudales de diseño y por tanto un ahorro en el coste de tuberías y de energía. Aun dejando claras las ventajas que pueden suponer el riego por turnos la comunidad de regantes no quiere aplicar este tipo de riego, por lo que seguirán con riego a la demanda. Sin embargo. En el presente trabajo se realizará una propuesta de mejoras basada en el riego por turnos, de manera que el bombeo se concentre en las horas valle o llano de la tarifa eléctrica.



5.5. Diámetros

La red cuenta con longitud total de tuberías de casi 40km de longitud total, cuya distribución de diámetros se refleja en la siguiente tabla.

Diámetro (mm)	Longitud (m)
160	9969.52
200	4782.04
250	8976.02
315	5085.47
400	4059.71
500	6667.13
Total	39539.89

Tabla 1. Longitudes totales de la red en función del diámetro de la tubería

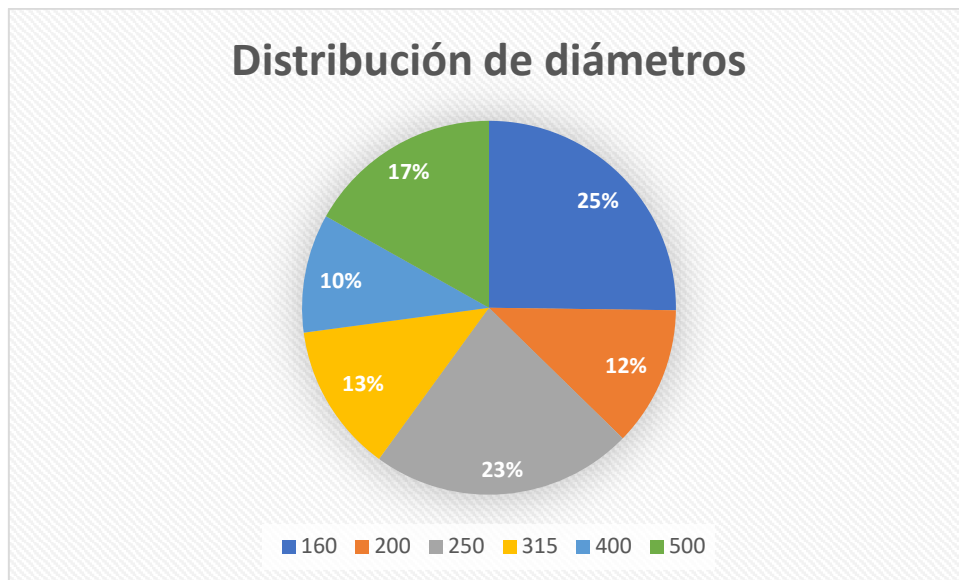


Figura 8. Distribución de diámetros en la red

5.6. Materiales

La red de tuberías de la red está totalmente renovada, teniendo por completo materiales nuevos como el polietileno y el PVC



5.7. Estaciones de bombeo

La comunidad de regantes dispone de dos estaciones de bombeo: la estación de Rubial, situada al norte de la red y que suministra el agua del embalse con el mismo nombre, y la estación de Zúñiga. Se desconocen los modelos reales de las bombas, aunque están disponibles las curvas características de cada una de las bombas.

La estación de Rubial cuenta con cuatro bombas en paralelo con idéntica curva característica.

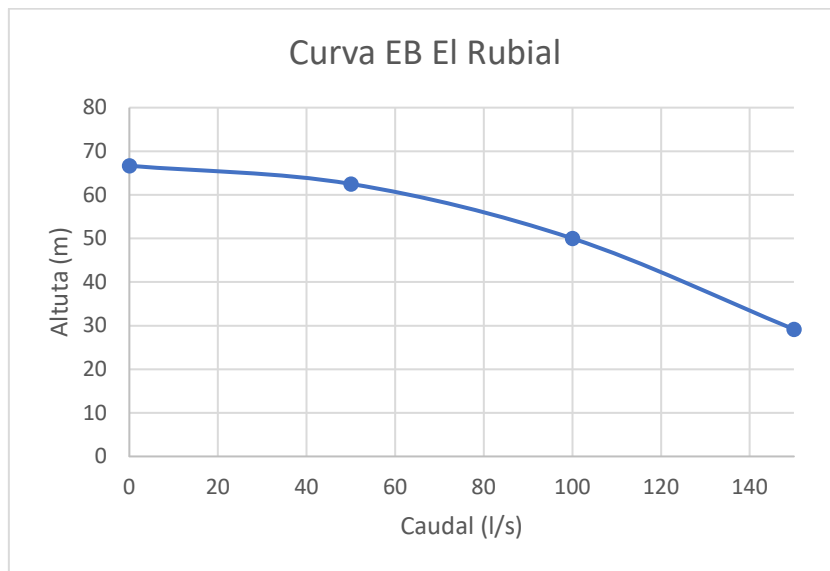


Figura 9. Curva característica EB El Rubial

La estación de bombeo de Zúñiga cuenta con una única bomba cuya curva característica es la siguiente:

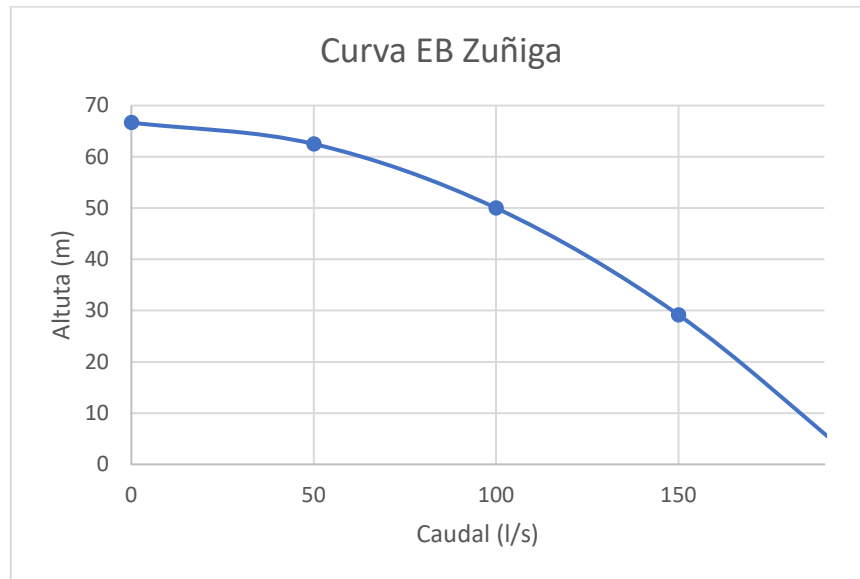


Figura 10. Curva característica EB Zúñiga

Ambas estaciones de bombeo permanecen cerradas en el análisis inicial de la red. Realizando operaciones de arranque y paro según se necesite en las propuestas de mejoras.



5.8. Embalses

La comunidad de regantes cuenta con tres embalses: Solana, Rubial y Casa Zúñiga, situados en el noreste, noroeste y sur de la comunidad de regantes respectivamente.

En el análisis inicial de la red se partirá, al igual que ocurría con las estaciones de bombeo, de la situación de que los embalses de Rubial y Casa Zúñiga no suministran agua a la red.

Sí que lo hace el embalse de Solana que no dispone de estación de bombeo al estar situado a 544 metros de altitud y es la fuente principal de abastecimiento. Sin embargo, los recursos hídricos de Solana están debilitados y se tendrá en cuenta a la hora de realizar las posibles mejoras su cierre pasando a ser alguno de los otros embalses la fuente principal de abastecimiento. También se tendrá en cuenta el aprovechamiento del trasvase, teniendo en cuenta que el uso de este estará limitado por un volumen anual máximo.



6. Análisis de la demanda

Un paso previo a cargar los datos en el modelo hidráulico es realizar un análisis de la demanda, con el cual obtendremos información sobre la variación del consumo a lo largo del año. Con esto se podrá, a posteriori, analizar más exhaustivamente los periodos de mayor consumo y elegir qué casos simularemos en EPANET.

Inicialmente se dispone de los consumos de la red desde 2006 a 2016, siendo 2016 el año con más lecturas por parte de los contadores. Además, algunos hidrantes tienen varios contadores con distintos periodos de facturación. Esto complica más el análisis de la demanda.

Con los datos de consumo que se disponen y para que las fechas de facturación sean lo más homogéneas posibles se analizará el año 2016 pues se disponen de consumos a lo largo del año en casi todos los contadores.

Sin embargo, existe un problema con los datos disponibles ya que los contadores no tienen intervalos de tiempo iguales, por lo que hay que realizar filtrados para homogeneizar los consumos.

Otro problema que aparece es que no se dispone de los volúmenes inyectados y, por tanto, se desconoce el volumen incontrolado del sistema. Esto hace que se tenga que aplicar un rendimiento a la red y suponer un porcentaje de caudal fugado.



6.1. Análisis del volumen registrado

Como se ha mencionado anteriormente para realizar el análisis del volumen registrado se han tenido que realizar diversos filtrados para homogeneizar los periodos de consumo. El análisis inicial se ha realizado para el año 2016, puesto es el año del que se dispone más información y además es el más reciente.

Enero- Febrero	Marzo- Abril	Mayo- Junio	Julio- Agosto	Septiembre- Octubre	Noviembre- Diciembre
146,301m ³	421.595 m ³	734.653 m ³	1.192.899 m ³	447.333 m ³	101.713 m ³
TOTAL					3.044.494m³

Tabla 2. Volúmenes registrados en el año 2016

Como se puede observar en la tabla, la época estival es la de mayor consumo en la red, mientras que el periodo no estival tiene unos consumos muy bajos en prácticamente todos los hidrantes. Esto es debido a las bajas precipitaciones y altas temperaturas de la zona durante el verano. Esto provoca que existan más necesidades de riego durante la época estival



6.2. Características de la demanda

Para calcular las demandas de cada hidrante se han generado distintos escenarios con los que se obtienen diferentes demandas que son introducidas en el modelo hidráulico para simular la red.

El primer escenario que se aborda es el del periodo anual completo, con este intervalo de tiempo se halla el valor promedio diario de cada hidrante. Para poder realizar esta tarea se ha tenido que hacer, al igual que para los volúmenes, diversos filtrados y ajustes para poder comparar cada hidrante en el mismo periodo de tiempo. Durante este tiempo la red tiene un promedio diario de **22 l/s**. En el ANEXO 2 se detallan las demandas de cada hidrante El siguiente gráfico muestra la distribución de la demanda a lo largo de todo el año. Para realizarlo se ha medido de forma bimensual, ya que es el periodo de facturación en el que más contadores coincidían.

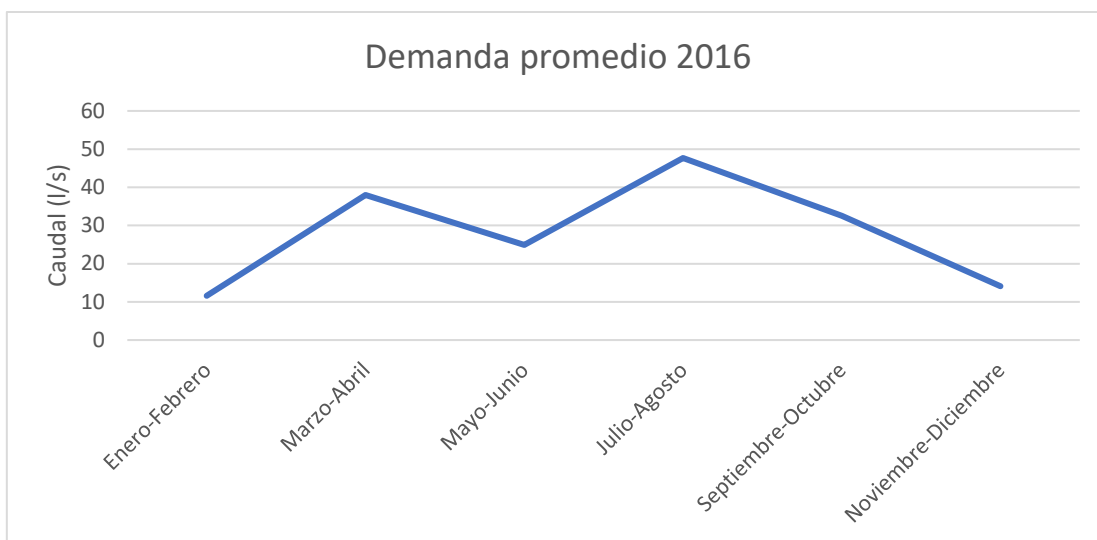


Figura 11. Demanda promedio 2016

Como se puede observar en el anterior gráfico la demanda en la comunidad de regantes asciende de forma progresiva de enero a agosto, con valle en los meses de mayo y junio y descendiendo de forma continuada hasta final de año.



El segundo escenario a estudiar es el periodo estival, que comprende los meses de junio a septiembre. En este intervalo de tiempo existe una demanda mucho mayor que en el resto del año casi alcanzando el doble que el valor promedio anual, obteniendo un valor de **41,81 l/s**. En el ANEJO 1 se puede ver las demandas de cada hidrante para este escenario.



Figura 12. Demanda promedio época estival

En este caso se ha hecho de modo mensual para detallar el escenario de mayor consumo de la red. Como se puede ver en el gráfico, el mayor consumo se realiza en el mes de agosto, llegando a doblar el consumo del mes de julio que ya era alto. Esto hace ver las altas necesidades hídricas de la red durante ese mes. El último escenario que se estudia es el de la situación más desfavorable posible, utilizando los valores máximos de cada hidrante independientemente de la fecha en la que se haya producido este consumo. En el ANEJO 2 se puede ver la tabla con los valores máximos de cada hidrante.

Una vez obtenidas las demandas de cada escenario se introducen en el modelo para observar el comportamiento de la red. El objetivo es elegir el escenario idóneo donde poder encontrar problemas y solucionarlos. Para realizar una simulación realista se crean diferentes patrones de demanda repartidos al azar a semejanza del riego a la demanda que utilizan los usuarios de la red.

En el modelo existen cinco patrones de demanda diferentes que riegan entre 3 y 6 horas cada uno, estando la red regando durante 11 horas en total.



Los horarios de riego de cada patrón se han elegido de forma que se pueda controlar la simultaneidad en el riego, que es uno de los factores que más varían el comportamiento de la red.

Como se puede ver en los anejos existe un número reducido de hidrantes con un consumo muy elevado, lo que supone un problema a la hora de situarlos en un horario o en otro. Estos hidrantes son los que condicionan la simultaneidad del sistema.

Comenzando por el tercer escenario, el de valores máximos, se observa que el consumo es excesivo, y que la red entra en fallo con presiones negativas durante toda la simulación. Esto se debe a que se ha supuesto una simultaneidad excesiva para este periodo en el que las demandas pico son las más elevadas. Se descarta, por tanto, analizar este escenario por ser excesivamente desfavorable, ya que se han supuesto los caudales máximos unitarios y además la máxima simultaneidad de éstos.

El siguiente escenario simulado es el anual. En este caso ocurre todo lo contrario, el sistema funciona correctamente con un solo embalse durante toda la simulación. Este escenario no resulta útil para proponer soluciones o mejoras al sistema.

Finalmente, el escenario dos que abarca de junio a septiembre es el elegido por resultar tener unos consumos lo suficientemente altos que simulen la situación actual de la red. En el cual se pueden analizar algunas mejoras con el fin de mejorar la calidad de la red. Así como comprobar el funcionamiento del trasvase recientemente incorporado a la comunidad de regantes.



6.3. Modulación de la demanda

Debido a la falta de medición en los puntos de consumo y a que el riego es a la demanda, no se sabe con certeza la modulación del consumo. Aunque sí que sabe que existen problemas de presión en diversos puntos de la red y esa será la guía a la hora de elegir uno u otro patrón de demanda.

Para evitar problemas con la simultaneidad se aplican diferentes patrones de demanda hasta encontrar el idóneo que represente en mejor medida la situación actual del sistema.

Para realizar esto se ha variado de forma iterativa la proporción de usuarios que en un determinado momento se encuentran regando hasta que se llega a la situación fijada, aquella que presenta problemas de presión concretos en algunas zonas, pero que permite el funcionamiento del conjunto. Para cada una de las iteraciones se adjudica un patrón de demanda aleatorio que simule un riego a la demanda, este patrón indica a cada hidrante cuando riega y cuando no.

El fallo y por tanto el punto que buscamos ocurre cuando coinciden al mismo tiempo tres de los cinco patrones creados originalmente. Más grave es aun cuando en ese periodo de tiempo está regando alguno de los grandes consumidores de la red, que como se puede ver en la situación actual de la red son los que acentúan las bajas presiones del sistema.

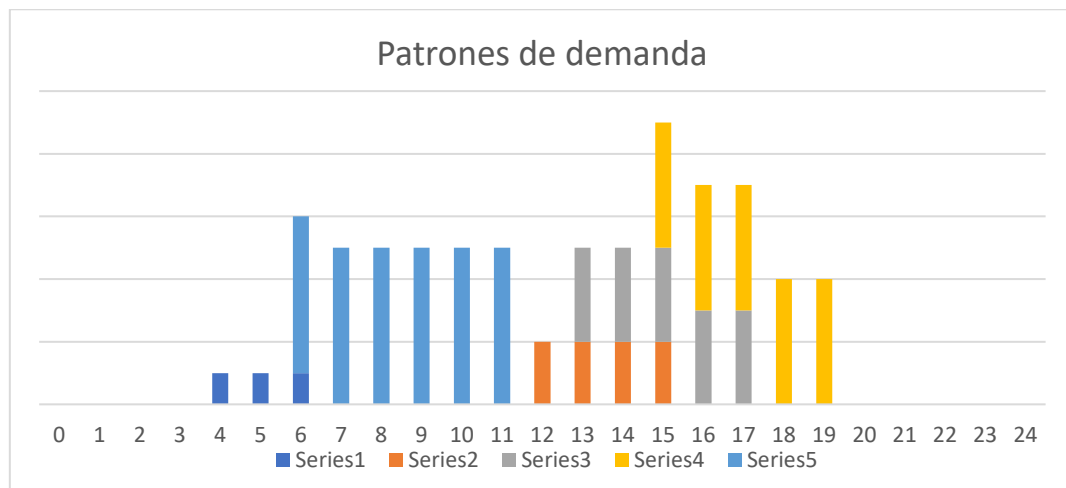


Figura 13. Patrones de demanda



Si más del 62% de los hidrantes riegan de forma simultánea es cuando se produce el fallo y colapsa la red, es decir, que el caudal inyectado sea superior a 550 l/s. Con valores inferiores se producen bajas presiones en algunos puntos, pero el sistema puede funcionar.

Esto sería algo que se podría solucionar más fácilmente con un riego por turnos, pero los usuarios quieren seguir como hasta ahora con un riego por demanda. Esto es algo que puede ocurrir en la realidad, ya que con facilidad más de la mitad de los usuarios pueden llegar a regar a la misma hora

Una vez seleccionado el escenario 2 se crean patrones de consumo con un intervalo de riego de entre tres y seis horas que se reparten de forma aleatoria a los hidrantes, de esta forma se simula el riego a la demanda. Para ajustar la demanda se han repartido el riego a lo largo del día buscando puntos de simultaneidad que representen el funcionamiento real de la red.

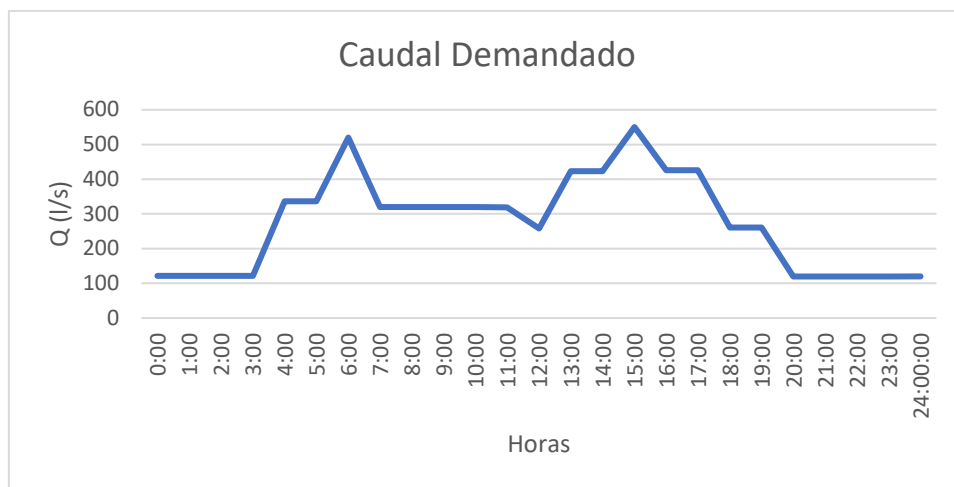


Figura 14. Caudal demandado periodo estival

Conocer todo esto es posible gracias a herramientas como EPANET (Rossman, 1997), que permiten el análisis de la respuesta de la red en diferentes condiciones de servicio.



6.4. Volumen incontrolado

En estas últimas décadas, una de las principales preocupaciones más importantes, han sido la minimización de las pérdidas de agua, que frecuentan valores de 30% o incluso 40% de toda el agua que abastece a los sistemas de consumo. Hoy en día, el problema de las pérdidas de agua y su control en los sistemas de distribución de agua asumir cada vez más importancia en la tendencia actual a privilegiar la sostenibilidad de los consumos y la protección del medio ambiente. Es un tema de considerables medios de comunicación y visibilidad política, principalmente cuando se producen períodos de escasez de los recursos hídricos o cuando el suministro de agua no es suficiente en zonas con crecimiento.

Con el fin de garantizar un rendimiento técnico adecuado, se requiere una evaluación del sistema, que incluye diferentes escenarios mediante condiciones para diferentes restricciones de cada componente. De esta manera, sólo el análisis integrado basado en instrumentos de apoyo sobre el comportamiento del sistema, será capaz de responder a los requisitos necesarios para alcanzar el máximo eficiencia en términos de control de presión.

En muchos estudios de sistemas de abastecimiento, se utiliza el rendimiento volumétrico o rendimiento global para calificar la gestión de un abastecimiento. El rendimiento global del sistema es el cociente entre el volumen registrado y el inyectado.

$$\eta_s = \frac{Q_r}{Q}$$



A partir del valor del rendimiento global porcentual de un abastecimiento, su gestión podría ser clasificada como sigue (Cabrera et al, 1999):

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

Tabla 3. Calificación de la gestión de una red de abastecimiento

En el caso de la red de este TFM no se dispone de los volúmenes inyectados, por lo que resulta imposible conocer el rendimiento real del sistema.

La opción que se ha optado es asignar un rendimiento teniendo en cuenta la antigüedad de la red.

El valor asignado será de 85%, lo que hace que el rendimiento global de la red sea muy bueno y que puede ser un valor cercano al real de la red. De esta forma se pueden añadir las fugas al modelo hidráulico y simular de un modo más realista.

Una fuga es una salida de agua no controlada en cualquiera de los componentes del sistema de distribución de agua; con mayor frecuencia ocurren en uniones de tuberías, codos, roturas de conductos y válvulas.

Debido a que los materiales de la red son nuevos, pero no se puede evitar que existan fugas, sobre todo como se comenta anteriormente en uniones de tuberías, se asigna el valor de 85%. El 15% del volumen incontrolado se supondrá que es todo fugas, por tanto, no se consideran errores en la medición o robos.



7. Análisis de la situación actual

A partir del modelo matemático de la red se puede analizar el comportamiento de la red en su estado actual.

Habiendo estudiado los distintos escenarios de la red se realizará un análisis en época estival, ya que es una situación desfavorable para la red. Teniendo calculadas las demandas de cada hidrante y antes de estudiar el comportamiento de la red se añade el volumen incontrolado.

Este volumen incontrolado, se calcula y añade a la red con el software ITAfugas que facilita la inclusión a cada nudo de los coeficientes emisores que añaden fugas al sistema.

Un emisor es un equivalente a una descarga a un depósito cuyo nivel es el mismo que la cota del nudo. Para que los emisores puedan representar a las fugas, es necesario:

- Definir e implementar los criterios para su distribución espacial
- Calibrar el emisor de cada nudo

Estos emisores tienen la finalidad de tener en cuenta la sensibilidad de las fugas a la variación de la presión. Las fugas deben ser tratadas como una demanda dependiente de la presión.

Se utiliza este método porque según Wu et al (2011) es incorrecto asumir que el coeficiente de descarga de un orificio es constante para una fuga, y considera más adecuado afirmar que su valor depende del número de Reynolds

Una vez añadidos se procede a la simulación y se observan errores por presiones negativas en parte del sistema y presiones muy bajas incluso cuando el hidrante no está funcionando. Esto es debido a que los coeficientes emisores que facilita el problema y son erróneos por lo que se corrigen manualmente hasta que el rendimiento de la red alcance el 85% que previamente se había planteado



Habiendo solucionado este problema y comprobado el caudal inyectado y consumido se estudia el comportamiento hidráulico de la red con respecto a los siguientes parámetros:

- **Velocidades**

La velocidad de circulación depende del caudal y del diámetro de la tubería. Para un mismo caudal, mayores diámetros implican menores pérdidas de carga. Los valores recomendados se sitúan entre 0.5 y 2 m/s.

Velocidades bajas implica:

- Infrautilización de la tubería
- Aumento de deposición de materias en suspensión

Velocidades altas implica:

- Mayores pérdidas por fricción
- Ruidos y vibraciones
- Si se producen transitorios, las sobrepresiones pueden provocar roturas.

- **Pérdidas de carga**

La pérdida de carga está en función de la viscosidad del agua y del rozamiento de esta contra las paredes internas de las tuberías.

Las pérdidas de carga se calculan mediante la fórmula de Darcy

$$j = \frac{8f}{\pi^2 g D^5} Q^2$$

Dónde:

- J: pérdida de carga (m/m)
- f: coeficiente de fricción (Colebrook-White)
- D: diámetro interno de la tubería (m)
- Q: caudal (m³/s)
- g: aceleración de la gravedad (m/s²)



Según la norma UNE-EN 805, no es recomendable sobrepasar los siguientes valores de pérdida de carga según el diámetro de la tubería:

Diámetro (mm)	60	80	100	150	200	300	400
J Max (m/Km)	6.8	4.8	4.1	3.3	2.85	2.4	2.1

Tabla 4. Valores de pérdida de carga recomendados

- **Presiones**

En los hidrantes se debe asegurar una presión mínima necesaria para realizar las labores de riego. En esta red tomaremos como valor mínimo 30 mca.

7.1. Velocidades

Analizando las velocidades en la red durante todo el día de simulación se observa que la velocidad de circulación en las tuberías principales es buena con valores adecuados durante todo el día.

Por otro lado, en las tuberías secundarias que quedan en el exterior de la red estas velocidades son bajas casi en todo momento de la simulación, con valores inferiores a 0.5 m/s.

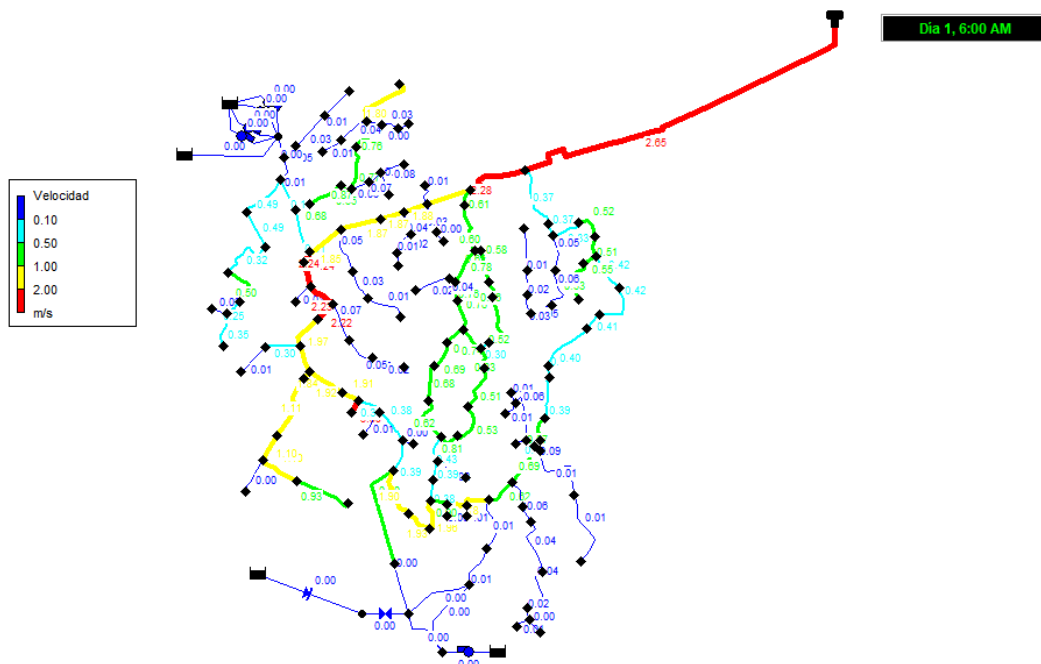


Figura 15. Velocidades de la red



En las conducciones secundarias el agua circula a velocidades normales, aunque cabe destacar a la tubería L-47 la cual conecta con en hidrante 316, que es uno de los que tiene mayor consumo de toda la red. Esta tubería tiene unas velocidades por encima de los 2m/s en el momento que el hidrante antes mencionado se pone en marcha.

En el siguiente gráfico se puede observar que mas de la mitad de la red se encuentra entre las velocidades recomendadas, salvo como anteriormente se ha descrito, las tuberías secundarias y también la tubería principal, en este caso por tener una velocidad muy alta.

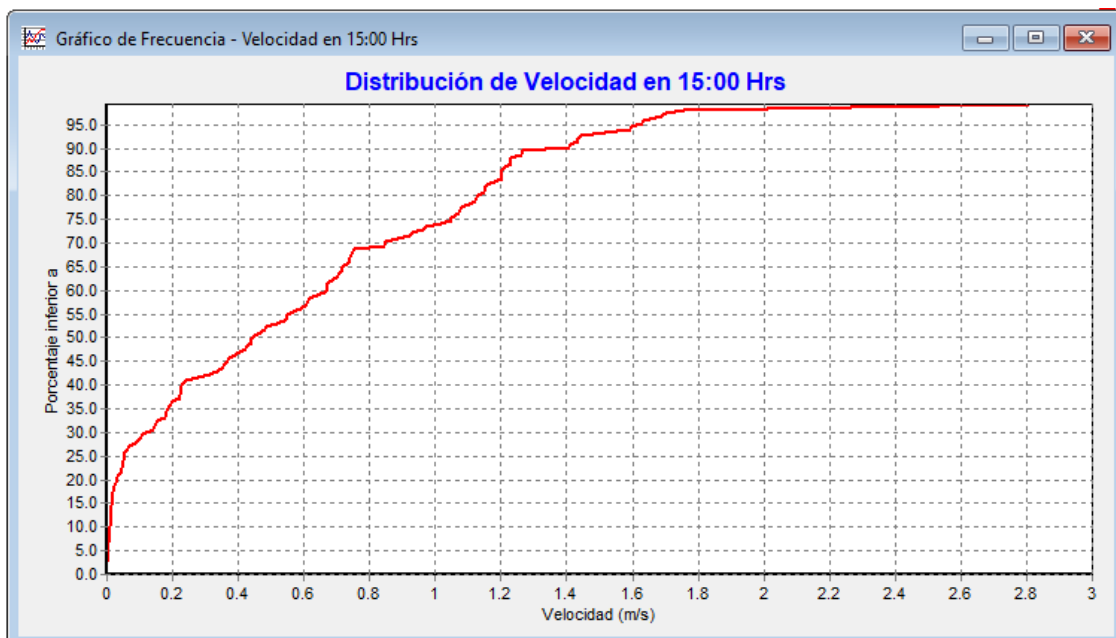


Figura 16. Porcentaje de distribución de velocidad

7.2. Pérdidas de carga

Si las pérdidas de carga son altas, pueden existir problemas en las tuberías, por pérdida de energía principalmente, aunque, también por ruidos, vibraciones e incluso por transitorios que pueden causar desperfectos.

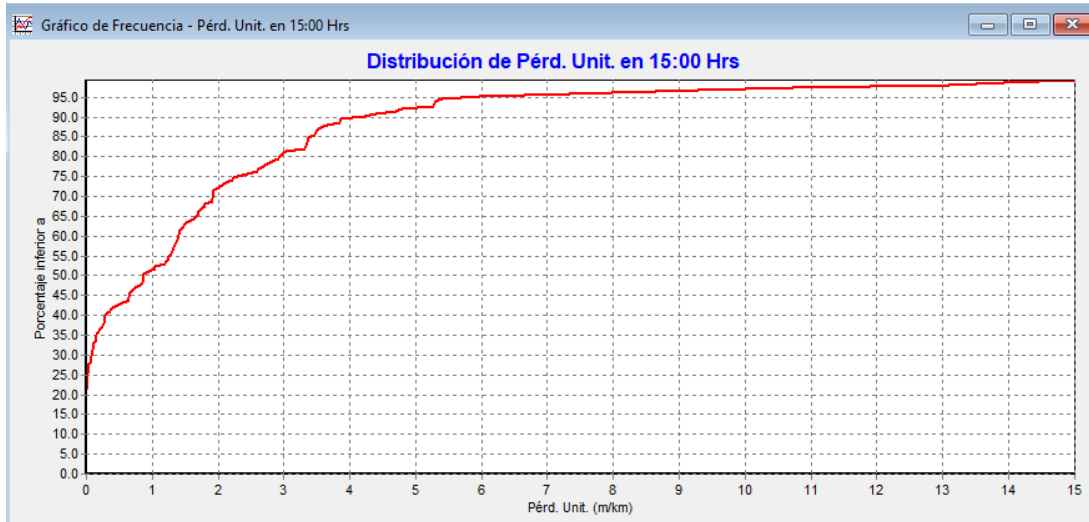


Figura 17. Distribución de la pérdida de carga

Tal y como se puede observar en el gráfico anterior aproximadamente un 90% de las conducciones presentan una pérdida unitaria inferior al 5 m/km. Aunque sí que existen algunos tramos que pueden presentar problemas, como, por ejemplo, la tubería principal que conecta la red con el embalse de Rubial. Al igual que ocurre con la velocidad esto es debido a que la tubería principal suministra todo el caudal de la red en una situación desfavorable como es el periodo estival.

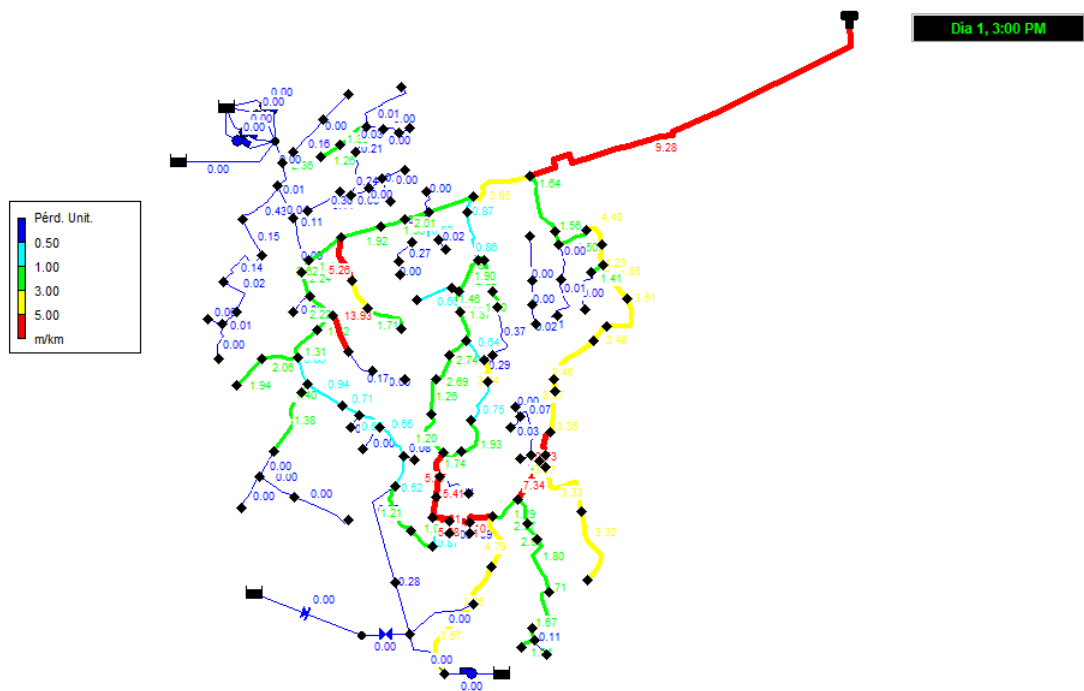


Figura 18. Pérdidas unitarias de la red



La tubería L-47 tiene una pérdida de carga muy alta durante la duración del riego del hidrante 316, llegando a alcanzar un valor de 15.92 m/km. Esta conexión puede ocasionar daños a la red por lo que hay que tener especial atención a la hora de adoptar mejoras en el sistema pudiendo llegar incluso a sustituirla por otra de mayor diámetro.

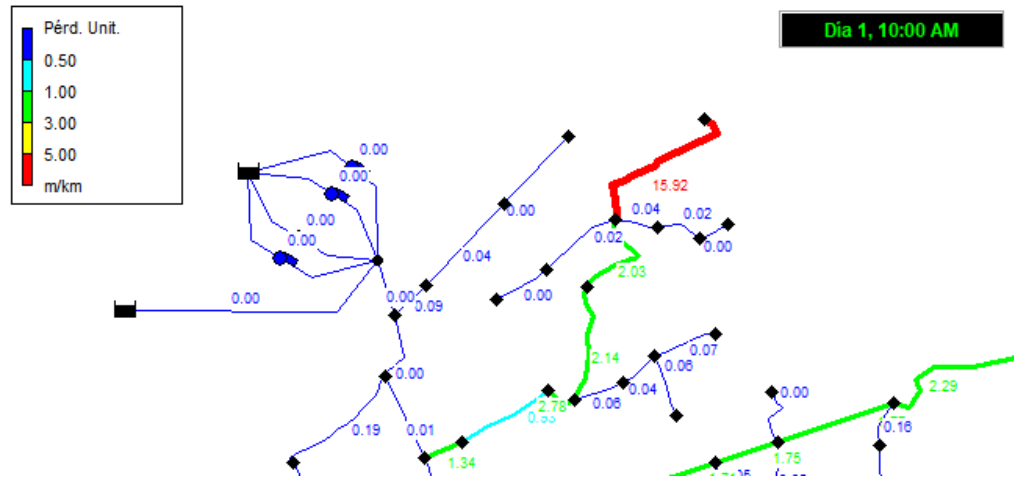


Figura 19. Pérdidas de carga en tubería L-47

En el siguiente gráfico se puede apreciar la evolución temporal en las pérdidas de carga de algunas de las conexiones que presentan problemas por altos valores de pérdidas.

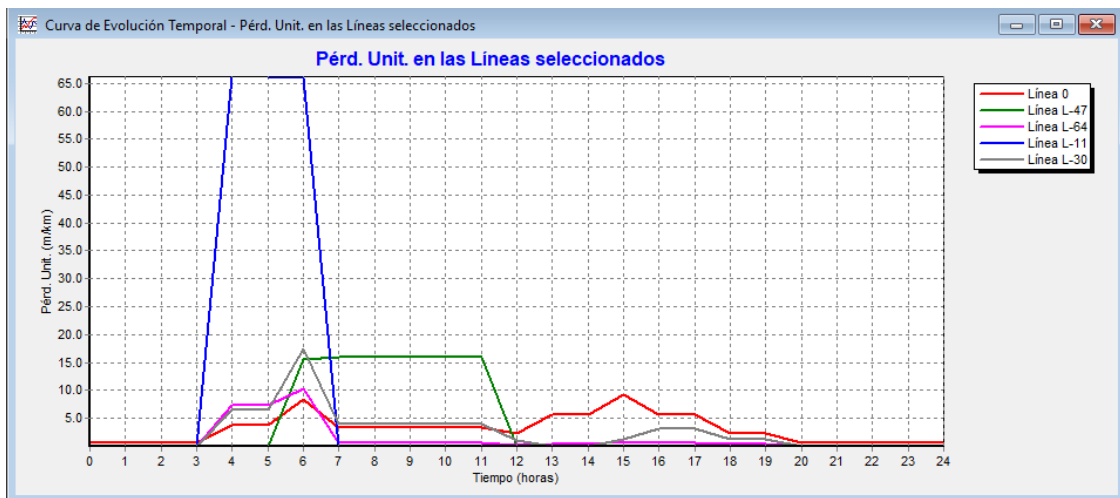


Figura 20. Evolución temporal de pérdidas unitarias



7.3. Presiones

Realizando un estudio de presiones mínimas en la hora máxima de consumo se observan problemas en dos momentos de la simulación.

A las 6 AM casi la mitad de la red se encuentra con presiones inferiores a 30 mca, además, existen algunos hidrantes que disponen de unas presiones inferiores a 20 mca. Esos hidrantes tienen unas demandas muy altas en comparación al resto de los hidrantes y uno de ellos es el hidrante que conecta con la tubería L-47 que ya tiene problemas por altas pérdidas de carga.

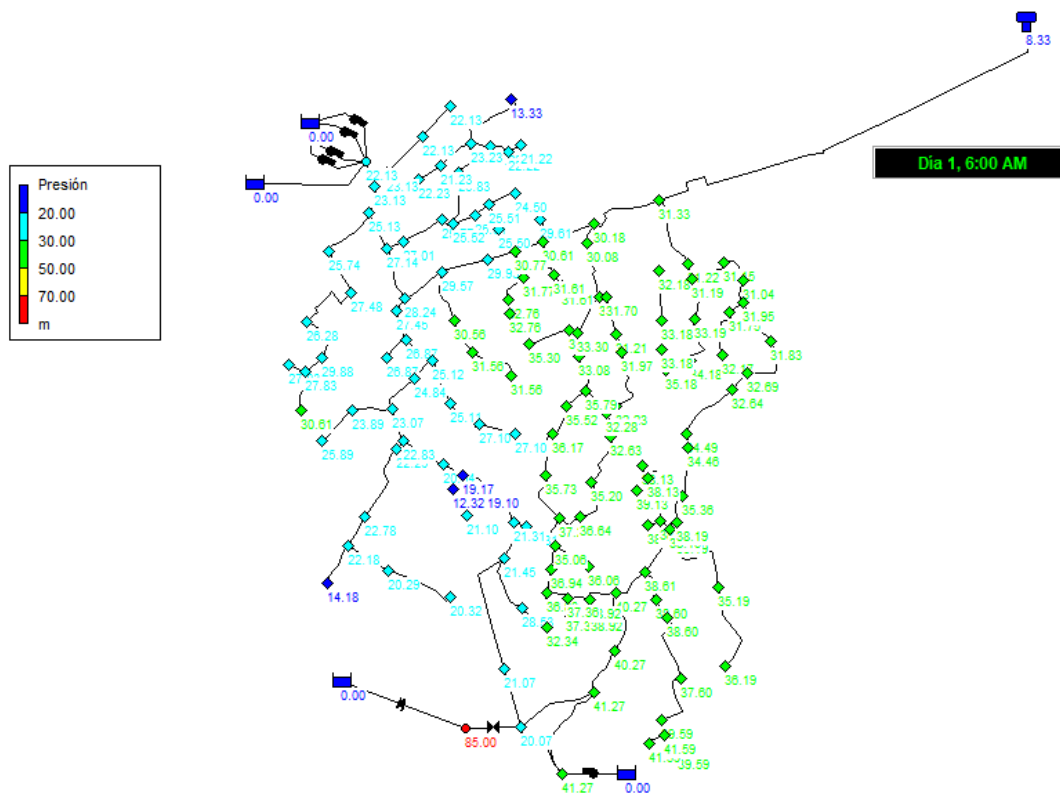


Figura 21. Presiones en el primer momento crítico

Otro momento de estrés para la red es a las 3 PM. Este sería, seguido de cerca por el anterior momento descrito, el momento en el que el consumo es mayor, por lo que existen numerosos puntos de consumo con presiones por debajo de 30 mca.



En este caso, a diferencia del anterior, solo se cuenta con dos hidrantes con presiones inferiores a 20 mca

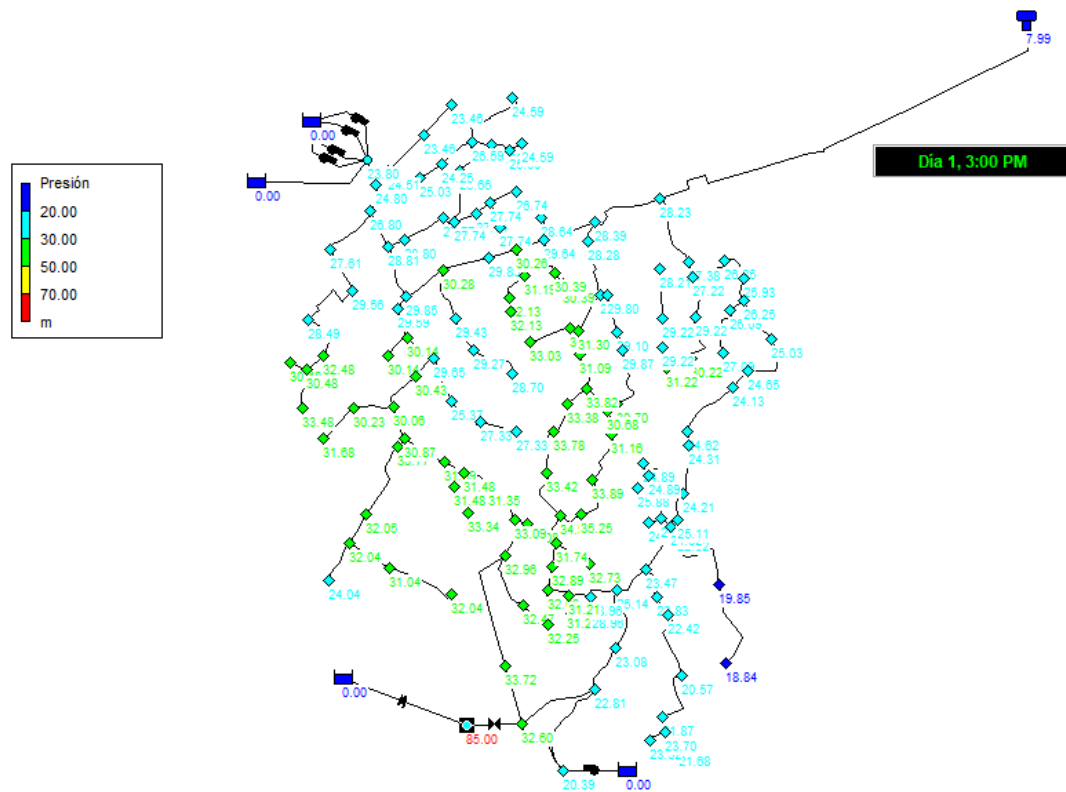


Figura 22. Presiones en el segundo momento crítico



8. Propuesta de mejoras

Para mejorar la red de riego se deben realizar actuaciones que aumenten la eficiencia hidráulica y energética.

Entre las distintas mejoras que se pueden aplicar a la red nos centraremos en las siguientes:

- Sectorización de la red
- Regulación del bombeo en los embalses de Rubial y Casa Zúñiga
- Puesta en marcha del postravase

8.1. Sectorización

La sectorización es un buen sistema para controlar el agua y una buena herramienta para controlar y localizar caudal fugado. Este método consiste en dividir la red en sectores de menor tamaño en los que se controla el caudal entrante a cada sector.

Para realizar la sectorización se den cumplir una serie de características:

- Respetar la topología de la red
- Que los sectores sean homogéneos y las presiones sean lo más uniforme posible dentro de cada sector.
- Que tengan una o dos entradas, donde se colocará un caudalímetro y una válvula de corte por si se necesitara aislar el sector.

En la propuesta de sectorización se ofrece dividir la red en dos sectores que parten la red de norte a sur. Para ello se cortan las tuberías L-7 y L-68 situando la válvula de corte en la tubería en la tubería 17. Esta opción parece la más clara solo echando un vistazo a la red, pero al realizar la simulación se generan errores por presiones negativas.

Se vuelve a realizar otra propuesta que divida la red en norte y sur, esto supone tener que cerrar un mayor número de conexiones por lo que se vuelven a general los mismos errores en la simulación por presiones negativas.



Debido a que la red es casi en su totalidad ramificada se presentan numerosas complicaciones a la hora de sectorizar, por lo que el siguiente paso es realizar solamente un cierre de tubería. En este caso mantenemos la idea original cerrando solamente la tubería L-68 y situando la válvula de corte en la L-52.

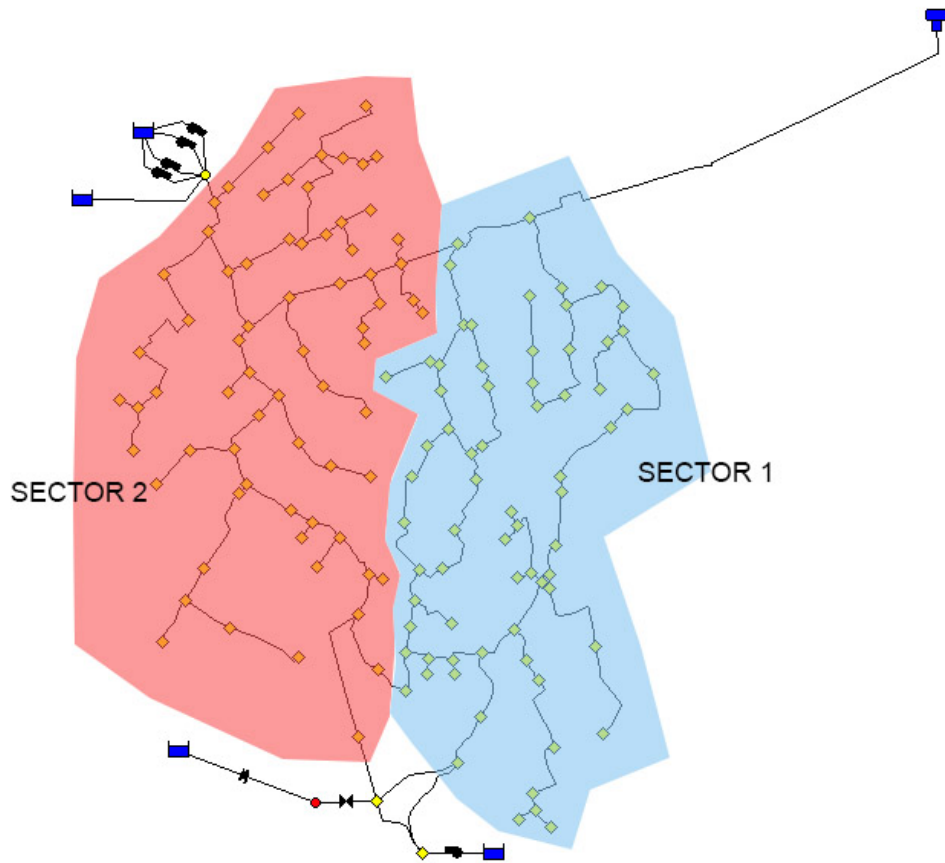


Figura 23. Sectorización propuesta

Se realiza una simulación aplicando la solución propuesta y se observa que en las horas críticas que se encontraban bajas presiones la situación ha empeorado, aumentando el número de hidrantes con problemas de bajas presiones.

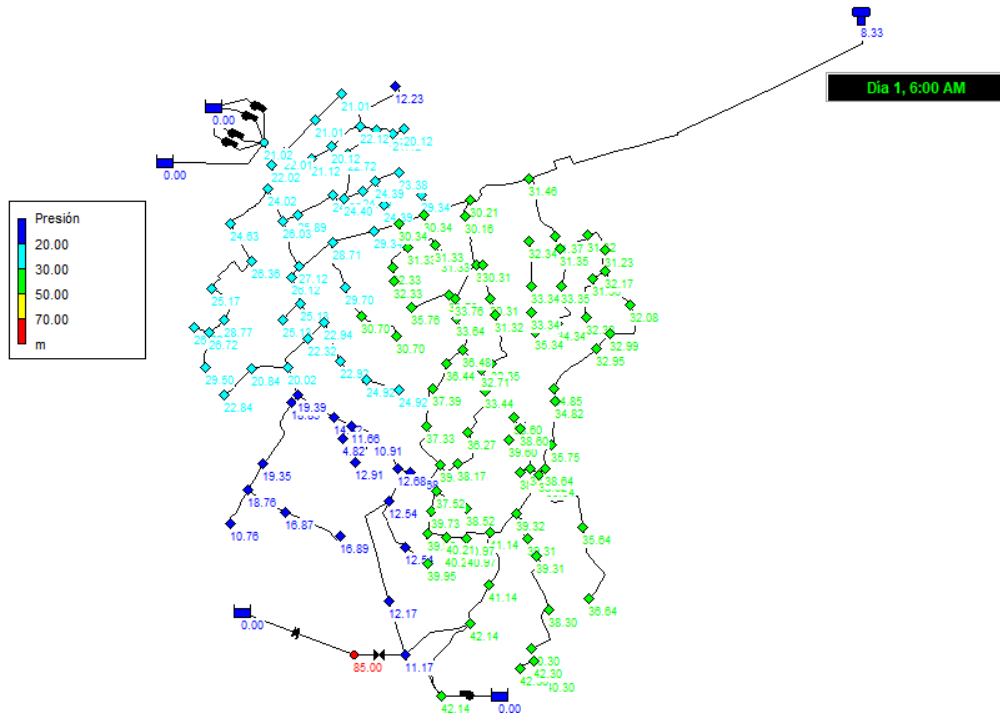


Figura 24. Situación crítica 1 con sectorización

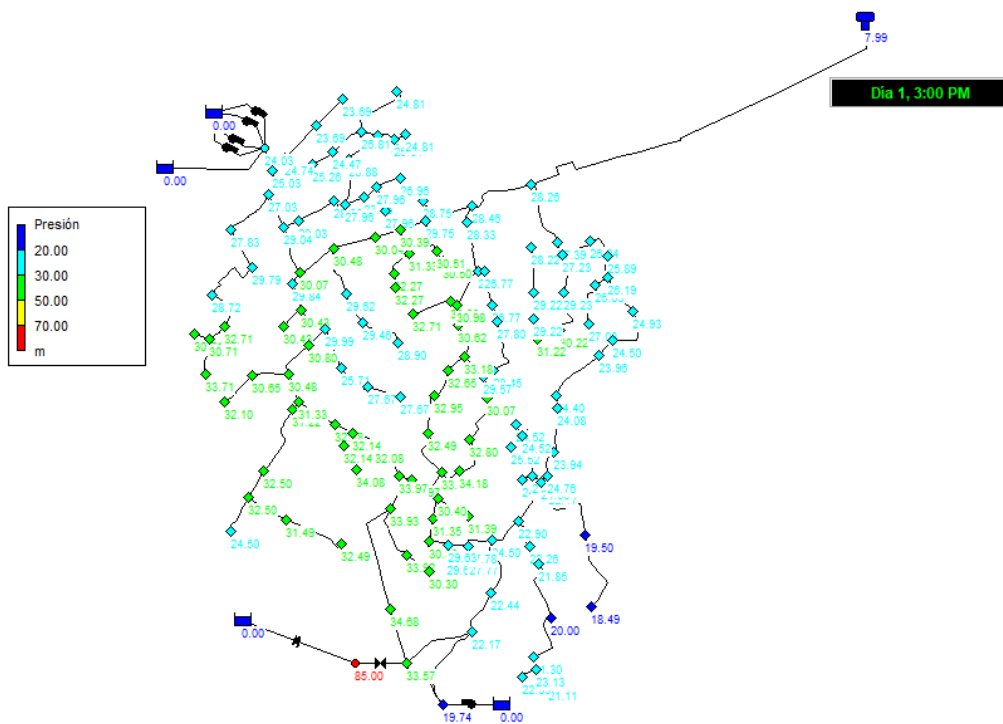


Figura 25. Situación crítica 2 con sectorización

Una vez comprobado que la sectorización no produce mejoras en la red se continua en busca de otras posibles soluciones a los diferentes problemas que presenta la red.



8.2. Regulación del bombeo

En la situación inicial del sistema los hidrantes se alimentan en exclusiva del embalse de Solana el cual en la situación de estudio no llega a abastecer a todos los hidrantes en condiciones ideales.

Las bajas presiones del sistema en momentos de gran demanda hacen que se plantee el poner en marcha la estación de bombeo de Rubial para satisfacer las necesidades de los usuarios de la comunidad de regantes

Conocidos los momentos en los que el sistema tiene presiones bajas se decide poner en marcha la bomba número uno de la estación de bombeo de Rubial. Para ello se programa la bomba para que arranque en el momento de bajas presiones y que se corte cuando la presión vuelva a estar por encima de 30 mca. Por tanto, esta operación de arranque y paro se realiza 2 veces al día y la bomba está funcionando durante 2 horas en total.

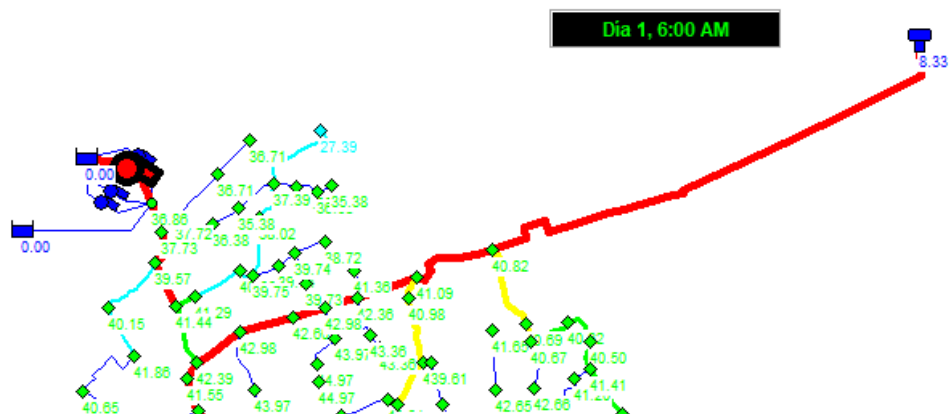


Figura 26. Estación de bombeo Rubial en funcionamiento

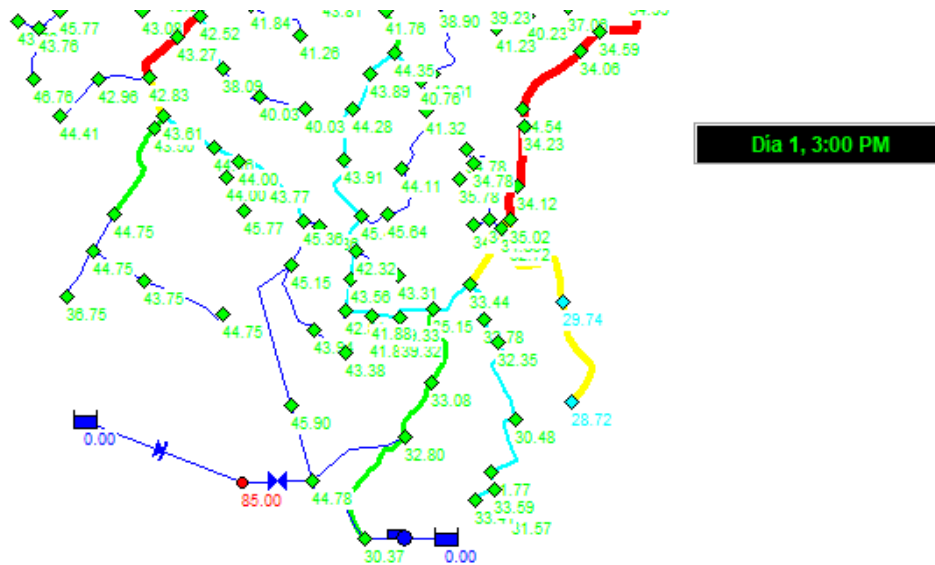


Figura 27. Puntos conflictivos de la red con alimentación por bombeo

Como se puede observar en las dos anteriores figuras se puede observar que, poniendo en marcha solamente una de las cuatro bombas que componen la estación de bombeo de Rubial, prácticamente todos los hidrantes tienen presiones por encima de 30 mca en durante toda la simulación.

Únicamente existen 3 hidrantes que no superan los 30 mca que se piden, aunque estos valores son muy cercanos 30 mca y se podrían dar por válidos ya que superan los 25 mca y puede ser suficiente para regar.

Por otro lado, se podría poner en marcha la estación de bombeo de Casa Zúñiga que elevaría las presiones de los puntos de conflicto, pero puede que sea innecesario poner en marcha una bomba para elevar la presión de 3 hidrantes que solo están algo más de 2 metros por debajo de 30 mca en el peor de los casos.



Una alternativa a tener en cuenta es que el agua que se inyecta desde Solana está agotándose debido a que proviene de los acuíferos de la zona y como está descrito en la introducción de este trabajo están sufriendo un importante sobre explotación. En este caso el bombeo de Rubial pasa a ser la principal fuente de suministro de agua a la comunidad de regantes. Esto provoca que el uso del bombeo sea continuo durante todo el momento del riego aumentando o disminuyendo el número de bombas en marcha para proporcionar la demanda requerida con un mínimo de presión a cada hidrante.

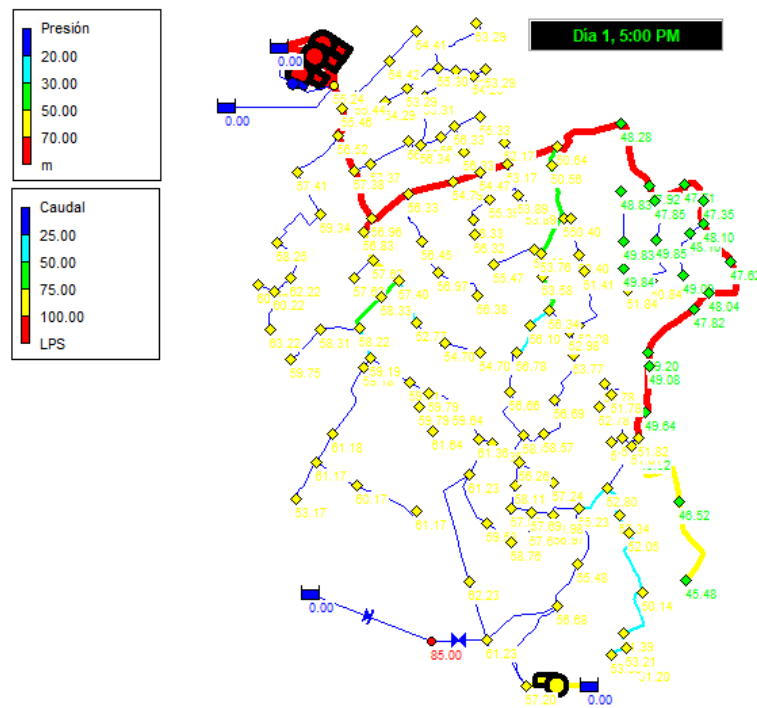


Figura 28. Uso de todo el bombeo disponible en la comunidad de regantes

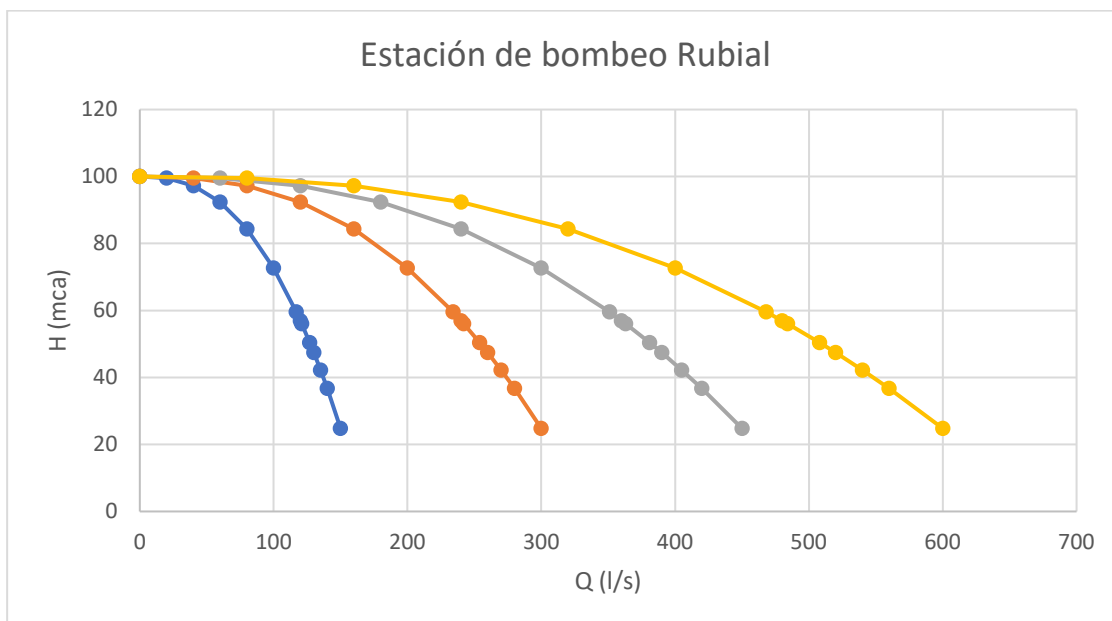


Figura 29. Curvas características estación de bombeo Rubial

Horas	μ (%)	Q (l/s)	H (mca)	Potencia (kW)	Nº bombas	Consumo (kWh)	Coste(€)
1	0	0	0.00	0.00	0	0	0.00
2	0	0	0.00	0.00	0	0	0.00
3	0	0	0.00	0.00	0	0	0.00
4	75	121	56.00	98.48	3	295.43	29.19
5	75	121	56.00	98.48	3	295.43	29.19
6	70	135	42.21	88.74	4	354.94	35.07
7	80	117	59.59	95.00	3	284.99	28.16
8	80	117	59.59	95.00	3	284.99	39.96
9	80	117	59.59	95.00	3	284.99	39.96
10	80	117	59.59	95.00	3	284.99	39.96
11	80	117	59.59	95.00	3	284.99	39.96
12	70	130	47.41	95.98	2	191.96	31.01
13	70	140	36.71	80.03	3	240.09	38.79
14	70	140	36.71	80.03	3	240.09	38.79
15	75	127	50.40	93.02	4	372.07	60.11
16	75	127	50.40	93.02	3	279.06	39.12
17	75	127	50.40	93.02	4	372.07	52.17
18	70	130	47.41	95.98	2	191.96	26.91
19	70	130	47.41	95.98	3	287.94	40.37
20	0	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
21	0	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
22	0	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
23	0	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
24	0	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00



Tabla 5. Uso y coste de bombeo regulado a la demanda

El bombeo desde Rubial tendría un coste diario de **608,71€** a lo que habría que sumar el coste del bombeo de Casa Zúñiga (24,40€), lo que supone un coste diario total de **633,10€**



8.3. Trasvase

La última de las soluciones que se proponen es la de poner en funcionamiento el trasvase del que dispone la red, que además de abastecer a la red y mejorar el sistema también hace que se liberen los distintos embalses que componen la red y permitir que sus niveles de agua se recuperen.

Al igual que en con las estaciones de bombeo se programan 2 operaciones de corte y cierre, en este caso de la tubería que conecta el trasvase con la red. Para el correcto funcionamiento de la red solo ha sido necesario abrir una de las dos entradas que tiene el trasvase para abastecer a la red.

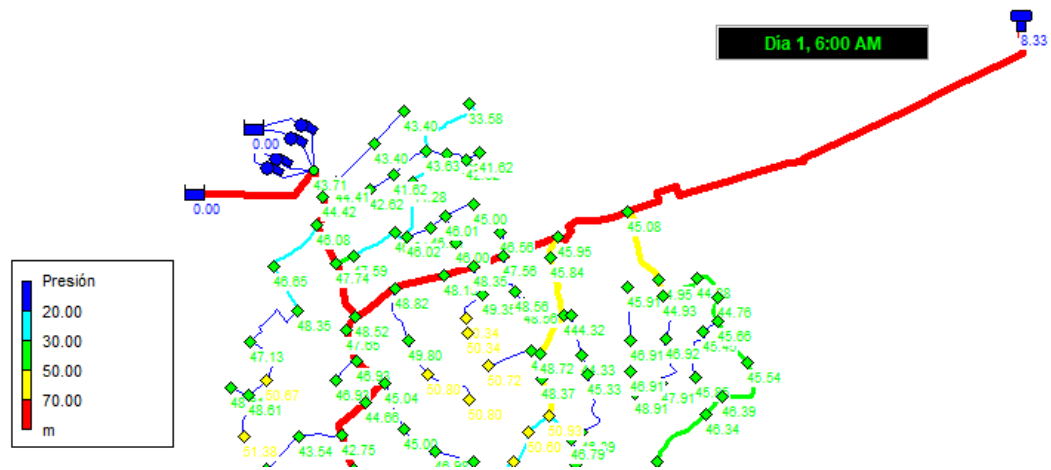


Figura 30. Puesta en marcha del trasvase

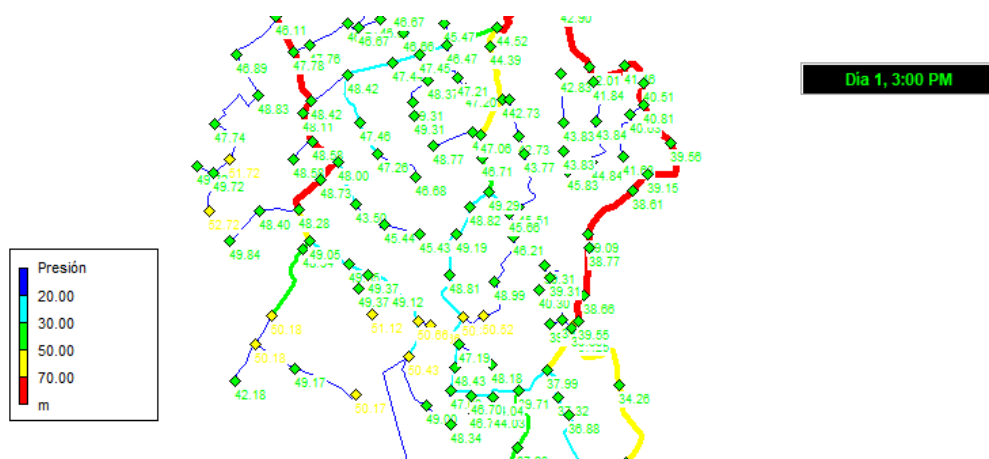


Figura 31. Puntos de presiones bajas solucionados

En las figuras anteriores se puede ver que no hay presiones por debajo de 30 mca, incluso en aquellos puntos que con una bomba no era posible



solucionar, por lo que hace que este pueda ser una muy buena solución para la comunidad de regantes.

Al igual que se ha realizado anteriormente se plantea la posibilidad de no utilizar el abastecimiento de Solana sustituyéndolo en este caso por el trasvase. Como se puede ver en la siguiente figura con el abastecimiento en exclusiva del trasvase para abastecer a la red es insuficiente, por tanto, se deberá regular el bombeo en conjunto con el trasvase para satisfacer las demandas, con al menos el mínimo de presión requerida.

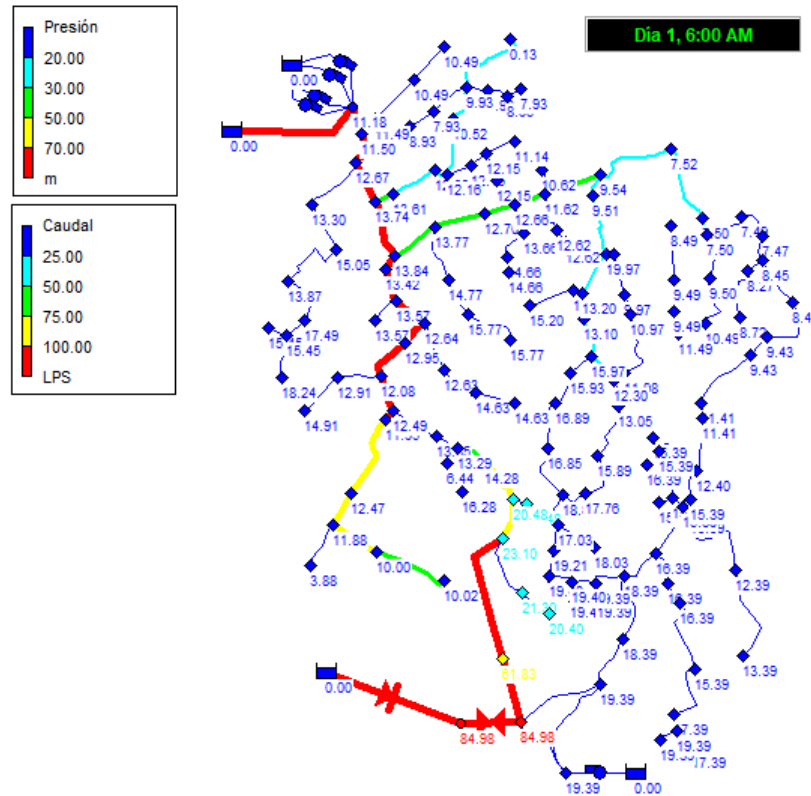


Figura 32. Bajas presiones abasteciendo con el trasvase

Con el funcionamiento conjunto de bombas y trasvase, sobre todo durante la hora punta de tarifa eléctrica se puede comprobar que el uso de bombeo es menor pudiendo así abaratar el coste de la factura eléctrica. La red funciona correctamente al igual que solo con el bombeo manteniendo las presiones por encima de 30 mca en los nudos de consumo

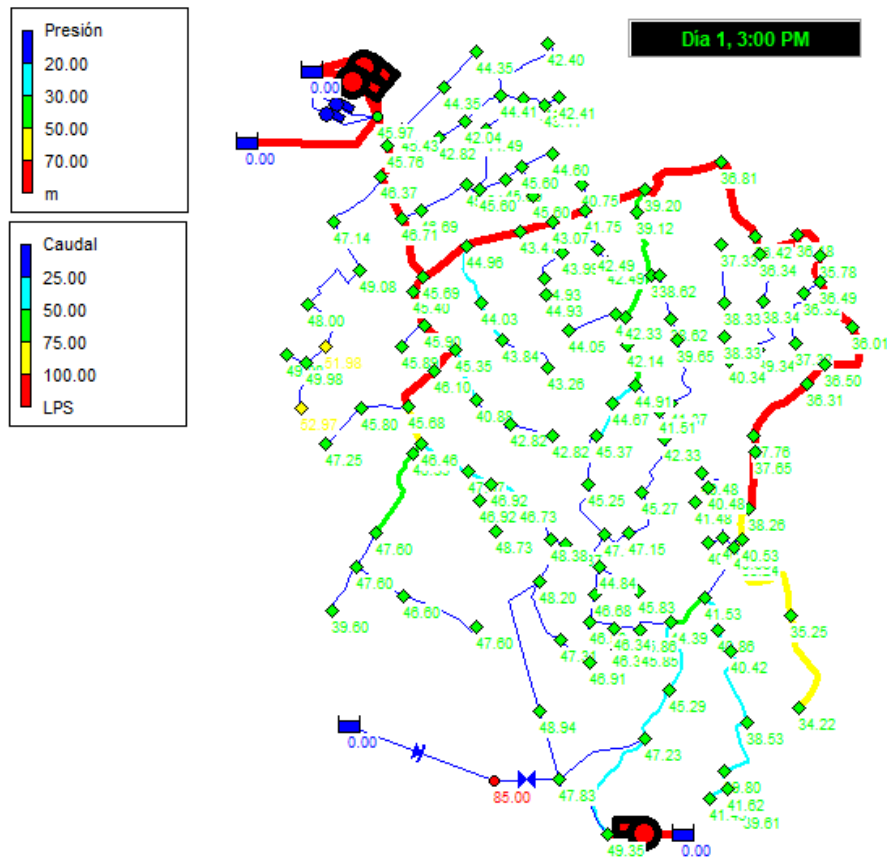


Figura 33. Uso conjunto bombeo y trasvase a la demanda

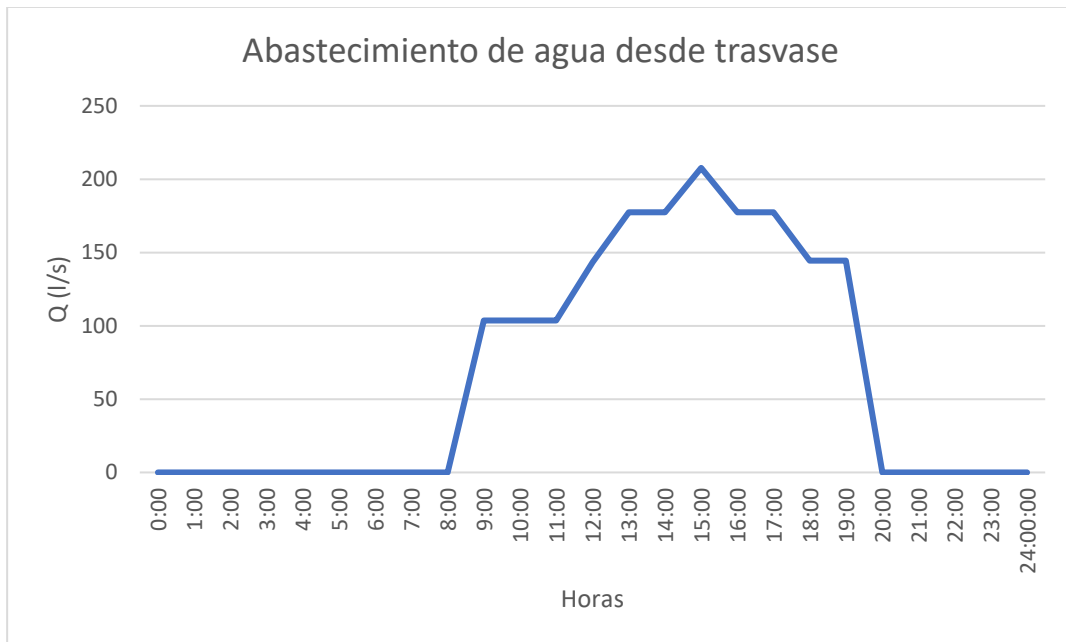


Figura 34. Gráfica de caudal inyectado desde trasvase



Horas	μ (%)	Q (l/s)	H (m)	Potencia (kW)	Nº bombas	Consumo (kWh)	Coste (€)
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	75	121.00	56.00	98.48	3.00	295.43	29.19
5.00	75	121.00	56.00	98.48	3.00	295.43	29.19
6.00	70	135.00	42.21	88.74	4.00	354.94	35.07
7.00	80	117.00	59.59	95.00	3.00	284.99	28.16
8.00	80	117.00	59.59	95.00	3.00	284.99	28.16
9.00	75	121.00	56.00	98.48	2.00	196.96	27.61
10.00	80	121.00	56.00	92.32	2.00	184.65	25.89
11.00	80	121.00	56.00	92.32	2.00	184.65	25.89
12.00	75	126.00	51.37	94.06	1.00	94.06	15.20
13.00	70	130.00	47.41	95.98	2.00	191.96	31.01
14.00	70	140.00	36.71	80.03	3.00	240.09	38.79
15.00	75	135.00	42.21	82.82	2.00	165.64	26.76
16.00	75	130.00	47.41	89.58	2.00	179.17	25.12
17.00	75	130.00	47.41	89.58	3.00	268.75	37.68
18.00	75	126.00	51.37	94.06	1.00	94.06	13.19
19.00	75	126.00	51.37	94.06	3.00	282.19	39.56
20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 6. Coste bombeo conjunto con trasvase desde Rubial

El coste de bombeo sumando tanto Rubial como Casa Zúñiga sería de **465,70€** mientras que el coste del agua trasvasada sería de **0,50€**



8.4. Riego por turnos

La organización del riego en redes de distribución a presión puede ser en riego a demanda o en riego por turnos o sectores. En el riego a demanda los usuarios eligen el momento, la frecuencia y la duración del riego, resultando una combinación de caudales y presiones que varía en función de la combinación de hidrantes en funcionamiento en cada momento. Así, las estaciones de bombeo deben estar preparadas para suministrar los requerimientos más desfavorables, lo que repercute en un gran sobredimensionamiento y un alto consumo energético.

En el riego por turno o por sectores se organizan los hidrantes en grupos, turnos o sectores de riego para que funcionen simultáneamente en cada turno, de manera que se tengan unas presiones y caudales similares, lo que se asocia a unos rendimientos de los equipos de bombeo similares. Así, en esta forma de organización del riego se permite elecciones de configuraciones más ventajosas, escogiendo qué hidrantes y cuándo deben regar en cada turno, y por otra parte se evitan puntas de máximo caudal y presión que sí se pueden llegar a dar en el riego a demanda. Así pues, el riego por turno permite una optimización del riego minimizando el consumo energético.

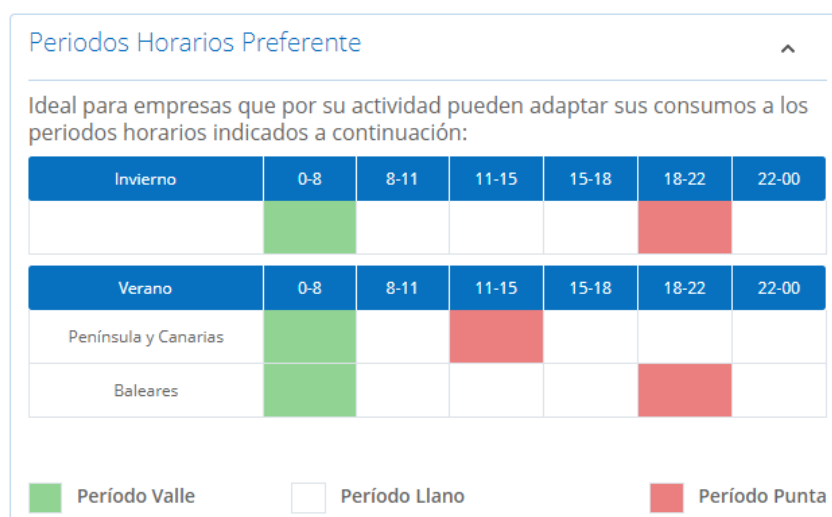


Figura 35. Periodos de facturación (ENDESA, 2017)

Se han creado 5 turnos de riego que serán repartidos entre 5 zonas de la red. Estas zonas se han creado según la localización y su demanda, de forma que



cada zona tenga un consumo similar. En la siguiente figura se puede ver cómo han quedado distribuidos los diferentes sectores. Además, los patrones de demanda se han repartido a lo largo del día de forma que se pueda evitar el período de punta en el caso de utilizar bombeo.

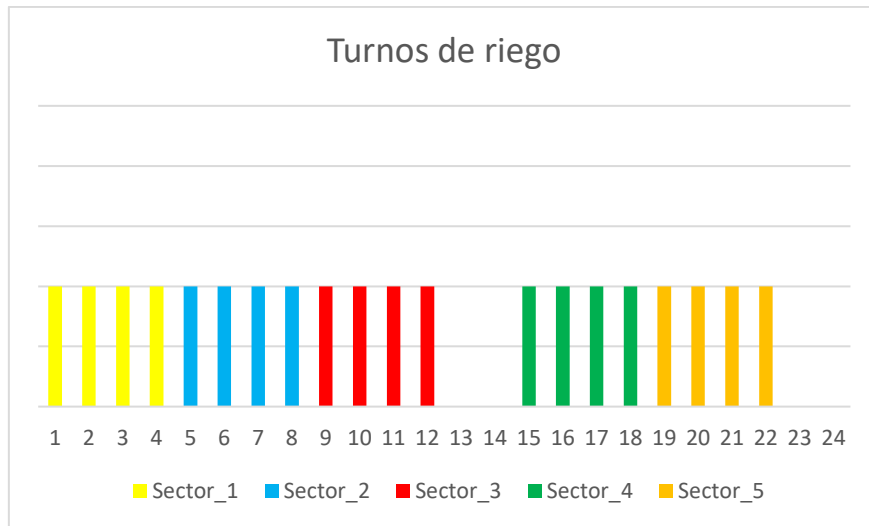


Figura 36. Turnos de riego

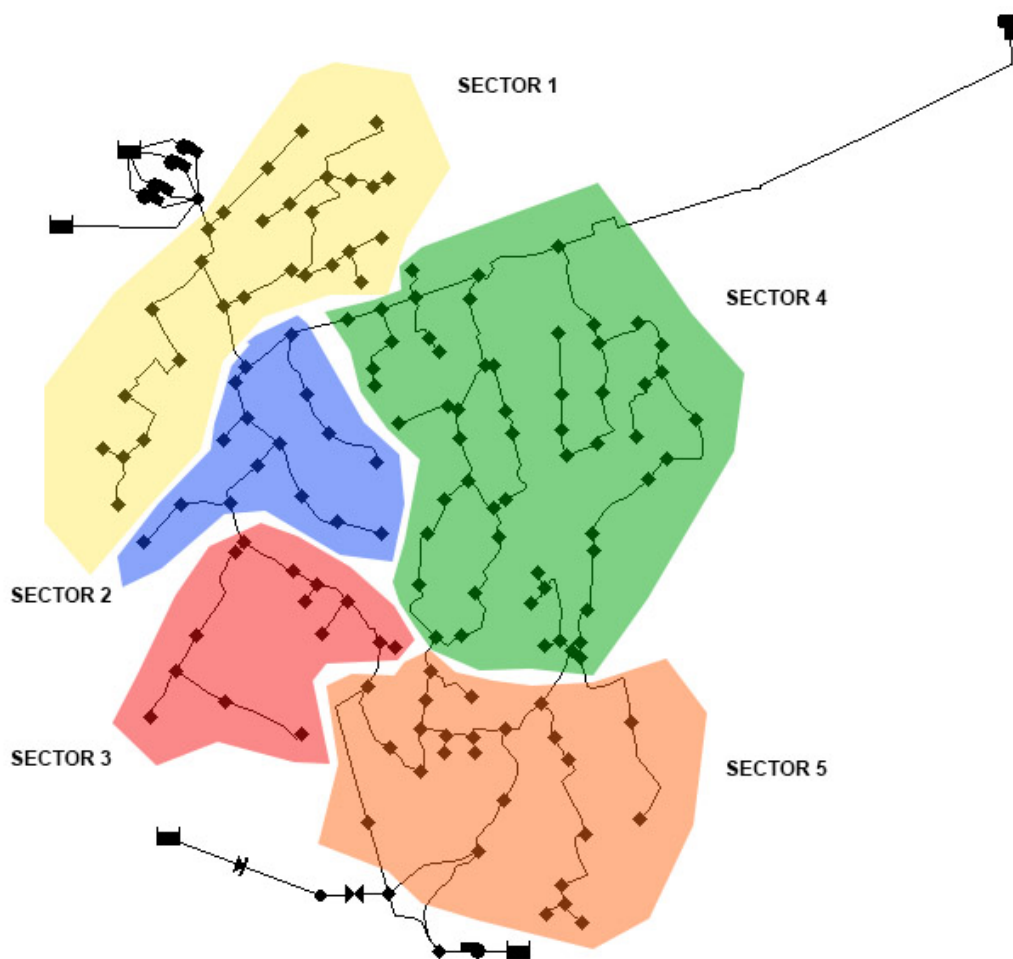


Figura 37. Sectores para riego por turnos

En la siguiente tabla están reflejados las demandas de cada sector. Se puede comprobar que los sectores 2 y 3 siendo los más pequeños en tamaño son los que más consumo tienen debido a que los grandes consumidores de la red se concentran en esas zonas.

Sectores	Demanda total (l)	Demanda promedio (l/s)
Sector_1	134.90	4.82
Sector_2	250.33	14.73
Sector_3	328.06	23.43
Sector_4	173.53	2.99
Sector_5	210.78	8.43

Tabla 7. Demandas de cada sector



Partiendo con el embalse de Solana como único punto de captación se encuentra la situación de que existen bajas presiones en dos de los sectores, en el sector 1 y en el sector 3. En el sector 1 al igual que ocurre en el sistema de riego a la demanda es el hidrante 316 el que sufre los problemas de presiones, con una presión mínima de 26,31 mca. Nuevamente vuelve a tener un alto valor de pérdidas de carga, por lo que se podría plantear la sustitución de la tubería por un diámetro superior. El resto de hidrantes del sector tienen un excelente nivel de presión, superando los 40 mca.

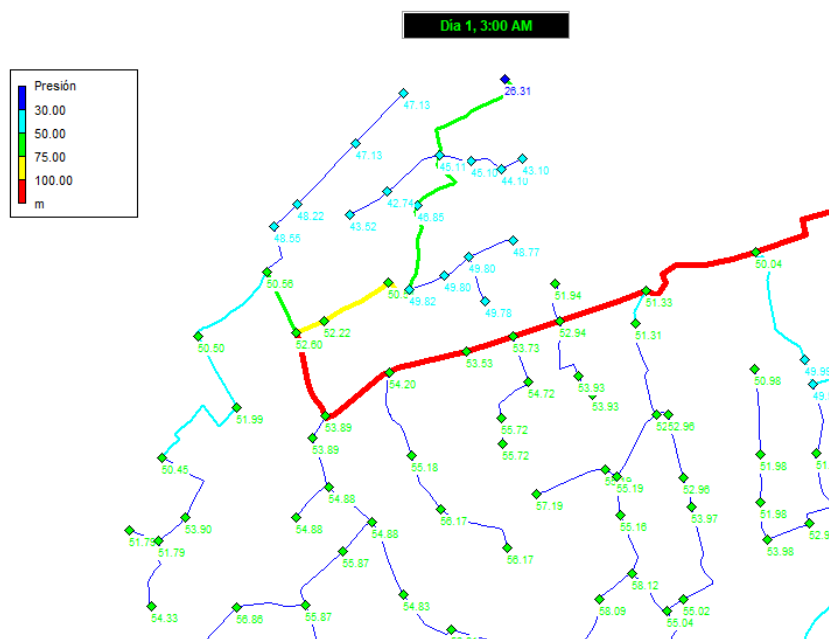


Figura 38. Presiones en el sector 1

El sector 3 es el que más problemas de presión presenta debido a que como anteriormente se citaba es el sector con mayor demanda de la red a pesar de ser el menor en extensión de terreno y el que menos hidrantes tiene. En este caso existen seis hidrantes con valores inferiores a 30 mca. El resto de sectores funciona correctamente durante su tiempo de riego, con presiones siempre por encima de 30 mca.

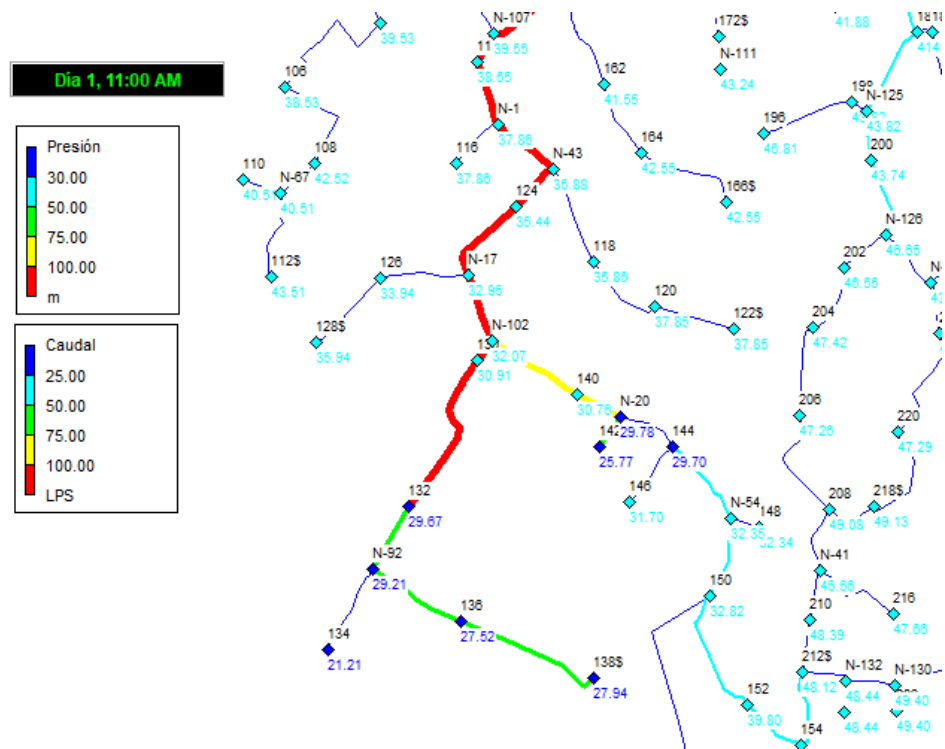


Figura 39. Bajas presiones en el sector 3

Para solucionar estos problemas de presiones se proponen diferentes mejoras. La primera de ellas será la de poner en marcha la estación de bombeo de Rubial. Para ello se programará el arranque y paro de una de las bombas durante el turno de riego de cada uno de los sectores que presentan problemas, en este caso el 1 y el 2. Como se puede observar en las figuras con el bombeo desaparecen las bajas presiones y la red entera funciona con presiones por encima de 30 mca durante toda la simulación.

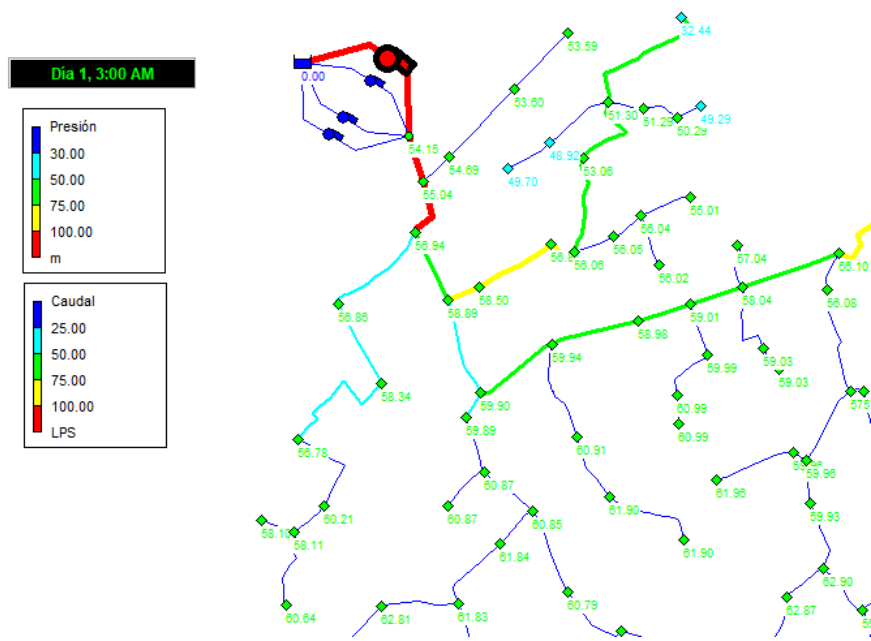


Figura 40. Arranque de bomba para sector 1

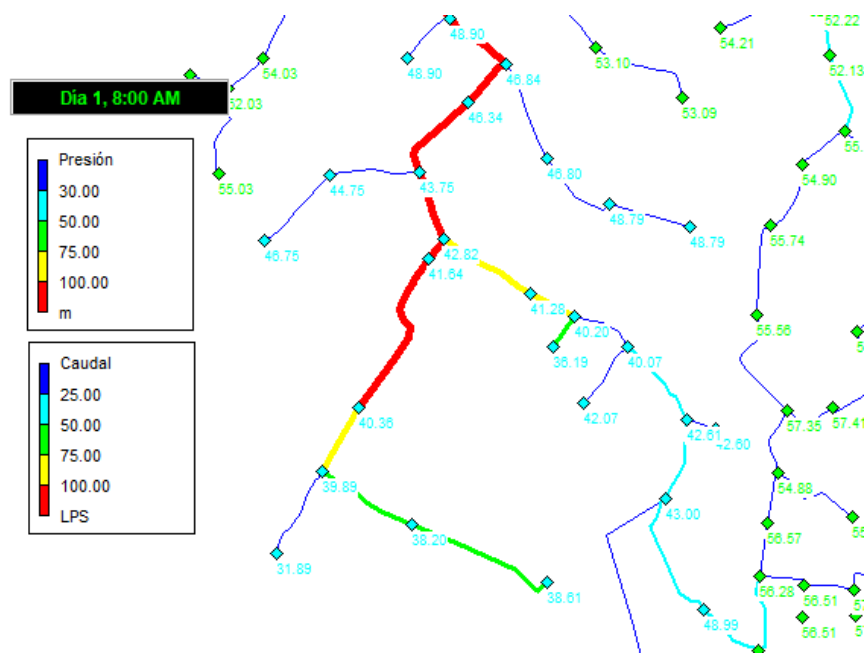


Figura 41. Arranque de bomba para sector 3

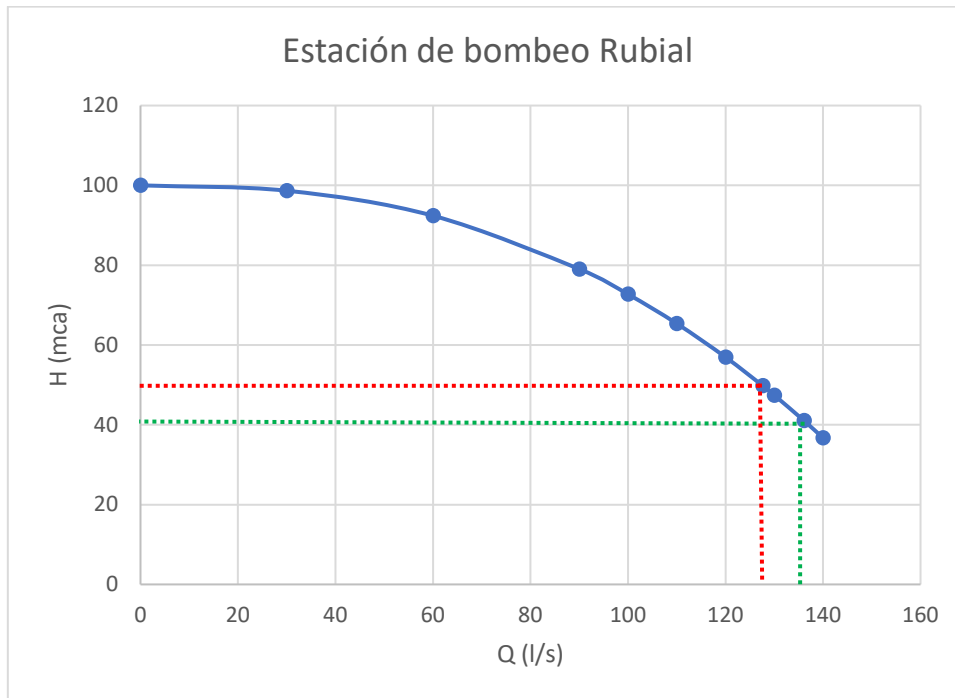


Figura 42. Punto de funcionamiento bombeo con Solana

Como se puede comprobar con una sola bomba se pueden cubrir las necesidades de la red, pero se puede plantear la opción de cortar el suministro de agua de Solana, de modo que este pueda recuperarse ya que recibe agua de diferentes acuíferos que se encuentran casi agotados. Así en el periodo estival, el cual es el de mayor consumo, se evitaría la sobreexplotación de los acuíferos.

Al cerrar la tubería principal de la red que conecta con Solana se partirá de la situación de inicial de dos bombas de la estación de bombeo de Rubial. Durante la simulación se producen varias situaciones de arranque y paro de bombas tanto en Rubial como de casa Zúñiga estos controles quedan reflejados de la siguiente manera:

```
PUMP EB_rubial3 OPEN AT CLOCKTIME 4
PUMP EB_rubial3 CLOSED AT CLOCKTIME 12
PUMP EB_rubial1 CLOSED AT CLOCKTIME 12
PUMP EB_rubial1 OPEN AT CLOCKTIME 15
PUMP eb_zuniga1 OPEN AT CLOCKTIME 19
PUMP eb_zuniga1 CLOSED AT CLOCKTIME 23
PUMP EB_rubial1 CLOSED AT CLOCKTIME 23
PUMP EB_rubial1 OPEN AT CLOCKTIME 24
```



El siguiente paso sería ajustar esas operaciones, así como los turnos de riego de forma que se adapte a la tarifa eléctrica para que así el coste sea el menor posible. En la siguiente tabla está explicado cuantas bombas están en funcionamiento en cada hora en la situación inicial

Hora inicial	Hora final	Número de bombas
0:00	4:00	2
4:00	12:00	3
12:00	15:00	0
15:00	19:00	2
19:00	23:00	3
23:00	24:00	0

Tabla 8. Bombas en marcha por turno

En este caso habría que situar el riego con tres bombas en la hora valle y las de dos bombas en llano, tratando de que en hora punta solo arranque una bomba. Por tanto, se modifican tanto los turnos de riego (intercambiando el turno 1 por el 3) como los controles de las bombas.

```

PUMP EB_rubial3 OPEN AT CLOCKTIME 0
PUMP EB_rubial3 CLOSED AT CLOCKTIME 8
PUMP EB_rubial1 CLOSED AT CLOCKTIME 12
PUMP EB_rubial1 OPEN AT CLOCKTIME 15
PUMP eb_zuniga1 OPEN AT CLOCKTIME 19
PUMP eb_zuniga1 CLOSED AT CLOCKTIME 23
PUMP EB_rubial1 CLOSED AT CLOCKTIME 23
PUMP EB_rubial1 OPEN AT CLOCKTIME 24
    
```

Hora inicial	Hora final	Número de bombas
0:00	8:00	3
8:00	12:00	2
12:00	15:00	0
15:00	19:00	2
19:00	23:00	3
23:00	24:00	0

Tabla 9. Bombas en marcha con ajuste de tarifa

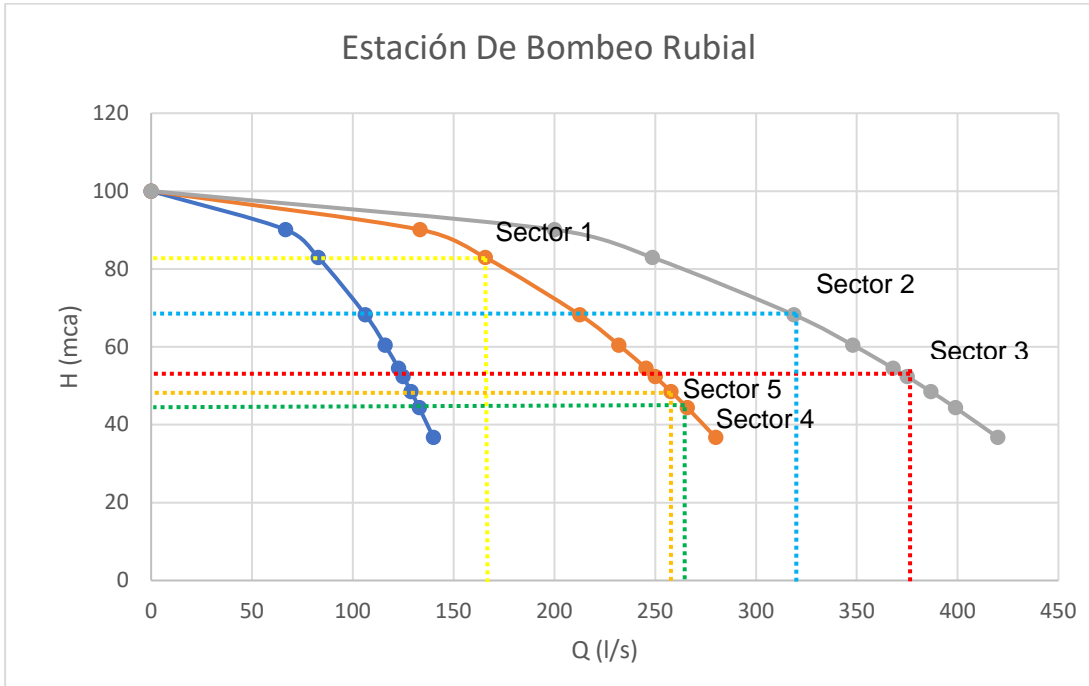


Figura 43. Puntos de funcionamiento de la estación de bombeo Rubial

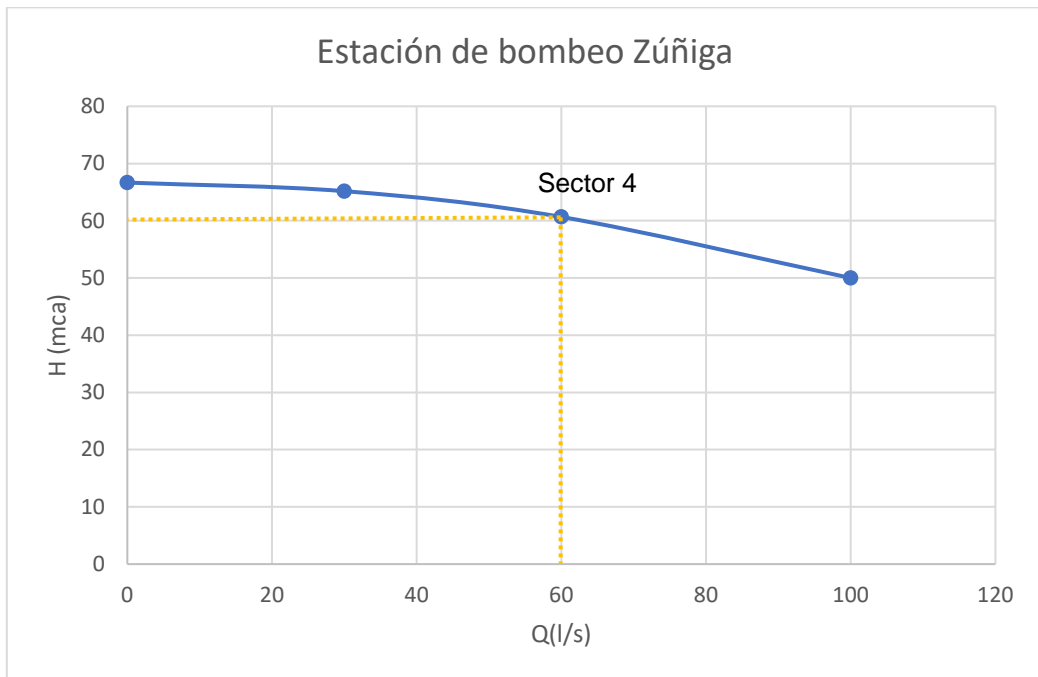


Figura 44. Punto de funcionamiento estación de bombeo Zúñiga



Este escenario tendría un coste alto ya que se deja de utilizar una gran inyección de caudal por gravedad dejando paso al bombeo durante toda la simulación. Otra alternativa sería la de utilizar el trasvase, el cual, tiene un coste por m³ inferior al de bombeo. En la siguiente tabla se puede ver tanto el consumo como el coste del uso exclusivo de bombeo para abastecer a la red de riego. Todo ellos con sus precios correspondientes según el horario en el que se riega.

Sectores	μ (%)	Q (l/s)	H (m)	Potencia (kW)	Horas	Nº bombas	Consumo (kWh)
Sector_1	85	82.9	82.9239	88.15	4	2	176.31
Sector_2	80	106.29	68.2141	98.79	4	3	296.36
Sector_3	75	125	52.3263	95.06	4	3	285.18
Sector_4	75	132.98	44.3495	85.71	4	2	171.42
Sector_5	75	128.91	48.5103	90.88	4	2	181.77
Zúñiga	85	60	60.6688	46.68	4	1	46.68

Tabla 10. Consumo eléctrico bombeo

Sectores	Coste (€/día)
Sector_1	98.87
Sector_2	117.14
Sector_3	112.72
Sector_4	96.14
Sector_5	101.94
Zúñiga	26.18
	552.98 €

Tabla 11. Coste diario bombeo turnos

Utilizando en exclusiva el trasvase se encuentran problemas de bajas presiones durante el tercer turno de riego que corresponde en este caso al sector 3 teniendo incluso las dos entradas al sistema abiertas. Debido a esto habría que plantear la posibilidad de combinar tanto bombeo como trasvase de forma que el sistema funcione de la forma más óptima y económica posible.

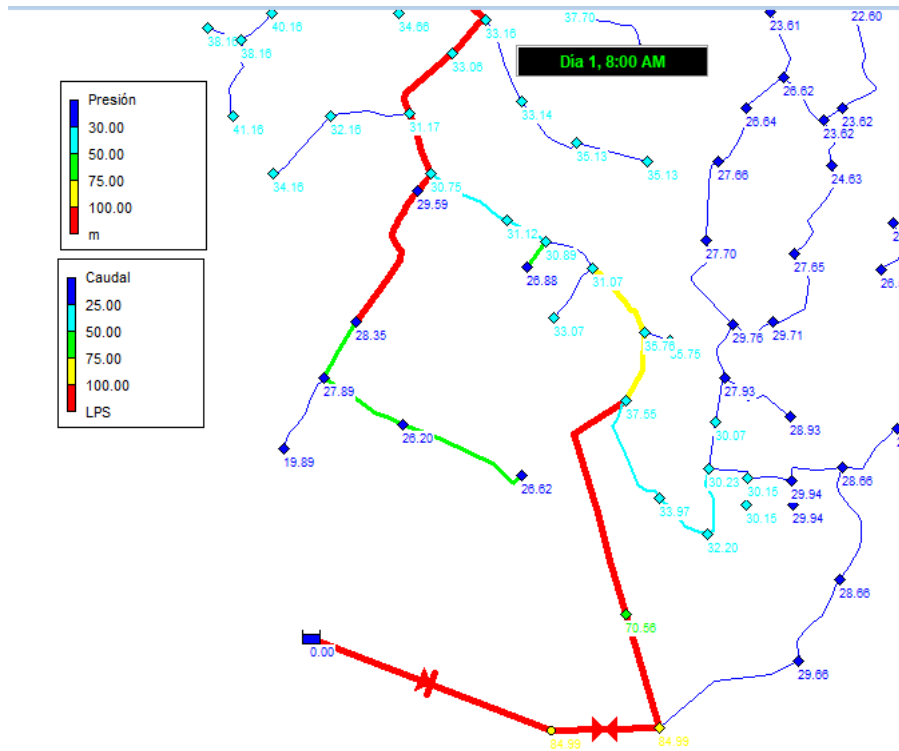


Figura 45. Presiones bajas con dos entradas desde el trasvase

Para solucionar el problema anterior se plantea el uso combinado de bombas y trasvase de manera que la bomba trabaje solamente durante la hora valle y así ahorrar lo máximo que sea posible.

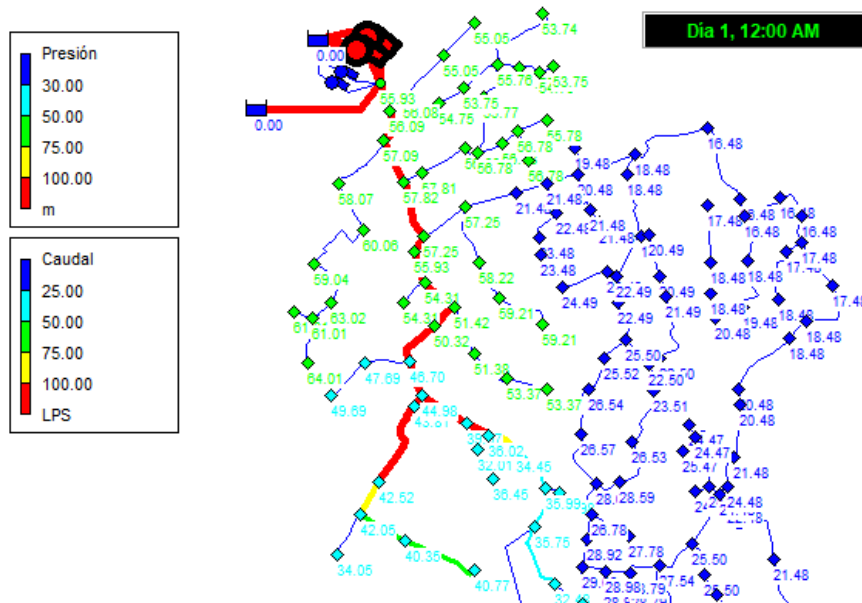


Figura 46. Uso conjunto de bombeo y trasvase



A continuación, se pueden ver las operaciones de control que se realizan para abrir y cerrar tanto bombas como el trasvase, donde la tubería con el ID 12 es la que comunica la parte norte de la red con el trasvase. Por la topografía de la red la conexión sur del trasvase apenas mejora las presiones de la red incluso durante el turno de riego correspondiente al sector 5 situado al sur de la red. Esto hace que se replantee su construcción ya que para abastecer a ese sector con garantías se utiliza en este escenario la conexión norte del trasvase y el bombeo de Casa Zúñiga.

LINK 12 OPEN AT CLOCKTIME 0
LINK 12 CLOSED AT CLOCKTIME 4
LINK 12 OPEN AT CLOCKTIME 8
LINK 12 CLOSED AT CLOCKTIME 12
PUMP EB_rubial1 CLOSED AT CLOCKTIME 8
PUMP EB_rubial2 CLOSED AT CLOCKTIME 12
LINK 12 OPEN AT CLOCKTIME 15
LINK 12 CLOSED AT CLOCKTIME 19
PUMP eb_zuniga1 open AT CLOCKTIME 19
PUMP eb_zuniga1 closed AT CLOCKTIME 23
LINK 12 OPEN AT CLOCKTIME 19
LINK 12 CLOSED AT CLOCKTIME 23
PUMP EB_rubial1 open AT CLOCKTIME 24
PUMP EB_rubial2 open AT CLOCKTIME 24

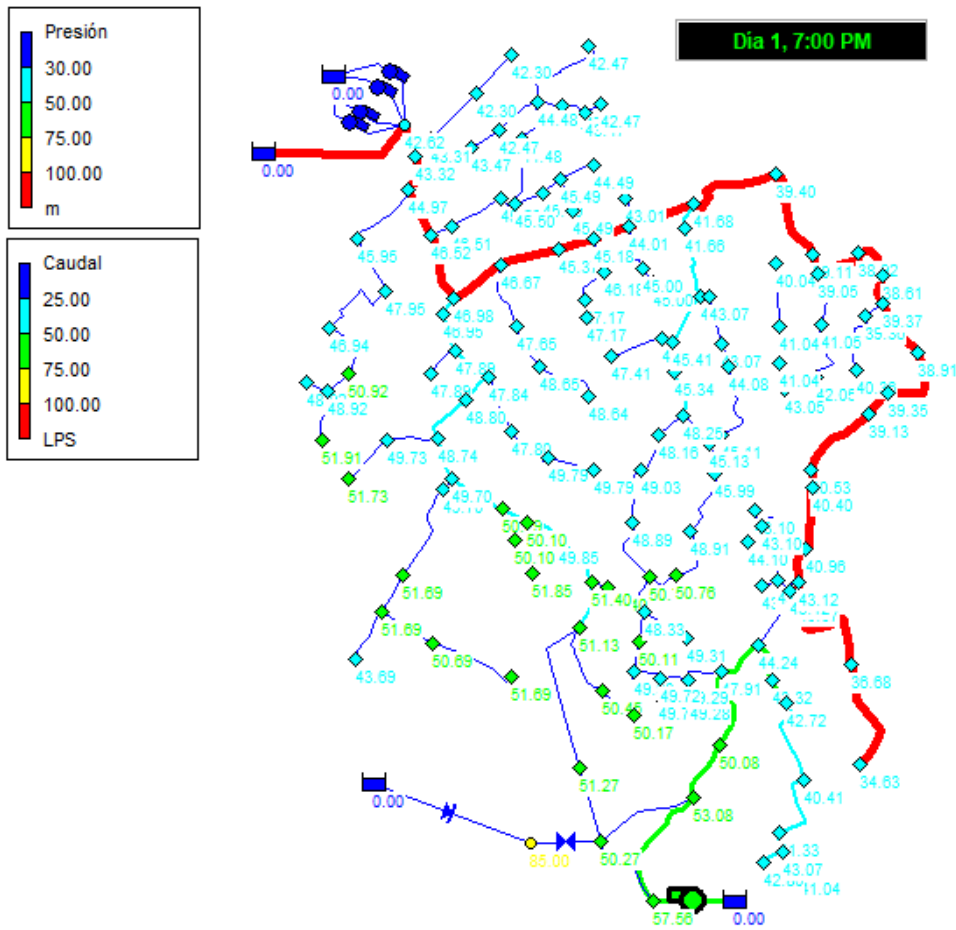


Figura 47. Aporte conjunto de caudal desde trasvase y Casa Zúñiga

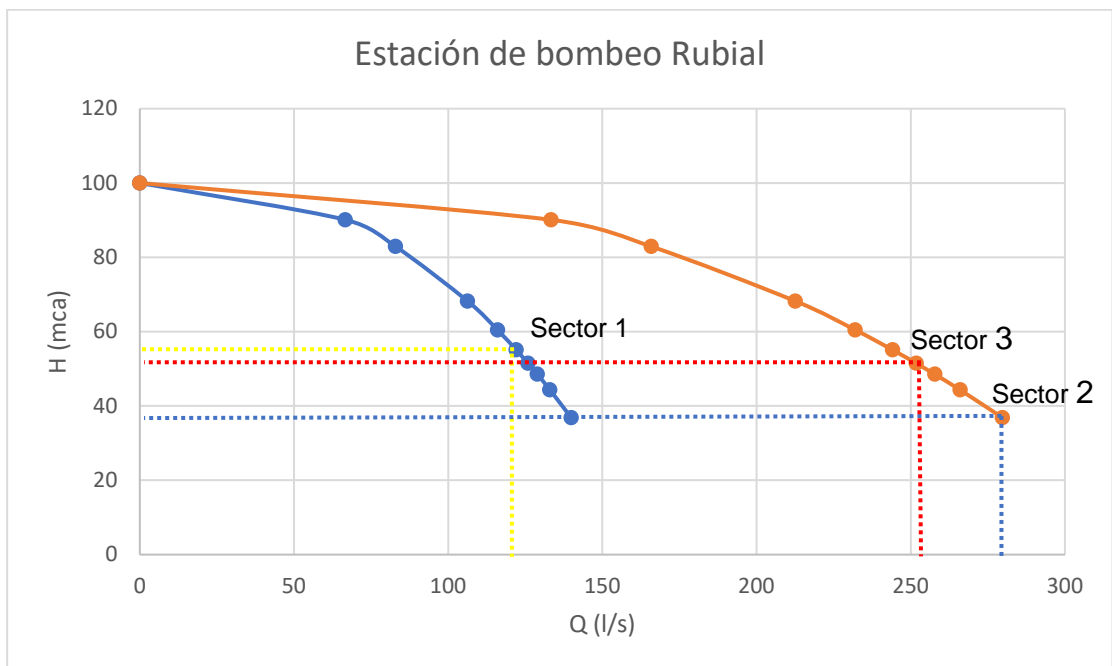


Figura 48. Puntos de funcionamiento Rubial con trasvase

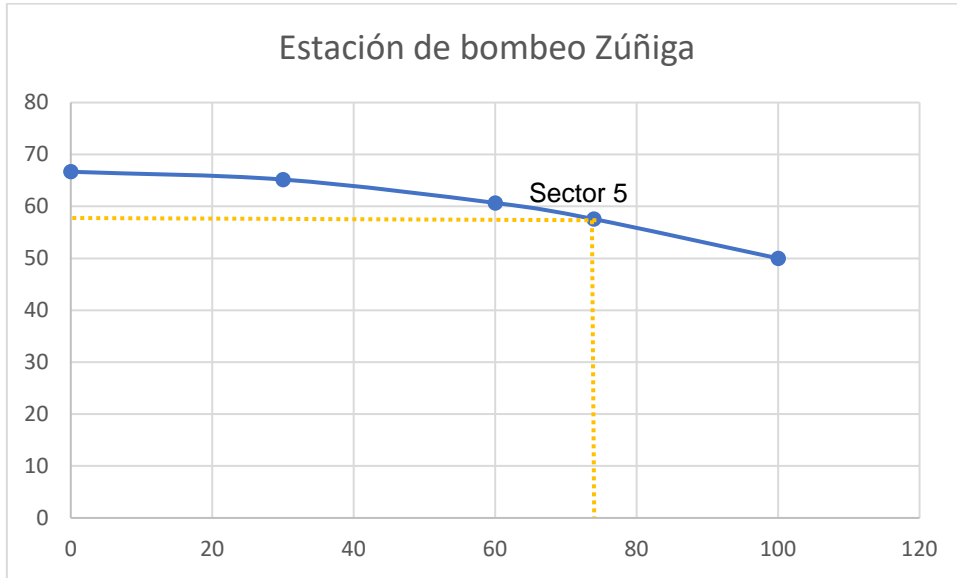


Figura 49. Punto de funcionamiento Zúñiga con trasvase

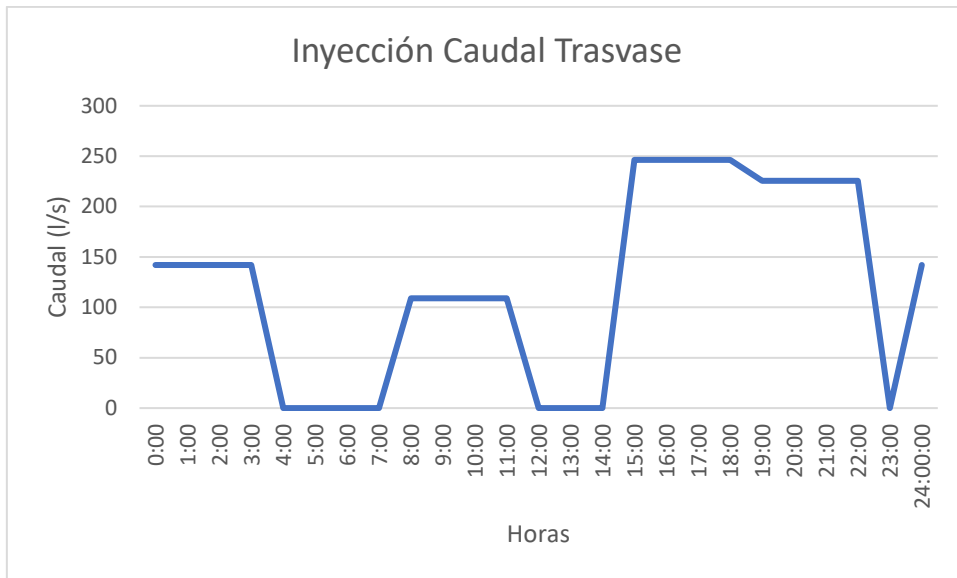


Figura 50. Inyección de caudal trasvase

Con esta alternativa se puede comprobar que existe un ahorro con respecto al uso exclusivo de bombeo. En la siguiente tabla se pueden ver el consumo eléctrico del bombeo, así como el coste de bombeo sumado al coste del agua del trasvase.



Sectores	μ (%)	Q (l/s)	H (m)	Potencia bomba	Horas	Nº bombas	Consumo (kWh)
Sector_1	80	122.06	55.0803	91.60	4	1	91.60
Sector_2	75	139.87	36.8585	74.93	4	2	149.85
Sector_3	75	125.87	51.4925	94.20	4	2	188.39
Sector_4	0	0	0	0.00	0	0	0.00
Sector_5	80	73.92	57.5612	57.97	4	1	57.97

Tabla 12. Consumo eléctrico estación de bombeo Rubial durante turnos de riego

Sectores	Volumen (L)	Volumen (m3)	Coste (€/día)
Sector_1	436.08	0.436	0.13
Sector_2	0	0.000	0.00
Sector_3	567.88	0.568	0.17
Sector_4	985.36	0.985	0.30
Sector_5	902.44	0.902	0.27
			0.87 €

Tabla 13. Coste del abastecimiento con trasvase con turnos de riego

Sectores	Coste Eléctrico (€/día)	Coste trasvase (€/día)
Sector_1	51.37	0.13
Sector_2	59.23	0.00
Sector_3	74.46	0.17
Sector_4	0.00	0.30
Sector_5	32.51	0.27
217.58 €		0.87 €
TOTAL :218.44 €		

Tabla 14. Coste bombeo más trasvase con turnos



9. Análisis de los resultados

Después de estudiar todas las propuestas de mejoras se puede comprobar que tanto impulsando agua con bombeo como con el trasvase las presiones en los hidrantes superan el valor deseado. Aunque con la opción del trasvase se podría aumentar el caudal demandado algo más sin necesidad de activar otra bomba de la estación de Rubial o de Casa Zúñiga.

Para la propuesta de mejoras con regulación del bombeo se desconocen los modelos de las bombas, así como su curva característica real. Solamente disponiendo de la curva que incluye el modelo de la red se puede estimar el punto de funcionamiento, así como la potencia y consumo.

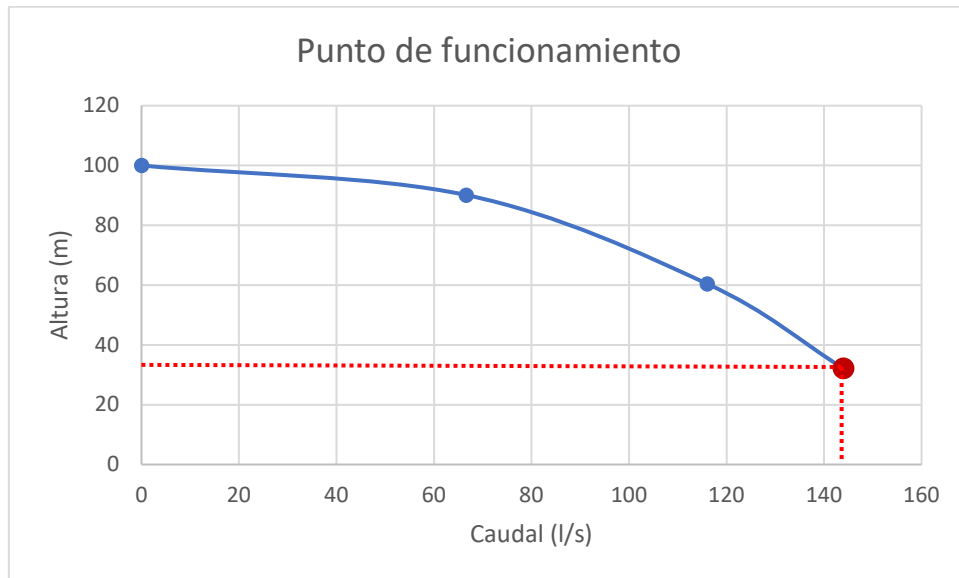


Figura 51. Punto de funcionamiento EB Rubial

Simulando esta propuesta con bombeo se obtiene que esta impulsa 143.52 l/s a 32 m de altura. Con estos datos y sin conocer el modelo real instalado en la red, se puede estimar la potencia de la bomba en este punto y su consumo. Para ello se partirá de la hipótesis de que la bomba dispone de un variador de potencia, ya que debido a la modernización de la red esto parece más que probable. Estimando también los rendimientos de la bomba y del motor eléctrico obtenemos la potencia eléctrica consumida por la bomba

$$P_e = \frac{9,81 \cdot 0,144 \cdot 32}{0,7 \cdot 0,9} = 72 \text{ kW}$$



Otro dato que se desconoce es la tarifa eléctrica contratada por lo que será estimado teniendo en cuenta los precios de mercado. Las tarifas eléctricas vigentes, hasta septiembre de 2017 de la compañía Endesa para los tres periodos de facturación son los siguientes:

Período	Precio (€/kWh)
Hora punta	0,161544
Hora llano	0,140202
Hora valle	0,098814

Tabla 15. Tarifas compañía Endesa 2017

Como existen dos momentos en los que se impulsa caudal desde la estación de bombeo se partirá de la hipótesis de que uno se hace en hora llano y el otro en hora valle, para evitar el mayor coste de la hora punta. Por tanto, el coste de las dos horas de bombeo sin tener en cuenta el término de potencia, sería de:

$$72\text{kWh} * 0.140202\text{€/kWh} + 72\text{kWh} * 0.098814\text{€/kWh} = 17,92\text{€}$$

Tal y como se ha expuesto anteriormente la puesta en marcha del trasvase, como alternativa al bombeo llevan asociados unos componentes fundamentales en la búsqueda de un mejor comportamiento de la red:

- El coste del m³ de agua del trasvase es menor que el coste del kWh de la estación de bombeo
- Utilizando el trasvase en detrimento de las estaciones de bombeo provoca la recuperación de los embalses
- Ya se ha realizado la inversión para conectar el trasvase, por tanto, se intentará amortizar lo antes posible.

Con respecto al trasvase hay que decir que por confidencialidad no se disponen de los costes que ha supuesto la obra de construcción para conectar la red a dicho trasvase y aunque sí que se conoce el precio del metro cúbico de agua no se puede calcular el tiempo de amortización de la obra.

El agua del trasvase se enviará desde el azud de la Marquesa en Cullera por un precio político de 0.18€ el metro cúbico (el precio real serían 0.30€ sin



incorporar la desalación), la tarifa máxima que pueden pagar los usuarios. Con estos datos y conocido el caudal inyectado por el trasvase se calcula el coste diario que tendría el uso de este recurso

Q inyectado	Precio m3	Coste diario
m3	€/m3	€
0.44	0.3	0.13

Tabla 16. Coste agua trasvasada

Si se elige el riego por turnos se puede controlar de una mejor manera todos los aspectos de la red, pero sobre todo en el caso de eliminar el abastecimiento desde Solana por el agotamiento de los acuíferos de la zona, se produce un mayor ahorro ya que se pueden seleccionar los turnos de riego y por tanto cuando están en marcha las bombas. Si bien la comunidad de regantes no se plantea ésta propuesta en el presente en un futuro cercano será lo mejor.

En la siguiente tabla se puede ver una comparativa con el coste diario de cada una de mejoras propuestas anteriormente. A primera vista se puede ver que el uso de Solana como abastecimiento abarata el coste diario de forma clara, sin embargo, cuando se comparara el uso de bombeo o trasvase sin el aporte de caudal de Solana el riego por turnos es el claro ganador. Al tener que bombear durante todo el riego, el poder seleccionar cuando se bombea teniendo en cuenta las tarifas eléctricas hace que el consumo eléctrico sea más óptimo y a largo plazo debe ser la opción a aplicar.

Propuestas	Coste diario (€)
Bombeo + Solana	17,92€
Trasvase + solana	0,4€
Bombeo	633,10
Trasvase + bombeo	466,2
TURNOS	
Bombeo	552.98 €
Trasvase + bombeo	218.44 €

Tabla 17. Comparativa de costes



10. Conclusiones

Este trabajo se ha realizado con el objetivo de principal de analizar la red actual, estudiar su comportamiento y proponer posibles mejoras.

A partir de las mediciones proporcionadas de cada hidrante se puede decir que la demanda en rasgos generales es bastante homogénea en toda la red, a excepción de algunos usuarios. Esto facilita el trabajo del análisis tanto de las demandas como de la situación actual.

La comunidad de regantes cuenta con recursos naturales y equipos de bombeo suficientes para garantizar el riego a los usuarios. Además, teniendo en cuenta el uso actual del recurso se puede garantizar la demanda futura que puede tener la red en caso de aumentar esta.

Para evitar un aumento del gasto energético propondría que la comunidad de regantes se planteara en un futuro próximo el riego por turnos. Evitando además problemas de simultaneidad que puedan colapsar la red. Además, contratar o negociar una tarifa eléctrica más favorable con los suministradores también supondría un ahorro energético.

El trasvase tiene tanto puntos a favor como en contra por lo que es algo que siempre genera controversia entre la población. A favor tiene que crea un equilibrio hidrológico entre diferentes cuencas, se crea un aprovechamiento total del recurso ya que este no se pierde en el mar, exceptuando el caudal ecológico. También fomenta el desarrollo y la modernización de la agricultura. Otra ventaja particular en esta comunidad de regantes es el uso del trasvase para la recuperación de los embalses creando un equilibrio hidrológico de forma local.

Por otra parte, crea un gran impacto visual con cientos de kilómetros de tubería ocupando territorio. Se crea un desequilibrio al mezclar aguas de diferentes cuencas, pudiendo llegar a crear un problema biológico grave.

Otro punto en contra es el coste y el posible malestar social. El coste tanto de la infraestructura como el coste energético es muy elevado y cuesta mucho amortizarlo, ya que el precio que realmente paga el usuario está



subvencionado. Todos estos aspectos generan malestar social, más aún en la población de la cuenca que suministra el agua.

Según Cabezas, Cabrera, Morell, (2008) Un problema de tipo administrativo es que el trasvase no tiene usuarios suficientes para la cantidad de agua que se piensa suministrar, no pudiendo cobrar una parte del coste de las obras. Por tanto, no existe posibilidad de recuperar la inversión realizada

Ya que la inversión para conectarse al trasvase está realizada y el precio final del agua del trasvase es más favorable que la suministrada por bombeo continúa siendo una buena opción de mejora a adoptar por la comunidad de regantes. Y de esta forma solucionar los problemas de presión, así como recuperar los embalses de forma conjunta. Su uso unido al del bombeo liberando los acuíferos de la zona que aportan agua a Solana y un riego por turnos es la opción del futuro siempre teniendo en cuenta el límite de volumen inyectado desde el trasvase que se dicta cada año. Por tanto, habría que ajustar el modelo con ese dato. Para realizar el riego por turnos se debería de realizar una inversión para automatizar la red de manera que los regantes no se preocupen del riego. Además, convendría realizar un análisis técnico de los cultivos para calcular de forma más exacta la cantidad de agua necesaria por parcela. Como se ha podido comprobar existen varios hidrantes con un consumo de agua muy alto si se compara con el resto de ellos y esto podría ser debido a un mal uso del recurso, por lo que con un riego adecuado a cada tipo de cultivo se podría ahorrar más en la factura eléctrica y en el consumo de recursos hídricos.



11. Referencias y bibliografía

Awumah, K., Bhatt, S. and Goulter, i. (1989). An integer programming model for layout design of water distribution networks. *Engineering Optimization*, 15(1), pp.57-70.

Cabrera, E., Almandoz, J., Arregui, F. and García-Serra¹, J. (1999). Auditoría de Redes de Distribución de agua. *Ingeniería del Agua*, [online] 6(4), pp.291-303. Available at: <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/download/6-4/article6.pdf> [Accessed 20 Jul. 2017].

Dirección General del Agua (2010). MARM *Estrategia para la modernización sostenible de los regadíos*. España: Horizonte, pp.11-14.

Erie, L.J. (2006). Management : A Key to Irrigation Efficiency. Proceedings of the ASCE 94, IR3:285- 293.

Fuertes, V.S., García-Serra, J., Iglesias, P.L., López, G., Martínez, F., Pérez, R. (2002). "Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua". *Grupo mecánica de fluidos*. Departamento Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Editorial UPV.

Fujiwara, O., Jenchaimahakoon, B. and Edirisinghe, N. (1987). A modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution networks. *Water Resources Research*, 23(6), pp.977-982.

Hernández, A. (2015). La modernización de regadíos. Situación actual y retos de futuro. *iagua*, 5(2), pp.128-136.

Martínez, F.J; Iglesias, P.L. (2014). Apuntes de la asignatura de Análisis y modelación de redes de abastecimiento de agua. Máster de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.



- Martinez, J. (2011). Quantifying the economy of flow distribution in water supply looped networks. *Journal of Hydroinformatics*, 13(4), p.687.
- Moreno Muñoz, D. (2014). Demanda de agua en Águilas. La influencia de las desaladoras en el Plan de Modernización de Regadíos. *GeoGraphos. Revista Digital para Estudiantes de Geografía y Ciencias Sociales*, 5.
- Planells, P., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M., (2007). Optimization of irrigation water distribution networks, layout included. *Agric. Water Manage.* 5(7), pp. 116 – 123.
- Planells Alandi, P., Tarjuelo Martín-Benito, J., Ortega Álvarez, J. and Casanova Martínez, M. (2001). Design of water distribution networks for on-demand irrigation. *Irrigation Science*, 20(4), pp.189-201.
- Reca, J. and Martínez, J. (2006). Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks. *Water Resources Research*, 42(5).
- Rossman, Lewis (2007). «EPANET 2.0». Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA.
- Sinai, G. (2011). Layout structure of multi-quality irrigation networks: I— introduction and layout types. *Irrigation and Drainage Systems*, 25(4), pp.179-195.
- Wardlaw, R. and Bhaktikul, K. (2004). Application of genetic algorithms for irrigation water scheduling. *Irrigation and Drainage*, 53(4), pp.397-414.



ANEJOS

A. DEMANDA ANUAL Y EN PERIODO ESTIVAL

Hidrante	Caudal promedio diario 2016 (l/s)	Caudal promedio diario estival (l/s)
100	2.988	6.819
102	29.422	28.525
104	8.559	23.799
106	12.077	36.120
108	10.616	22.283
110	0.666	1.337
112	23.017	40.318
114	31.696	61.616
116	0.108	0.148
118	52.245	152.370
120	6.296	11.129
122	0.509	1.353
124	80.831	187.671
126	21.512	51.334
128	49.407	102.723
130	125.737	338.764
132	149.470	222.391
136	43.610	76.163
138	84.827	216.342
140	7.499	12.898
142	105.259	235.025
144	104.668	201.844
148	11.958	8.808
150	3.010	7.855
152	0.015	0.011
154	0.482	0.913
156	26.166	56.339
158	17.988	27.785
160	5.918	10.684
162	6.782	7.633
164	45.288	55.540
166	44.353	95.629
168	0.606	1.163
170	0.450	1.087
172	6.374	16.888
176	0.361	0.721
178	13.077	28.964
180	2.359	4.153



182	0.180	0.329
184	2.164	2.381
186	2.432	4.638
188	1.711	2.762
190	5.351	10.975
192	12.609	29.334
194	21.184	48.100
196	13.899	29.943
198	6.052	15.557
200	1.656	2.837
202	1.155	2.727
204	25.813	74.461
206	3.269	6.309
208	1.847	3.580
212	13.745	34.315
214	0.909	1.444
216	1.840	4.815
218	35.915	79.094
220	13.958	27.138
222	4.650	9.351
224	12.055	24.809
226	0.874	1.527
228	1.085	2.120
230	4.598	5.743
232	2.448	4.639
234	0.197	0.285
236	1.050	1.912
238	1.718	3.068
240	8.817	19.549
242	17.573	35.581
244	24.102	60.974
246	15.219	34.432
248	1.220	2.797
250	0.688	1.535
252	5.905	11.293
256	5.304	13.091
258	14.416	30.968
260	2.005	0.613
262	308.637	466.043
264	1.013	0.462
266	1.586	3.819
268	2.914	5.242
270	0.093	0.183
272	0.450	0.747



274	24.019	41.981
276	2.403	5.014
278	0.229	0.348
280	63.013	133.569
282	22.347	37.460
284	1.977	3.977
286	5.250	9.940
288	13.013	26.739
290	5.430	10.804
292	122.312	263.481
294	22.865	56.964
298	1.644	3.142
300	4.204	7.918
302	5.212	8.770
304	0.737	1.372
306	16.469	35.560
308	0.018	0.018
310	1.206	2.334
312	0.849	2.047
316	236.809	215.335
318	16.466	38.567
320	3.163	8.142
322	0.495	0.266

Tabla 18. Caudales promedio

B. CAUDAL DEMANDADO MÁXIMO DIARIO

Hidrante	caudal medio (l/s)
100	9.059139785
102	105.1388889
104	29.88351254
106	41.13799283
108	25.40322581
110	2.144808743
112	47.6344086
114	33.109319
116	0.153985507
118	241.4516129
120	13.89814815
122	2.141577061
124	307.921147



126	64.10394265
128	204.3888889
130	527.5448029
132	317.078853
136	89.42708333
138	301.8100358
140	12.34259259
142	331.0752688
144	255.0179211
148	80.22222222
150	11.37037037
152	0.013736264
154	0.800120773
156	77.49103943
158	46.18055556
160	12.39247312
162	17.78703704
164	119.4802867
166	184.6326165
168	0.967741935
170	1.120218579
172	18.19892473
176	1.173835125
178	29.78494624
180	3.817204301
182	0.383454106
184	5.878136201
186	5.188172043
188	2.08781362
190	10.24193548
192	12.44444444
194	20.39426523
196	20.42592593
198	20.4390681
200	1.747311828
202	1.657407407
204	75.55555556
206	18.57407407
208	4.193548387
212	42.79143898
214	2.805555556
216	6.343351548
218	112.1684588
220	37.44444444

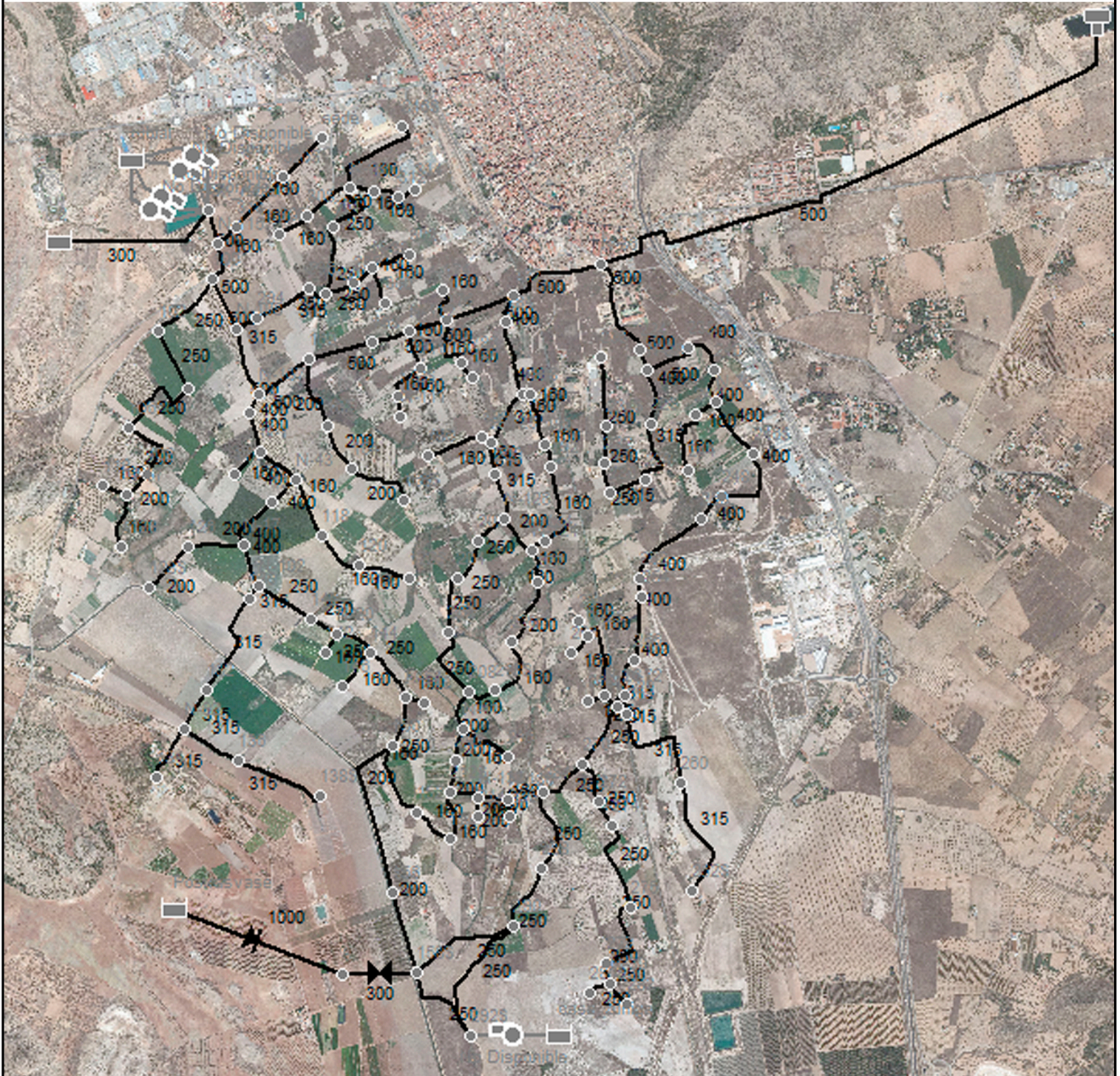


222	14.37037037
224	26.33680556
226	1.810035842
228	2.0609319
230	9.415708812
232	3.314814815
234	0.314009662
236	0.709541063
238	3.866120219
240	10.55555556
242	55.81541219
244	69.90740741
246	27.78673835
248	2.463768116
250	2.017304189
252	7.616487455
256	10.11648746
258	41.58602151
260	13.23476703
262	1005.055556
264	7.948028674
266	3.401639344
268	4.184587814
270	0.217391304
272	1.074074074
274	30.85125448
276	2.428315412
278	0.35326087
280	193.3781362
282	43.63799283
284	4.444444444
286	11.27959927
288	42.03125
290	11.97632058
292	389.7849462
294	48.61111111
298	6.451612903
300	11.80555556
302	8.494623656
304	1.684587814
306	45.27777778
308	0.018115942
310	2.455197133
312	2.965949821



316	317.7419355
318	55.65740741
320	16.1827957
322	4.370915033

Tabla 19. Caudal máximo demandado



PLANO:		
Plano general de la red		
AUTOR:		
Jose Luis Fuentes Catena		
ESCALA:	FECHA:	N°
1:10000	1/09/2017	1