



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



## RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Máster consiste en realizar el estudio de la eficiencia energética de una red de riego a presión ubicada en la localidad de Nules (Castellón). A partir de los datos facilitados por la Comunidad de Regantes de Nules-Mascarell se realiza el diagnóstico energético del sistema. Los resultados de dicho diagnóstico permiten obtener una visión del estado actual de la red y de las posibilidades de mejora que tiene. El siguiente paso es elaborar un modelo matemático que permita simular las condiciones del sistema. El programa escogido para diseñar dicho modelo es Epanet, y a partir de las simulaciones y los datos extraídos del mismo se realizan las auditorías hídricas y energéticas de la red. Una vez se conoce de forma detallada el estado del sistema se procede a estudiar una serie de medidas que aumenten la eficiencia energética del sistema, buscando obtener de este modo una reducción en el consumo energético. Tras analizar varias posibilidades se escoge la mejor propuesta y se procede a realizar un estudio de viabilidad económica para su implantación.



## RESUM

El present Treball Fi de Master consistix en realitzar l'estudi de la eficiència energètica d'una xarxa de reg a pressió ubicada en la població de Nules (Castelló). A partir de les dades facilitats per la Comunitat de Regants de Nules-Mascarell es realitza el diagnòstic energètic del sistema. Els resultats d'aquest diagnòstic permet obtindre una visió de l'estat actual de la xarxa i de les possibilitats de millora que té. El següent pas és fer un model matemàtic que permet fer simulacions de les condicions que es donen al sistema. El programa triat per a dissenyar aquest model es Epanet, i a partir de les simulacions i les dades extrets del mateix es realitzen les auditories hídriques i energètiques de la xarxa. Una vegada es coneix de forma detallada l'estat del sistema es procedix a estudiar una sèrie de mesures que augmenten l'eficiència energètica, buscant obtindre d'esta manera una reducció en el consum energètic. Després d'analitzar diverses possibilitats es tria la millor proposta i es procedix a realitzar un estudi de viabilitat econòmica per a la seua implantació.



## **ABSTRACT**

This Master Thesis consists of a study of a pressure irrigation network located in Nules (Castellón). From the data provided by the company, an energy assessment of the system has been executed. The results of this data diagnosis have enabled us to obtain a vision of the real state of the network and the possible improvements that could occur in the future. The next step is to create a mathematical model, which simulates the conditions of the system. An energy and hydric audit has been carried out since the simulations and theoretical data were obtained from the model. The study of several measures, which could improve the energy efficiency began when the condition of the network was established. Following the analysis of the different proposals, a feasibility study of one of these proposals has been done.



# Índice

## Capítulo 1: Memoria

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1. BINOMIO AGUA-ENERGÍA .....	2
1.2. SITUACIÓN ACTUAL .....	3
1.2.1. <i>Situación en España</i> .....	3
1.2.1.1. Agricultura .....	4
1.3. RIEGO BAJO DEMANDA FRENTE A RIEGO POR TURNOS .....	6
1.4. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.....	7
<b>2. COMUNIDAD GENERAL DE REGANTES NULES-MASCARELL. ....</b>	<b>9</b>
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA RED .....	9
2.2. DATOS PROPORCIONADOS .....	10
2.2.1. <i>Consumo de los hidrantes</i> .....	10
2.2.2. <i>Planos de la red en CAD</i> .....	11
2.2.3. <i>Consumos de la estación de bombeo</i> .....	12
2.2.4. <i>Datos referentes a la estación de bombeo</i> .....	12
2.2.5. <i>Organización del riego</i> .....	12
2.3. TRABAJOS Y CÁLCULOS INICIALES.....	12
2.3.1. <i>Recopilación de la cota de los hidrantes y del cabezal de riego</i> .....	12
2.3.2. <i>Cálculo de la demanda base</i> .....	12
2.4. PROBLEMAS CON LOS CONTADORES DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO .....	13
<b>3. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO .....</b>	<b>14</b>
3.1. SISTEMA IDEAL .....	14
3.2. SISTEMA REAL .....	15
3.3. CÁLCULO DE LOS RENDIMIENTOS.....	16
3.4. RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO.....	17
3.5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	18
<b>4. CREACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA RED EN EPANET.....</b>	<b>19</b>
4.1. INTRODUCCIÓN DE LOS PATRONES DE DEMANDA .....	20
4.1.1. <i>Cálculo de los patrones de demanda</i> .....	20
4.2. CONFIGURACIÓN DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO .....	22
4.2.1. <i>Control de las bombas</i> .....	24
<b>5. AUDITORÍA HÍDRICA .....</b>	<b>26</b>
5.1. PÉRDIDAS DE AGUA .....	26
5.1.1. <i>Tipos de pérdida de agua</i> .....	26
5.1.2. <i>Causantes de las pérdidas de agua</i> .....	27
5.1.3. <i>Problemas causados por las pérdidas de agua</i> .....	28
5.2. INTRODUCCIÓN DE LAS FUGAS EN EPANET .....	28
5.2.1.1. <i>Cálculo específico del Periodo 3</i> .....	29
5.3. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA HÍDRICA.....	29
<b>6. ANÁLISIS DE LA RED.....</b>	<b>32</b>

6.1.	INTRODUCCIÓN .....	32
6.2.	CASO 1, MÁXIMO CAUDAL.....	33
6.3.	CASO 2, CAUDAL MÍNIMO .....	36
<b>7.</b>	<b>AUDITORÍA ENERGÉTICA.....</b>	<b>40</b>
7.1.	BALANCE ENERGÉTICO .....	40
7.2.	PROGRAMA INFORMÁTICO (ITAENERGY) .....	42
7.2.1.	<i>Valores obtenidos mediante el ITAEnergy</i> .....	42
7.2.1.1.	Balace hídrico .....	42
7.2.1.2.	Auditoría energética.....	42
7.2.1.3.	Indicadores del estado de la red .....	43
7.3.	RESULTADOS OBTENIDOS .....	45
7.3.1.	<i>Resultados del periodo 2</i> .....	45
7.3.2.	<i>Resultados periodo 6</i> .....	49
7.3.3.	<i>Resultados globales</i> .....	52
7.3.3.1.	Energía aportada .....	52
7.3.3.2.	Energía consumida .....	54
7.3.3.3.	Indicadores .....	56
<b>8.</b>	<b>MEJORAS PROPUESTAS.....</b>	<b>58</b>
8.1.	ALCANZAR LA PRESIÓN MÍNIMA .....	58
8.1.1.	<i>Añadir una nueva bomba</i> .....	58
8.1.2.	<i>Sustituir los tramos con mayores pérdidas</i> .....	59
8.1.3.	<i>Redistribuir los turnos de riego (cada turno riega 1 hora)</i> .....	60
8.1.3.1.	Modificación 1 .....	60
8.1.3.2.	Modificación 2 .....	61
8.1.4.	<i>Redistribución de turnos de riego, (cada turno riega 2 horas)</i> .....	62
8.1.5.	<i>Análisis y conclusiones</i> .....	63
8.1.5.1.	Periodo 5 (10 horas) .....	64
8.1.5.2.	Periodo 7 (8 horas) .....	65
8.2.	MEDIDAS DE MEJORA SOBRE EL ESTADO ACTUAL .....	65
8.2.1.	<i>Disminución de pérdidas por fricción</i> .....	66
8.2.2.	<i>Eliminación del exceso de energía mediante ajuste de la E.B.</i> .....	69
8.2.3.	<i>Ajuste de los turnos de riego y de la estación de bombeo</i> .....	70
<b>9.</b>	<b>ANÁLISIS DETALLADO DE LA PROPUESTA SELECCIONADA.....</b>	<b>75</b>
9.1.	INTRODUCCIÓN .....	75
9.2.	FUNCIONAMIENTO ESTACIÓN DE BOMBEO .....	75
9.3.	AHORRO ECONÓMICO .....	76
9.4.	ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD .....	78
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIÓN .....</b>	<b>80</b>
<b>11.</b>	<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>82</b>
 <b>Capítulo 2: Anexos</b> 		
<b>1.</b>	<b>PRESUPUESTO.....</b>	<b>83</b>
<b>2.</b>	<b>ENSAYO DE BOMBAS.....</b>	<b>83</b>
<b>3.</b>	<b>PLANO DE LA RED ACTUAL.....</b>	<b>83</b>

## Índice de ilustraciones

<i>Tabla 1: Evolución del consumo de energía destinada a riego (Fuente: INE).....</i>	<i>2</i>
<i>Tabla 2: Datos de la red 1 .....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 3: Datos de los diferentes periodos de riego .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 4: Energía suministrada ideal de la red.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 5: Energía suministrada real de la red .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 6: Rendimientos de la red.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 7: Fechas de inicio y fin de los periodos de riego.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 8: Porcentaje del caudal proporcionado en cada uno de los turnos de riego .....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 9: Cálculo del número de horas regadas por turno y por día regado para el periodo 1.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 10: Número de horas por turno a introducir en Epanet en cada periodo .....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 11: Factor corrector de la hora.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 12: Factor corrector de cada turno para el patrón de demanda.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 13: Patrones de demanda para cada turno y periodo.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 14: Datos extraídos del ensayo de las bombas .....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 15: Calificación de un red según su porcentaje de pérdidas .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 16: Datos periodo 3.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 17: Características de los periodos.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 18: Resultados auditoría hídrica.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 19: Esquema en el que se divide un balance energético .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 20: Términos intervinientes en la auditoría energética. Fuente: Cabrera E, y col 2010. ....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 21: Porcentajes de volumen inyectado por turnos.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 22: Funcionamiento de la estación de bombeo en el periodo 2 .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 23: Resultados de la auditoría energética del periodo 2.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 24: Indicadores del periodo 2 .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 25: Funcionamiento de la estación de bombeo en el periodo 6.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 26: Resultados de la auditoría energética del periodo 6.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 27: Indicadores del periodo 6 .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 28: Análisis del periodo más crítico .....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 29: Modificación presión mínima en zona A, mediante sustitución de tuberías.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 30: Modificación de la presión mínima en la zona B, mediante sustitución de tuberías.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 31: Resultados tras igualar el caudal de riego en todos los turnos.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 32: Resultados tras modificar el número de horas de riego.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 33: Análisis del periodo más desfavorable .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 34: Resultados tras igualar los caudales en los diferentes turnos.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 35: Variación del periodo 5 tras implantación de mejora para alcanzar la presión mínima.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 36: Variación del periodo 7 tras implantación de mejora para alcanzar la presión mínima.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 37: Cambios de los tramos de tubería.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 38: Energía consumida tras los cambios de tuberías .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 39: Ahorro económico tras la aplicación de la medida .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 40: Coste de aplicación de la medida .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 41: Análisis viabilidad de la medida .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 42: Energía consumida tras ajuste de la estación de bombeo .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 43: Ahorro económico debido al ajuste de la estación de bombeo.....</i>	<i>70</i>

Tabla 44: Reorganización de los turnos de riego .....	71
Tabla 45: Consumo energético tras aplicación de la medida.....	72
Tabla 46: Rendimiento de las bombas en el periodo 5 actualmente y tras modificación .....	72
Tabla 47: Precio del término variable y fijo de la energía eléctrica .....	72
Tabla 48: Ahorro económico debido al reajuste de los turnos .....	73
Tabla 49: Ahorro en el consumo energético.....	73
Tabla 50: Ahorro económico anual .....	73
Tabla 51: Rendimientos de los elementos de la estación de bombeo.....	76
Tabla 52: Coste real asociado al consumo de energía .....	76
Tabla 53: Potencia contratada en cada periodo eléctrico.....	77
Tabla 54: Importe de la factura eléctrica con la aplicación de las medidas propuestas.....	77
Tabla 55: Importe real de la factura eléctrica año 2.016.....	78
Tabla 56: Análisis de viabilidad económica.....	79

## Índice de gráficas

Gráfica 1: Evolución de la población mundial (Fuente: blinklearning.com) .....	3
Gráfica 2: Evolución de la población española ( Fuente: INE ) .....	4
Gráfica 3: Evolución de la superficie regada en España ( Fuente: INE ) .....	5
Gráfica 4: Evolución del consumo de agua destinada al riego en España ( Fuente: INE ).....	5
Gráfica 5: Evolución de los distintos tipos de riego en España ( Fuente: INE ) .....	6
Gráfica 6: Introducción del patrón de demanda en el programa Epanet.....	22
Gráfica 7: Curva de bombeo de la bomba.....	24
Gráfica 8: Curva de rendimiento de bomba .....	24
Gráfica 9: Curvas de las bombas .....	33
Gráfica 10: Punto de funcionamiento y de rendimiento de las bombas de velocidad fija .....	35
Gráfica 11: Punto de funcionamiento y de rendimiento de la bomba de velocidad variable .....	36
Gráfica 12: Curva característica de las tres bombas acopladas.....	36
Gráfica 14: Punto de funcionamiento y de rendimiento bomba de velocidad variable .....	38
Gráfica 13: Punto de funcionamiento y de rendimiento bomba de velocidad fija .....	38
Gráfica 15: Curva característica con las 2 bombas acopladas .....	39
Gráfica 16: Energía total aportada en el periodo 2.....	47
Gráfica 17: Energía consumido en el periodo 2.....	48
Gráfica 18: Energía aportada en el periodo 6 .....	51
Gráfica 19: Energía consumida durante el periodo 6.....	51
Gráfica 20: Comparativo energía aportada y volumen inyectado .....	53
Gráfica 21: Porcentaje de energía aportada de cada una de las bombas .....	54
Gráfica 22: Comparativo energía entregada y energía consumida en pérdidas.....	54
Gráfica 23: Reparto de la energía entregada.....	55
Gráfica 24: Reparto de la energía perdida.....	56
Gráfica 25: Resumen de los indicadores de gestión.....	57
Gráfica 26: Punto de funcionamiento del periodo 3 en el escenario propuesto .....	71

## Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1: Área de los dos sectores de la Comunidad General de Regantes de Nules-Mascarell .....</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 2: Archivo de la red en CAD proporcionado por la comunidad de regantes .....</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 3: Diagnóstico energético de una red ideal .....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 4: Ejemplo de la red con el fondo de pantalla utilizado.....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 5: Ejemplo configuración de la estación de bombeo en Epanet .....</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 6: Controles de la estación de bombeo .....</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 7: Esquema de pérdidas en una red de agua a presión .....</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 8: Zonas con problemas de presiones.....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 9: Presiones en el turno de máximo caudal.....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 10: Pérdidas unitarias en la Zona A en el momento más crítico .....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 11: Mapa de presiones de los nudos con caudal mínimo inyectado .....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 12: Pérdidas unitarias en la zona A en el momento de menor caudal .....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 13: Volumen de control y elementos intervinientes en el balance energético .....</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 14: Ejemplo ventana del ITAEnergy.....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 15: Pérdidas unitarias en dirección a la Zona A.....</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 16: Pérdidas unitarias en dirección a la Zona B.....</i>	<i>67</i>



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

## Estudio de la eficiencia energética de la red de riego abastecida por el cabezal número uno en el término de Nules



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALÈNCIA

# Capítulo 1: Memoria

# 1. Introducción

## 1.1. Binomio agua-energía

La historia del ser humano siempre ha ido ligada con la presencia de los recursos hídricos, y en dicha relación la energía ha jugado un papel fundamental.

Analizando el agua como generador de energía, el primer y más claro ejemplo es el de la rueda hidráulica. Se utilizaba la energía del agua para mover una rueda y efectuar la molienda del grano y otros usos de un estilo similar. Pero desde principios del siglo XX, se comienza a usar el agua para mover grandes turbinas hidráulicas y de este modo generar energía eléctrica. Uso que se sigue dando en la actualidad.

Analizando el otro lado del binomio, es decir, la utilización de la energía para el transporte de agua, y focalizando dicho análisis en el regadío, se llega a la conclusión de que todo había seguido igual durante siglos, y que el cambio se produjo a partir de la segunda mitad del siglo pasado. Hasta 1950, el transporte del agua para el riego se realizaba en su práctica totalidad mediante gravedad y el tipo de riego empleado era a manta, por lo que prácticamente no se utilizaba energía eléctrica.

AÑO	SUPERF (MILES HA)	Consumo de Agua (hm <sup>3</sup> )	Consumo de energía (GWh)
1900	1000	5400	0
1930	1350	7594	182
1940	1500	8288	191
1950	1500	8353	309
1970	2200	12320	1056
1980	2700	14648	2093
1990	3200	17681	3480
2000	3400	16897	4893
2007	3360	16250	5866

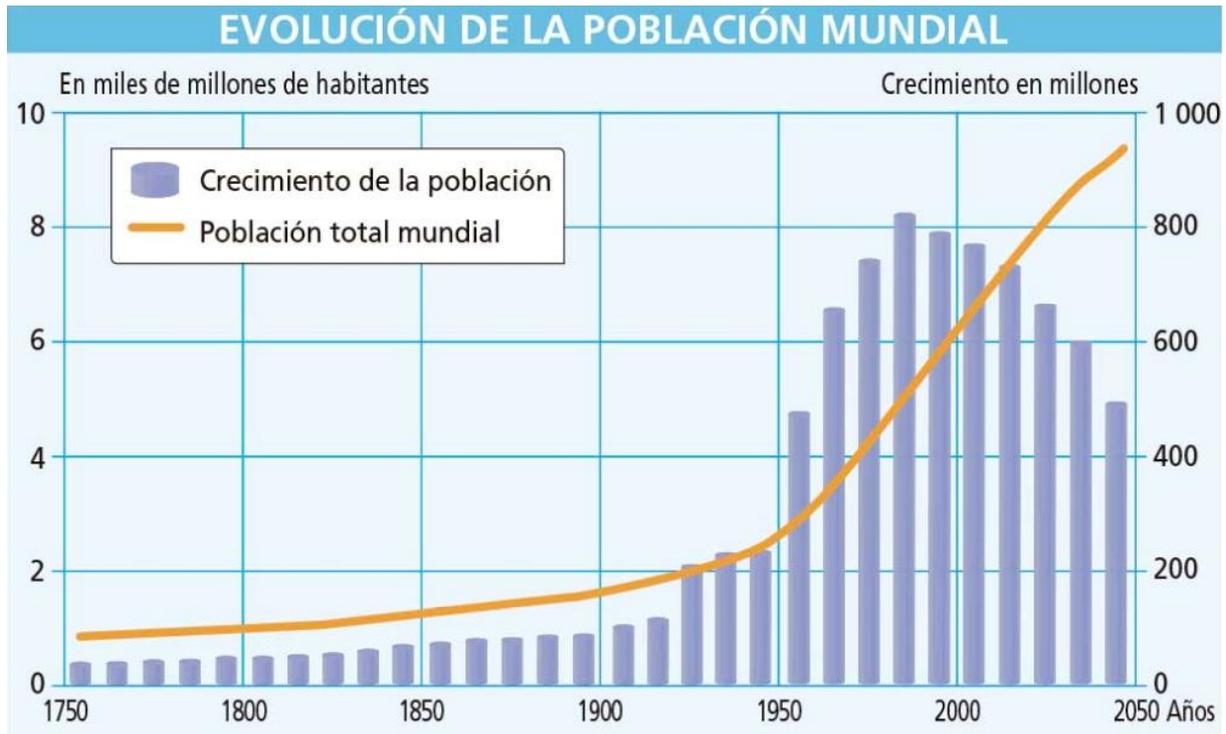
Tabla 1: Evolución del consumo de energía destinada a riego (Fuente: INE)

En la tabla anterior se aprecia como desde el año 1900 la superficie de regadío ha ido aumentando de forma más o menos constante. Si se observa ahora el consumo de agua dedicado al riego, se aprecia una tendencia parecida a la de la superficie regada salvo en su tramo final. En las últimas dos décadas se puede ver como el consumo de agua se ha estabilizado frente al aumento de la superficie, e incluso, dependiendo del año, ha llegado a disminuir.

Esta disminución del consumo de agua sólo se puede entender si se tienen en cuenta las nuevas técnicas de riego a presión, ya sea por goteo, por aspersión etc... Estas nuevas tecnologías realizan una mejor gestión del consumo del agua, lo que se traduce en un menor consumo para regar la misma superficie. Sin embargo, al tener que regar a presión, es necesario aportar energía al agua. Todo esto se puede observar en la última columna, donde se aprecia como el consumo de energía relacionado con el riego se ha disparado en las últimas décadas.

## 1.2. Situación actual

La población mundial ha sufrido un crecimiento exponencial desde mediados del siglo pasado. De esta forma, se ha pasado de una población de 2.500 millones de personas en el año 1950, a 7.300 millones en 2015, y según una estimación de Naciones Unidas, en 2030 la población será de 8.500 millones, de 9.700 para 2050 y en 2100 se alcanzará los 11.200 millones de personas. Dicha evolución se puede observar en la gráfica que se adjunta a continuación.

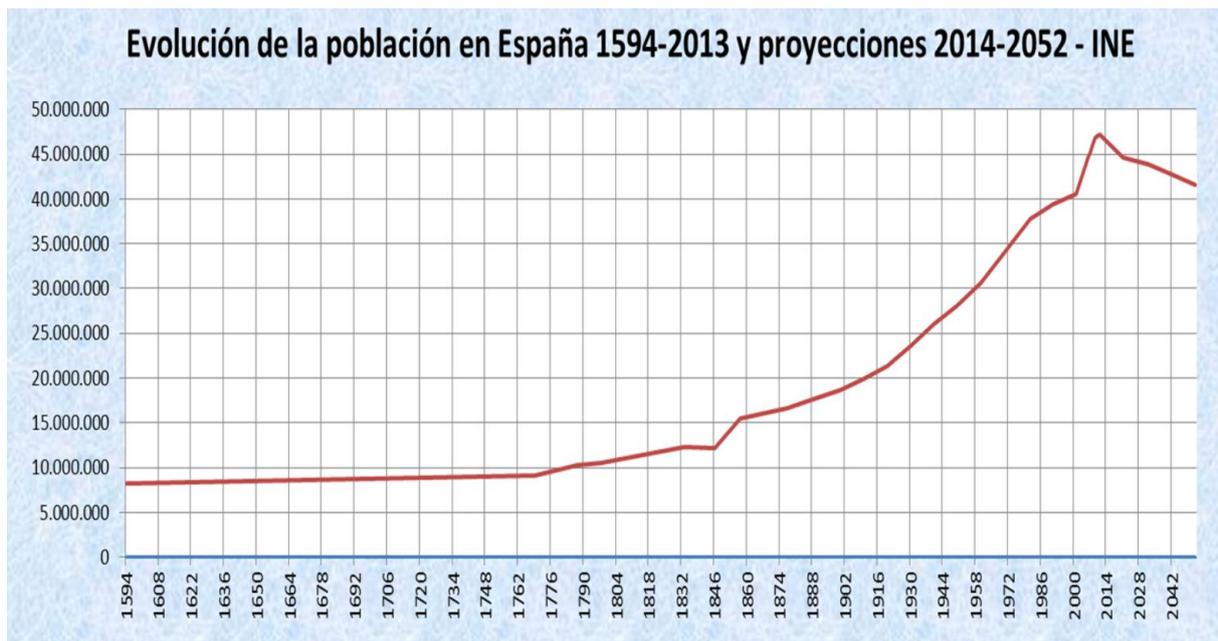


Gráfica 1: Evolución de la población mundial (Fuente: blinklearning.com)

Unido al aumento de la población, el nivel de vida ha aumentado de forma considerable, lo que conlleva que en la actualidad se están explotando hasta el límite los diferentes recursos naturales, y el agua no es una excepción. Es pues prioritario empezar a realizar un uso razonable y sostenible de ellos.

### 1.2.1. Situación en España

Tal y como ha pasado a nivel mundial, la población española ha aumentado de forma considerable durante el último siglo, de hecho entre los años 1.900 y 2.000 la población se triplicó, tal y como se puede ver en la gráfica siguiente:



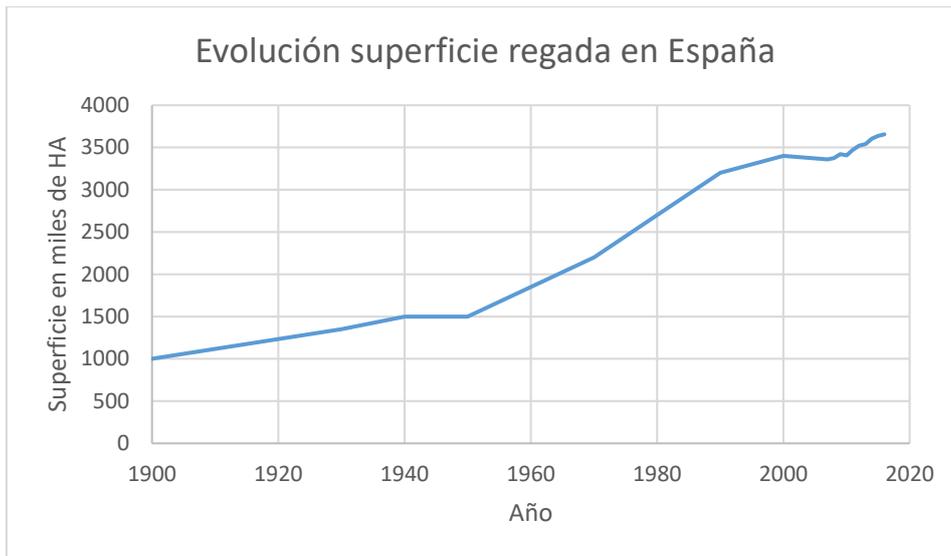
Gráfica 2: Evolución de la población española ( Fuente: INE )

Este aumento de la población, unido con una mejora en la calidad de vida de las familias provocó, como era de esperar, un aumento en el consumo de agua por parte de los españoles. En los últimos años se está tomando conciencia con la problemática del agua y la sequía, lo que ha provocado una disminución en el consumo de agua por habitante que se sitúa en 130 litros/habitante día según datos del INE del 2016. Siguiendo con el apartado del consumo doméstico, cabe destacar que si bien los ciudadanos cada vez toman más conciencia del problema del agua, el envejecimiento progresivo de la red de abastecimiento de agua provoca que cada vez haya más fugas.

#### 1.2.1.1. Agricultura

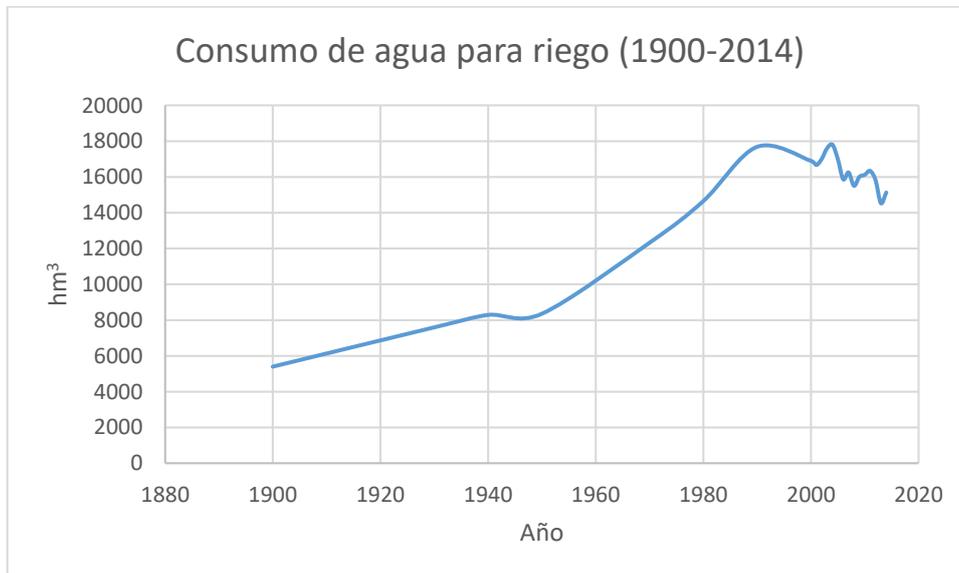
Si bien es importante el consumo de agua en los hogares, no hay que olvidar que el mayor consumidor de agua de España es la agricultura con un 75% según datos del INE. Es por ello que a continuación se realiza una explicación más detallada de su evolución y de su situación actual.

Tal y como pasó con la población española, a partir de mediados del siglo pasado la superficie regada en España experimentó un fuerte crecimiento hasta el inicio del presente siglo. De esta forma se ha pasado de regar 1.500.000 de hectáreas en el año 1950 a 3.400.000 en el año 2000. Toda esta información se puede observar mejor en la siguiente gráfica:



Gráfica 3: Evolución de la superficie regada en España ( Fuente: INE )

Todo este aumento de terreno que se destinaba a la agricultura de regadío, provocó un aumento del agua que se destinaba a la agricultura. Al menos así ocurrió hasta los años 90, momento en el cual pese a que se seguía aumentando la superficie que se destinaba a riego, el consumo de agua cambió de tendencia y comenzó un ligero descenso que se mantiene hasta la actualidad.

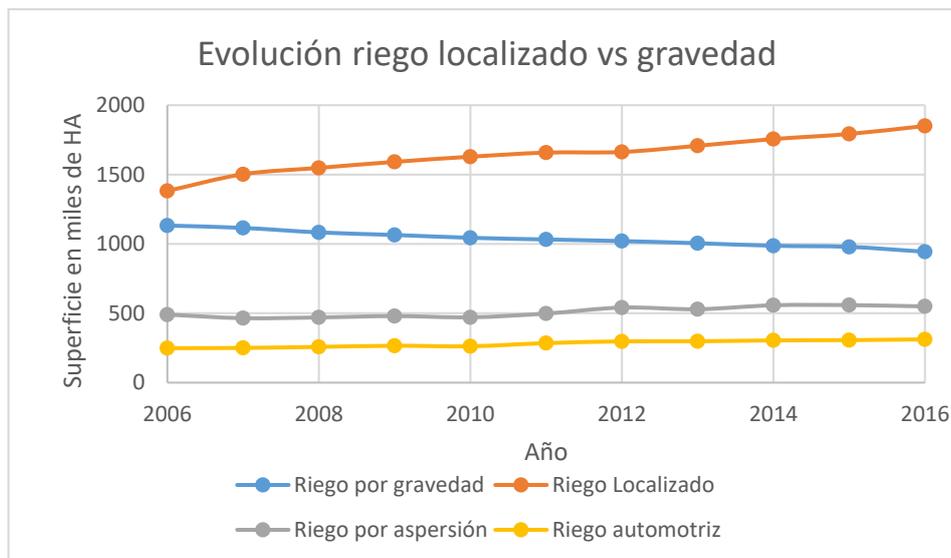


Gráfica 4: Evolución del consumo de agua destinada al riego en España ( Fuente: INE )

En la gráfica superior se puede observar lo explicado anteriormente. El motivo de este cambio de tendencia es la introducción de nuevas técnicas de riego que, progresivamente, han ido sustituyendo al riego tradicional por gravedad. De esta forma, en España han ido cobrando importancia otras técnicas de riego como son el riego localizado, por aspersión y el automotriz.

Con estas nuevas técnicas se consigue realizar un uso más eficiente del agua, lo que ha permitido reducir el consumo de agua pese al aumento de la superficie regada, pero ello se consigue pagando un peaje, el consumo de energía. Como ya se ha comentado anteriormente, en el pasado la práctica totalidad del riego se hacía por gravedad, método con el que no se consumía prácticamente energía. Sin embargo, todas estas nuevas técnicas de riego requieren presurizar el agua. Esto ha supuesto un importante coste a los agricultores, y a nivel medioambiental ha supuesto un aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

A continuación, se adjunta la evolución de la superficie de suelo regada por cada una de las diferentes técnicas de riego.



Gráfica 5: Evolución de los distintos tipos de riego en España (Fuente: INE)

Como se puede observar, el riego localizado (o por goteo) es la técnica más empleada en España con diferencia (datos extraídos del INE y del MAPAMA en sus Informes Anuales de Regadíos), y la superficie regada con este método continúa aumentando a costa del riego por gravedad, que ocupa la segunda posición pese a que lleva años de retroceso. El tercer método más utilizado es el riego por aspersión, seguido del automotriz, que, como se puede ver en la gráfica anterior, se han mantenido constantes a lo largo de la última década.

La tendencia indica que poco a poco irá desapareciendo el riego por gravedad, debido a que es el que solicita una mayor cantidad de agua, mientras que el riego localizado o por goteo seguirá aumentando. El presente trabajo busca mejorar la eficiencia de la red de riego localizado presente en la localidad castellonense de Nules, pero antes es importante hablar de las dos formas principales de riego, el riego bajo demanda frente al riego por turnos.

### 1.3. Riego bajo demanda frente a riego por turnos

Principalmente existen dos formas de organizar una red de riego a presión, ya sea ésta por goteo, aspersión o automotriz. El riego bajo demanda del agricultor, o la organización del riego por turnos.

Tradicionalmente las redes se organizaban para ofrecer riego bajo demanda. Esta elección permite al agricultor tener una gran libertad, ya que puede elegir la hora y el tiempo que riega, y se contabiliza el volumen inyectado.

Sin embargo, esta situación está cambiando, y gracias a los sistemas de telecontrol más comunidades de regantes se están pasando al riego por turnos ya que es más eficiente. La principal ventaja que tiene frente al riego bajo demanda es que el caudal de diseño se ve reducido, especialmente en los tramos terminales de la red. Esto ocurre porque, en una red de distribución bajo demanda, se tiene que trabajar con la hipótesis de que todos los agricultores quieran regar a la vez. Todo esto se traduce en que una red de riego que se organiza por turnos requiere de unos diámetros de tuberías más pequeños.

El segundo ahorro económico en una red de riego por turnos se obtiene al escoger regar en las horas en las que la energía eléctrica es más barata, esto es en el período valle que se produce durante la noche. Además, este tipo de redes cuentan normalmente con un sistema de telecontrol, por lo que no es necesario la presencia del agricultor en el campo en el momento en el que se produce el riego.

#### 1.4. Motivación y objetivos

El binomio agua-energía es una pareja que ya está ligada, y que lo continuará estando para siempre, por esa razón cuando se traten los problemas del agua tales como fugas, planificación, gestión, distribución etc... se debe de hacer desde un enfoque que permita tener en cuenta el consumo energético que acarrearán. Las razones no son únicamente medioambientales, para intentar reducir al mínimo las emisiones de CO<sub>2</sub> ligadas a la distribución del agua, sino también económicas.

Toda esta problemática es lo que motiva la realización del presente proyecto, que en este caso estudiará una red de riego localizado situada en la comarca de la Plana Baja, pero que se puede extrapolar y aplicar a cualquier red de distribución de agua a presión, sea para riego o de agua potable.

El objetivo fundamental del presente proyecto es mejorar la eficiencia de la red de riego de la Comunidad General de Regantes de Nules-Mascarell en la localidad de Nules (Castellón), y concretamente la red abastecida por el cabezal número uno. La meta es reducir el consumo de agua y el consumo energético por parte de la comunidad de regantes, si se logra, ambas cosas supondrían un ahorro económico.

A continuación, se detallan las distintas fases en las que se ha estructurado el proyecto y la memoria:

- Estudio detallado de la red de riego a presión. Para ello se utilizan los datos y la información proporcionada por la Comunidad General de Regantes de Nules-Mascarell, además de la toma de datos in situ.
- Realización de un diagnóstico energético de la red para saber su estado actual y las posibilidades de mejora.
- Diseño de un modelo informático que simule la red gracias al programa Epanet.

- Elaboración de una auditoría hídrica y energética a partir de los resultados obtenidos por el modelo de la red en Epanet.
- Interpretación de los resultados obtenidos por las auditorías y posibles propuestas de mejora.
- Evaluación y realización de un estudio económico de la propuesta de mejora seleccionada.

## 2. Comunidad General de Regantes Nules-Mascarell.

### 2.1. Descripción general de la red

Nules es una localidad ubicada en la provincia de Castellón, concretamente en la comarca de la Plana Baja. Actualmente cuenta con una población de 13.266 habitantes según el padrón de 2017, y la superficie del municipio es de 50,5 km<sup>2</sup>. El núcleo urbano principal de Nules se encuentra a unos 5 km de la playa, donde se ubica los Poblados Marítimos – Playa de Nules. Además, en el municipio hay otro núcleo de población Mascarell, un pequeño poblado totalmente amurallado y que da parte del nombre a la comunidad de regantes.

El terreno comprendido entre los núcleos de población de Nules y Mascarell, y el marjal o la playa, es la superficie de cultivo que abastece la Comunidad General de Regantes de Nules-Mascarell. El tipo de cultivo predominante en esta zona es el cítrico, y el método de riego empleado es el localizado.

La Comunidad General de Regantes Nules-Mascarell nace en el 2005 cuando se decide modernizar el regadío en la localidad. Con esta mentalidad se unen tres comunidades de regantes que hasta entonces habían operado de forma independiente:

- *Comunidad de Regantes de Nules*
- *Comunidad de Regantes de Mascarell*
- *Comunidad de Regantes de Fortuna-Marjalería*

Las dos primeras comunidades cuentan con siglos de historia desde su constitución, mientras que la de Fortuna-Marjalería se creó en la década de los 70.

La Comunidad General de Regantes de reciente creación actualmente da servicio de agua a más de 2000 comuneros, lo que equivale en términos de superficie, a algo más de 1050 hectáreas. Para abastecer a este vasto territorio, la comunidad cuenta con dos redes independientes entre sí que bombean desde dos cabezales. El sector nº1, y del cual se va a realizar el presente proyecto, es el denominado *Nules-Mascarell*, con un total de 427 hectáreas, y que se organiza en torno al cabezal de *L'Horta de Mascarell*. El sector nº2, por su parte, abastece a unas 623 hectáreas desde el cabezal *Les Sorts de l'Alcúdia*, y es conocido como *Fortuna-Marjalería*.

El cabezal del sector nº1 cuenta con una balsa de 13.601 m<sup>3</sup>, y sus caudales proceden de la *Séquia Major de Nules* y el *Pou de Sant Frances de Assís*. El cabezal del sector nº2 por su parte cuenta con una capacidad para 16.167 m<sup>3</sup>, y se nutre de las aguas de los pozos de *San Juan Bautista-La Progresiva*, *San Juan de la Marjalería*, *San Juan de Chavalí* y de las aguas provenientes del sector de riego nº1. Ambos cabezales poseen tres bombas en paralelo con la misma curva característica. Los dos sectores bombean en directo, y cada cabezal cuenta con dos bombas de velocidad fija y una de velocidad variable.

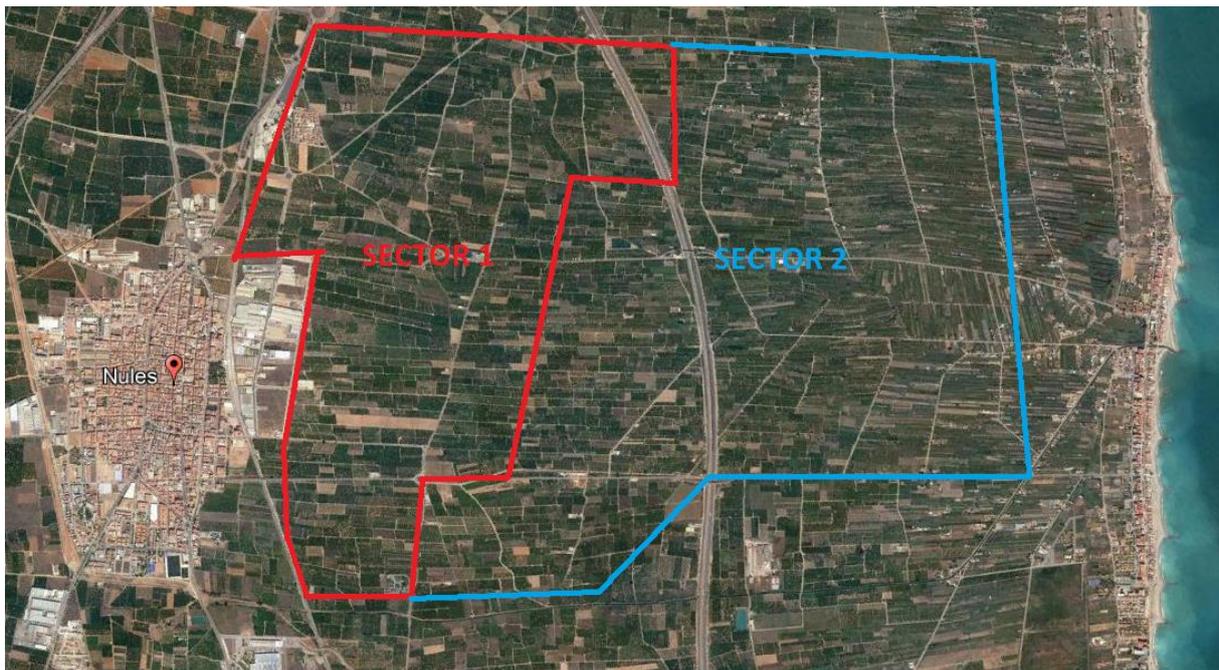


Ilustración 1: Área de los dos sectores de la Comunidad General de Regantes de Nules-Mascarell

Analizando con más detalle el sector nº1, y a partir de los datos aportados por la comunidad de regantes, se ha elaborado la siguiente tabla resumen del sector de riego.

<b>Años de la red</b>	8
<b>Número de hidrantes</b>	205
<b>Cota máxima de la red (m)</b>	13
<b>Cota mínima de la red (m)</b>	3
<b>Cota del cabezal (m)</b>	5
<b>Presión mínima de servicio (mca)</b>	30
<b>Superficie regable (hectáreas)</b>	427,3
<b>Superficie regada (hectáreas)</b>	331,4
<b>Longitud de las tuberías de la red (km)</b>	33,2

Tabla 2: Datos de la red 1

## 2.2. Datos proporcionados

Los datos a partir de los cuáles se ha realizado el presente proyecto han sido facilitados por la Comunidad de Regantes de Nules-Mascarell, a excepción de las cotas de los hidrantes que se obtuvieron por medio de un altímetro y del programa Google Earth.

### 2.2.1. Consumo de los hidrantes

La red de riego de Nules-Mascarell, tanto en el sector nº1 como en el nº2, contiene un número determinado de hidrantes, que son los que actúan como puntos de consumo. Cada uno de estos hidrantes abastece a un número de parcelas, que se van regando por turnos.

La información proporcionada consistía en una hoja Excel, dividida en 7 períodos a lo largo de todo el año 2016, y que contenía el consumo por hidrante, y dentro de cada uno de los hidrantes el desglose por parcelas. Además, se indicaba en cada uno de los períodos el número de horas que se había regado en cada turno.

	Fecha de inicio	Fecha de fin	Horas de riego/turno
Período 1	31/12/2015	27/02/2016	31
Período 2	27/02/2016	30/04/2016	54
Período 3	30/04/2016	1/07/2016	75
Período 4	1/07/2016	5/08/2016	64
Período 5	5/08/2016	3/09/2016	58
Período 6	3/9/2016	31/10/2016	107
Período 7	31/10/2016	22/11/2016	21

Tabla 3: Datos de los diferentes periodos de riego

Como se observa en la tabla anterior no hay datos del mes de diciembre, y es que en este mes no se regó.

### 2.2.2. Planos de la red en CAD

Desde la Comunidad de Regantes Nules-Mascarell se facilitó un plano de la red en papel y también en formato digital (dwg).



Ilustración 2: Archivo de la red en CAD proporcionado por la comunidad de regantes

### 2.2.3. Consumos de la estación de bombeo.

Para elaborar el diagnóstico energético y la posterior auditoría energética es vital saber la energía que se ha invertido en el bombeo del agua. Por ello desde Nules se proporcionó las facturas de todo el año 2016, y desglosadas en cada uno de los 7 periodos. Aclarar que la facturación de las estaciones de bombeo de los cabezales 1 y 2 es conjunta. Para saber la energía que se invertía en el bombeo de agua en cada red, desde la comunidad se indicó que el 60% de la energía se consumía en el cabezal nº1 y el 40% en el cabezal nº2.

### 2.2.4. Datos referentes a la estación de bombeo

La Comunidad de Regantes de Nules-Mascarell proporcionó las características técnicas de las bombas que tienen en la estación de bombeo del cabezal nº1. Además, en dichas instalaciones tienen dos contadores que contabilizan el caudal inyectado a la red. Este dato para el período 2016 también fue entregado. Reseñar que el valor del volumen inyectado obtenido por estos dos contadores no era del todo fiable pues habían tenido problemas, por lo que el caudal inyectado no se sabe a ciencia cierta cuál es. Posteriormente se explicará con más detalle dicho problema y la forma en la que se decidió actuar para poder trabajar con un valor de volumen inyectado.

### 2.2.5. Organización del riego

Desde la Comunidad General de Regantes se proporcionó los siguientes datos:

- Número de turnos de riego.
- Porcentaje de volumen inyectado que se lleva cada uno de los turnos.
- Listado de los días que se ha regado, así como de las horas por turno que se regó.

## 2.3. Trabajos y cálculos iniciales

A continuación, se exponen una serie de cálculos y trabajos previos que, junto al resto de información proporcionada por la Comunidad General de Regantes de Nules-Mascarell, suponen la base para realizar el estudio.

### 2.3.1. Recopilación de la cota de los hidrantes y del cabezal de riego

Conocer la cota de los hidrantes y del cabezal de riego es imprescindible para realizar un modelo de la red en Epanet. Para obtener dicha información, se procedió a medir in situ mediante un alfilerómetro la cota de los hidrantes más representativos. A partir de dicha información, y mediante el programa Google Earth, se logró extrapolar las cotas del resto de hidrantes. Además, se pudo comprobar mediante la cota de los hidrantes tomadas con alfilerómetro, que los datos extraídos de Google Earth eran fiables.

### 2.3.2. Cálculo de la demanda base

La demanda base de cada uno de los hidrantes se obtuvo a partir de su consumo en el período, y de las horas en las cuales dicho hidrante había estado regando. Señalar que el cálculo de la demanda

base, junto al cálculo de los patrones de demanda, se explica detalladamente en el apartado “4.4.1. *Cálculo de los patrones de demanda*”.

## 2.4. Problemas con los contadores de la estación de bombeo

Revisando los datos del caudal registrado por los contadores de las parcelas, y los dos contadores existentes a la salida de la estación de bombeo, se llegó a la conclusión de que debía de haber habido algún error. El caudal total registrado por los contadores de las parcelas era ligeramente mayor que el registrado por los contadores ubicados en la estación de bombeo. Evidentemente esto es imposible, ya que significaría que el caudal registrado es mayor que el caudal inyectado.

Este hecho se comunicó a la Comunidad de Regantes y efectivamente habían tenido problemas con los contadores de las estaciones de bombeo, tanto del cabezal uno como del cabezal dos. En cuanto al cabezal uno, se informó que durante una temporada durante el mes de enero los contadores no habían tomado datos.

Para intentar corregir este error, al caudal inyectado (el leído por los dos contadores de la estación de bombeo), **se le sumó** el registrado durante ese tiempo por los contadores de las parcelas. Una vez realizada esta operación, el caudal inyectado daba un valor superior al registrado, pero esta diferencia era ínfima. La diferencia era tan pequeña que supondrían unas fugas del 0,50%; lo cual no es posible.

Tras asegurar que el dato correcto de caudal es el registrado en los hidrantes, el fallo del balance hídrico se asocia a un error en el valor del caudal inyectado. Dado el fallo en la lectura del contador de entrada en la red, es necesario realizar una estimación de las pérdidas de agua en el sistema. Estas pérdidas se deben, o bien a fugas de agua en las tuberías, o bien a errores en las mediciones y robos de agua. Tras constatar con los técnicos del sistema que no son conscientes de que se hayan producido robos de agua en los últimos años, y que no se han detectado errores de medición reseñables en los contadores de los hidrantes, se decide asociar todas las pérdidas de agua a fugas en la red.

Para estimar esta posible cantidad de agua fugada se tiene en cuenta las características de la red, y de las redes cercanas a ésta. Se trata de una red relativamente nueva, únicamente tiene ocho años. Los sistemas cercanos a la zona, de características similares en volúmenes, diámetros y funcionamiento contabilizan las pérdidas entre un 3% y un 5%. Por lo que parece razonable suponer unas fugas del 5%. Hubiera sido posible, debido al error en el contador de entrada, y el balance positivo en los caudales, considerar que no existen pérdidas en el sistema, pero ninguna red es totalmente estanca. Además, el hecho de considerar fugas en el sistema dependientes de la presión, va a posibilitar estudiar cómo influye la gestión de la presión en la existencia de agua fugada.

### 3. Diagnóstico energético

El diagnóstico energético es un conjunto de técnicas y procedimientos, mediante el cual, se logra estimar el estado de una red de agua desde el punto de vista energético. Para ello compara el rendimiento real del sistema con el rendimiento ideal.

En el cálculo del rendimiento real se analizan las condiciones de la red en su estado actual. En el caso ideal se estima que el sistema no tiene ningún tipo de pérdidas, razón por la cual alcanzar este rendimiento es imposible. Sin embargo, resulta de gran utilidad ya que esta diferencia permite mostrar el margen de mejora que tiene la red en cuestión, y comienza a señalar los aspectos de red que pueden ser mejorados.

#### 3.1. Sistema ideal

El primer paso del diagnóstico energético es calcular el rendimiento ideal de la red, y para ello utiliza los siguientes términos:

- **Energía mínima requerida** por los usuarios  $E_{u0}$   
La  $E_{u0}$  es la energía que se debe entregar en todos los nudos de consumo, a la cota a la que se encuentren ( $z_i$ ), el volumen demandado ( $v_i$ ) y la presión mínima de servicio. Por ello, para su cálculo entra en juego la diferencia de cota entre el nudo en cuestión, y la cota más baja del sistema.

$$E_{u0} = \gamma \sum v_j \left[ \frac{P_0}{\gamma} + (z_j - z_l) \right]$$

- **Energía topográfica (ideal)** del sistema debida a la irregularidad del terreno  $E_{ti}$   
La  $E_{ti}$  es la energía que el sistema está obligado a entregar para alcanzar el punto más crítico de la red. Ello provoca que, si no se remedia de alguna forma, el resto de la red estará obligada a trabajar en sobrepresión. En un sistema ideal, el punto más crítico de la red siempre es el de cota más elevada, y en caso de que la red fuera plana, dicho término se anularía.

$$E_{ti} = \gamma \sum v_j [z_h - z_j]$$

- **Exceso de energía (ideal)** del sistema  $E_{ei}$   
Se corresponde con la presión de exceso, es decir, aquella que se suministra por encima de la estrictamente necesaria en el nudo crítico y por tanto en el resto de nudos. Se trata de un tipo de energía evitable.

$$E_{ei} = \gamma \sum v_j \frac{P_{ei}}{\gamma}$$

Una vez calculados los tres términos anteriormente descritos, se realiza su suma y se obtiene la **energía suministrada (ideal)** del sistema  $E_{si}$ , que se corresponde con la energía mínima que debe

suministrarse al sistema para satisfacer las demandas y presiones requeridas en los nudos a la cota a la que se encuentren.

$$E_{si} = E_{uo} + E_{ti} + E_{ei} = \gamma \sum v_j \left[ \frac{P_0}{\gamma} + (z_h - z_l) + \frac{P_{ei}}{\gamma} \right]$$

- $\gamma = \rho \cdot g = 9810 \frac{N}{m^3}$ , es el peso específico del agua.
- $v_j$ , es la demanda ( $m^3$ /periodo) del nudo en estudio.
- $z_j$ , es la cota del nudo en estudio.
- $z_h$ , es la cota más alta de la red y a su vez el nudo más crítico.
- $z_l$ , es la cota más baja de la red, se debe elegir como origen del sistema y referir las cotas a este punto.
- $\frac{P_0}{\gamma}$  es la presión mínima de servicio en mca, y  $\frac{P_{ei}}{\gamma}$  es la presión de exceso en el nudo crítico

A continuación, se adjunta una imagen donde se puede ver con claridad los diferentes términos de los que se compone la energía suministrada ideal. Se observa como al bombear en directo no existe energía de exceso ideal ( $E_{ei}$ ), y la  $E_{si}$  es la suma de la  $E_{ti}$  y de la  $E_{uo}$ .

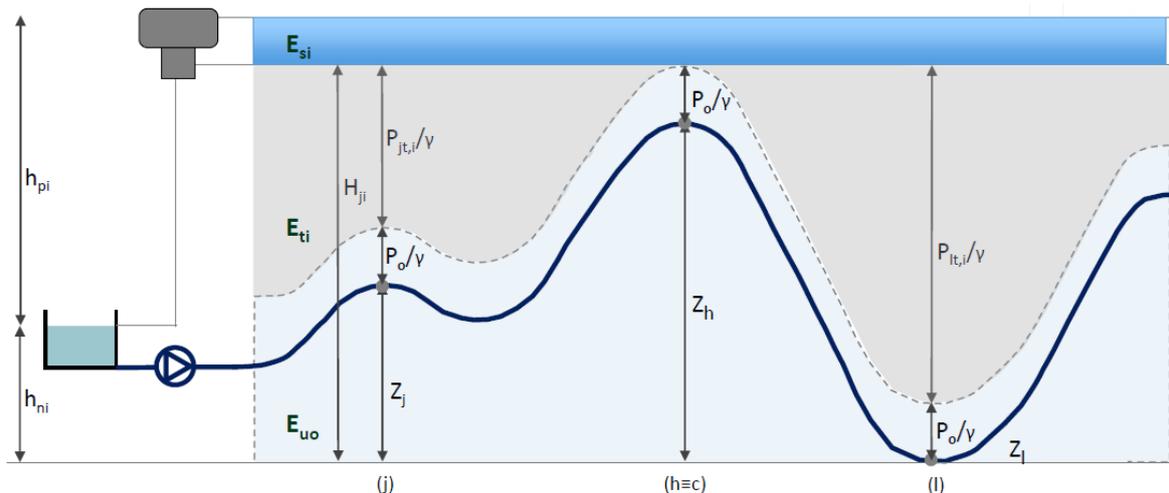


Ilustración 3: Diagnóstico energético de una red ideal

### 3.2. Sistema real

A continuación, se debe realizar el balance de la energía suministrada real al sistema:

- **Energía mínima requerida** por los usuarios  $E_{u0}$   
Este término es exactamente el mismo que en un sistema ideal
- **Energía topográfica (real)  $E_{tr}$**   
La energía topográfica real es la energía que el sistema está obligado a dar para alcanzar el punto más crítico de la red. La diferencia respecto  $E_{ti}$ . se debe a las pérdidas producidas a lo largo de la red. Este hecho provoca que la  $E_{tr}$  se vea modificada de forma sustancial por la posición en la red del nudo crítico.

- **Energía de exceso (real)  $E_{er}$**   
Se corresponde con la presión de exceso, es decir, aquella que se suministra por encima de la estrictamente necesaria en el nudo crítico y por tanto en el resto de nudos. De nuevo es distinta al caso ideal:  $E_{er} \neq E_{ei}$
- **Energía debida pérdidas  $E_{rg}$**   
Al considerar ahora el sistema real se deben de tener en cuenta las pérdidas
  - Energía perdida en fugas  $E_{rl}$
  - Energía perdida por fricción  $E_{rf}$
  - Energía perdida en el eje  $E_{rp}$
  - Energía perdida debida a otras causas  $E_{ro}$

Y como en cualquier balance, la energía saliente, ya sea útil, inevitable o pérdidas, debe ser igual que la energía que entra. Por tanto, la energía real suministrada del sistema se puede calcular a partir de las energías entrantes al mismo. Es decir, la energía natural real disponible  $E_{sr,n}$  (proporcional a la altura disponible de captación y el volumen inyectado a la red, suma del demandado más el fugado) y la energía real aportada por las bombas  $E_{sr,p}$  que puede obtenerse a partir de la lectura de las facturas eléctricas.

Con los términos de energía anteriormente mencionados ya se puede mostrar el balance de la **energía suministrada (real)** del sistema  $E_{sr}$ .

$$E_{sr} = E_{uo} + E_{tr} + E_{er} + E_{rg} = (E_{uo} + E_{tr}) + (E_{rl} + E_{rf} + E_{rp} + E_{ro}) = E_{sr,n} + E_{sr,p}$$

### 3.3. Cálculo de los rendimientos

El objetivo fundamental del diagnóstico energético es conocer el estado real de la red, y saber las posibilidades de mejoras que tiene. Para eso se estima el rendimiento ideal y real, la diferencia entre ellos se corresponde con el margen de mejora.

- **Rendimiento ideal**  
El rendimiento ideal es el máximo rendimiento que puede alcanzar un sistema, y únicamente se ve limitado por la energía topográfica que depende de la topografía de la red. Recordar que este rendimiento es imposible de alcanzar ya que en él no se tienen en cuenta las pérdidas.

$$\eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} = \frac{\text{Energía mínima requerida}}{\text{Energía suministrada ideal}}$$

- **Rendimiento real**  
El rendimiento real del sistema nos muestra el estado actual de la red.

$$\eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{sr}} = \frac{\text{Energía mínima requerida}}{\text{Energía suministrada real}}$$

### 3.4. Resultados del diagnóstico energético

A continuación, se mostrarán los resultados del diagnóstico energético efectuado sobre la red de estudio del presente TFM en cada uno de sus diferentes periodos. Señalar, que para el volumen inyectado se va a tomar el volumen registrado por los contadores instalados en cada uno de los hidrantes, que actuaran como puntos de consumo.

El primero paso es obtener la energía suministrada ideal  $E_{si}$ . Para ello, hay que calcular previamente la energía mínima requerida por los usuarios  $E_{uo}$  y la energía topográfica ideal  $E_{ti}$ . Al abastecerse la red desde una estación de bombeo, el término de exceso de energía  $E_{ei}$  será de cero. Por lo que:

$$E_{si} = E_{uo} + E_{ti} = \gamma \sum v_j \left[ \frac{P_0}{\gamma} + (z_h - z_l) \right]$$

	Energía mínima requerida por los usuarios ( $E_{uo}$ )	Energía topográfica ideal ( $E_{ti}$ )	Energía suministrada ideal ( $E_{si}$ )	Volumen consumido ( $m^3$ )
Periodo 1	11149	1917	13066	137004
Periodo 2	19799	3379	23178	243028
Periodo 3	27988	4745	32733	343205
Periodo 4	24240	4094	28334	297086
Periodo 5	21916	372	25638	268820
Periodo 6	40812	6870	47682	499944
Periodo 7	7884	1332	9217	96642
Periodo Anual	153790	26060	179851	1885732

Tabla 4: Energía suministrada ideal de la red

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la energía topográfica ideal de la red para todos los periodos se sitúa entre un 16,5% y 17,5% de la total suministrada. El causante de estos valores bajos son los pequeños desniveles orográficos presentes en la red objeto de la actuación.

La energía suministrada real  $E_{sr}$  se obtiene de la suma de la energía de eje  $E_{sr,p}$  y de la energía natural  $E_{sr,n}$ . La energía de eje se conoce a partir de las facturas eléctricas de la estación de bombeo, y la energía natural se calcula sabiendo la cota de aspiración de la estación de bombeo y del volumen bombeado en ese periodo. Todos estos datos se muestran en la tabla siguiente:

	Energía de eje ( $E_{sr,p}$ )	Energía natural ( $E_{sr,n}$ )	Energía suministrada total ( $E_{sr}$ )
<b>Periodo 1</b>	33717	746	34464
<b>Periodo 2</b>	59261	1324	60585
<b>Periodo 3</b>	80264	1870	82134
<b>Periodo 4</b>	69532	1619	71151
<b>Periodo 5</b>	58619	1465	60084
<b>Periodo 6</b>	123208	2724	125932
<b>Periodo 7</b>	24496	526	25022
<b>Periodo Anual</b>	449099	10277	459376

Tabla 5: Energía suministrada real de la red

Con todos estos datos ya se pueden calcular los rendimientos ideal y real del sistema.

	Rendimiento ideal	Rendimiento real
<b>Periodo 1</b>	0,85	0,32
<b>Periodo 2</b>	0,85	0,33
<b>Periodo 3</b>	0,86	0,34
<b>Periodo 4</b>	0,86	0,34
<b>Periodo 5</b>	0,85	0,36
<b>Periodo 6</b>	0,86	0,32
<b>Periodo 7</b>	0,86	0,32
<b>Periodo Anual</b>	0,86	0,33

*Tabla 6: Rendimientos de la red*

Como puede observarse, tanto el rendimiento ideal como el real son prácticamente constantes para cada periodo, esto se debe a que dado que la configuración no cambia, la variación entre los periodos únicamente se debe a los cambios de la demanda de caudal. Dado que este valor se encuentra tanto en el numerador como en el denominador de la fórmula del rendimiento, prácticamente no existen diferencias.

### 3.5. Resultados y conclusiones

La presión mínima de servicio debería de ser de 30 mca, es decir, la presión mínima para que los hidrantes funcionen correctamente. Se conoce que hay zonas del sistema donde no se alcanza dicha presión, por tanto, no es posible considerar que la presión mínima sea de 30 mca, cuando no se alcanza en todos los instantes.

Por este motivo, se va a considerar que la presión mínima de sea de 25 mca, para de esta forma reflejar de una manera más fidedigna, el estado actual de la red.

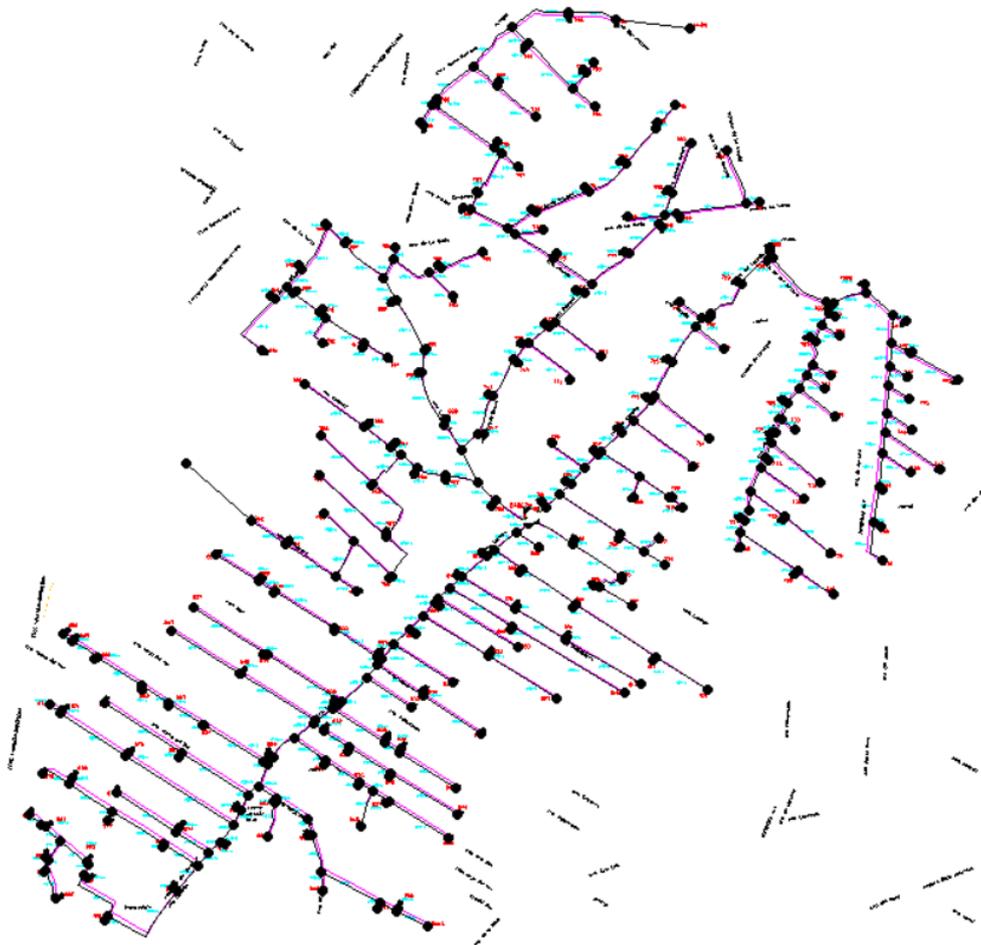
El máximo rendimiento al que puede llegar el sistema si no hubiera pérdidas sería al 86%. Si se tienen en cuenta las pérdidas se obtiene que actualmente el rendimiento del sistema es del 36%. Pero como ya se ha dicho anteriormente el rendimiento ideal es imposible de alcanzar. Sin embargo, esta diferencia de más del doble entre el rendimiento real y el ideal muestra que el sistema tiene un amplio margen de mejora.

#### 4. Creación del modelo matemático de la red en EPANET.

El programa Epanet permite realizar la modelización hidráulica de una red de suministro de agua a presión, actualmente es el programa más utilizado en el mundo para estos fines, y fue desarrollado por la *Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos*.

Para la introducción de la red en Epanet se utilizó el programa EpaCAD, un software gratuito desarrollado por el ITA, y que permite exportar un plano de la red que esté en formato .dwg directamente a Epanet.

Acto seguido se procedió a introducir el diámetro de las tuberías, la cota de los nudos de los que se componen la red y la demanda base de los hidrantes. La longitud de las tuberías ya estaban introducidas al exportar la red desde EpaCAD.



*Ilustración 4: Ejemplo de la red con el fondo de pantalla utilizado*

Este proceso se realizó para cada uno de los periodos. Para comprobar que los datos se habían introducido correctamente, y que el caudal inyectado que simulaba el programa correspondía con la realidad, se introdujo un embalse y se simuló la red.

#### 4.1. Introducción de los patrones de demanda

A nivel de toma de datos el año 2016 estuvo dividido en siete periodos.

Periodo	Fecha de inicio	Fecha final
1	1/01/2016	29/02/2016
2	1/03/2016	30/04/2016
3	1/05/2016	1/07/2016
4	2/07/2016	5/08/2016
5	6/08/2016	4/09/2016
6	5/09/2016	31/10/2016
7	1/11/2016	31/12/2016

Tabla 7: Fechas de inicio y fin de los periodos de riego

Dentro de cada uno de estos periodos el riego se divide en 5 turnos. El caudal inyectado en cada uno de los turnos varía, y lo hace según la siguiente proporción.

<b>Cabezal 1</b>	Turno 1	23%
	Turno 2	20,5%
	Turno 3	23%
	Turno 4	21%
	Turno 5	12,5%

Tabla 8: Porcentaje del caudal proporcionado en cada uno de los turnos de riego

Como se muestra en la tabla anterior, la variación del volumen inyectado es pequeña entre cada uno de los turnos, salvo el del último, esto es debido a que el Turno 5 se añadió recientemente debido a nuevas altas de comuneros que se han ido produciendo posteriormente.

##### 4.1.1. Cálculo de los patrones de demanda

El primer paso es obtener el número de horas que se ha regado cada día. Dicho valor se obtiene dividiendo el número de horas regadas en el periodo por el número de días que se ha regado.

Nº de días regados	24
Nº de horas de riego por turno	31
Nº de horas regadas por turno / día	1,29

Tabla 9: Cálculo del número de horas regadas por turno y por día regado para el periodo 1

El sistema ha estado regando durante el periodo 1 de media 1,29 horas en cada turno, si se multiplica por los 5 turnos, da 6,46 horas a lo largo del día. Como con el programa Epanet lo normal es simular a intervalos de una hora, hay que modificar el patrón de demanda de forma que el caudal inyectado a lo largo de periodo sea igual al real, pero donde el patrón de demanda podrá cambiar de hora en hora.

En este caso al regarse 1,29 horas por turno y por día regado, se decide redondear la cifra a 1 hora. Es decir, cada turno tendrá una duración de 1 hora, lo que hace un total de 5 horas, habrá pues que modificar el patrón de demanda para que en esas 5 horas se riegue lo que en realidad se riega en 6,46 horas.

En la siguiente tabla se adjuntan los datos de todos los periodos, incluyendo un periodo anual con la media de todo el año con el número de horas de riego por turno y día y el número de horas que finalmente se ha escogido introducir en Epanet.

Período	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P anual
Nº de días regados	24	42	46	30	23	47	16	228
Nº de horas de riego por turno	31	54	74,5	63,5	57,5	107	21	408,5
Nº de horas regadas por turno/día	1,29	1,28	1,62	2,12	2,5	2,28	1,31	1,79
<b>Nº de horas turno en Epanet</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

Tabla 10: Número de horas por turno a introducir en Epanet en cada periodo

Una vez se tiene el número de horas que se va a regar por turno en el programa Epanet se procede a calcular el patrón de demanda. En el caso del Periodo 1, en la realidad se riegan 1,29 horas por turno y día, pero en el programa se tiene que redondear a 1 hora, eso significa que el caudal a inyectar tendrá que ser ligeramente mayor para que el volumen inyectado en el programa sea el mismo que el inyectado en la realidad. Por ello se obtiene una especie de factor corrector que tendrá en cuenta esta circunstancia.

$$\text{Factor corrector hora} = \frac{\text{Número de horas reg por turno real}}{\text{Número de horas por turno en Epanet}} = \frac{1,29}{1} = 1,29$$

A continuación, se adjunta una tabla con el factor corrector de la hora de cada uno de los periodos:

Período	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P anual
Nº de horas regadas por turno/día	1,29	1,28	1,62	2,12	2,5	2,28	1,31	1,79
Nº de horas turno en Epanet	1	1	2	2	2	2	1	2
<b>Factor corrector hora</b>	<b>1,29</b>	<b>1,28</b>	<b>0,81</b>	<b>1,06</b>	<b>1,25</b>	<b>1,14</b>	<b>1,31</b>	<b>0,895</b>

Tabla 11: Factor corrector de la hora

La demanda base está calculada para introducir todo el volumen del periodo en el tiempo de un solo turno, y se sabe la proporción del volumen inyectado en cada turno respecto del total, por lo que esa proporción será el porcentaje por el que se deberá multiplicar la demanda base en cada turno.

Turno	1	2	3	4	5
<b>Porcentaje de volumen inyectado</b>	23	20,5	23	21	12,5
<b>Factor corrector turno</b>	0,23	0,205	0,23	0,21	0,125

Tabla 12: Factor corrector de cada turno para el patrón de demanda

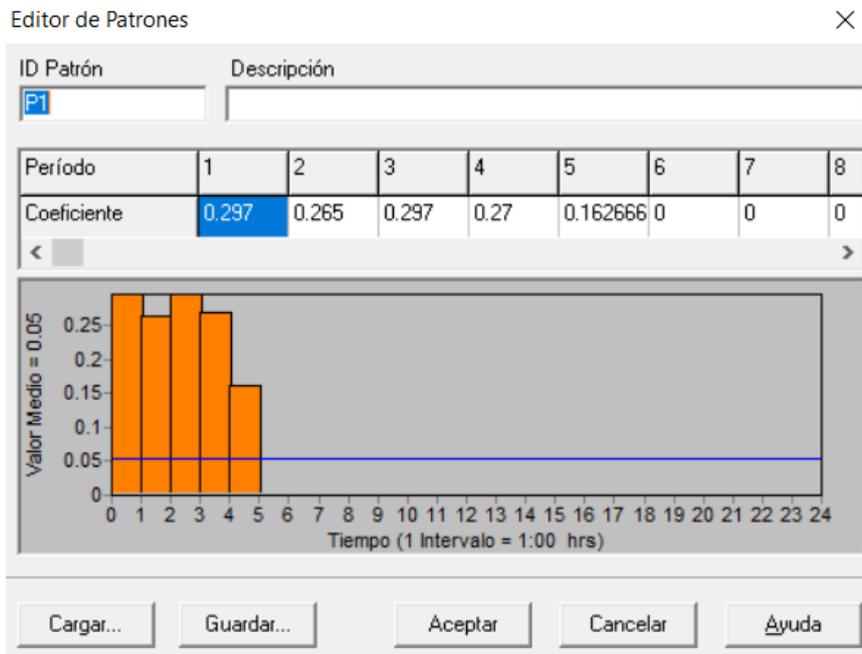
El último paso es multiplicar el "Factor corrector hora" por el "Factor corrector turno", el resultado será el "Patrón de demanda" de cada uno de los turnos.

Realizando dicho proceso con todos los periodos se obtiene los siguientes patrones de demanda para cada turno:

	Turno 1	Turno 2	Turno 3	Turno 4	Turno 5
Periodo 1	0,297	0,265	0,297	0,27	0,16266
Periodo 2	0,296	0,263	0,296	0,27	0,16
Periodo 3	0,186	0,166	0,186	0,17	0,1018
Periodo 4	0,2434	0,217	0,2434	0,22225	0,1323
Periodo 5	0,2875	0,25625	0,2875	0,2625	0,15625
Periodo 6	0,262	0,233	0,262	0,239	0,1423
Periodo 7	0,302	0,269	0,302	0,2756	0,1639
Periodo anual	0,206	0,184	0,206	0,188	0,112

Tabla 13: Patrones de demanda para cada turno y periodo

El único paso que queda es introducir los patrones de demanda en el programa:



Gráfica 6: Introducción del patrón de demanda en el programa Epanet

## 4.2. Configuración de la estación de bombeo

La Comunidad General de Regantes de Nules-Mascarell cuenta en la red 1, con una estación de bombeo con dos bombas de velocidad fija y otra de velocidad variable. Las tres bombas tienen las mismas características, y se proporcionó un ensayo de las mismas hecha por la empresa “Bombas Ideal”. Los datos de dicho ensayo se presentan en la siguiente tabla.

Caudal (lps)	Altura (mca)	Rendimiento (%)
39,15	57,9	52,62
76,1166	53,8	72,68
96,5	50,5	77,28
126,033	45,8	81,3
144,2833	40,8	79,22
167,58333	28,7	64,75
169,833	26,5	64,34

Tabla 14: Datos extraídos del ensayo de las bombas

Los datos del motor utilizados por dichas bombas son los siguientes:

Velocidad: 1450 RPM      Rendimiento: 95%      Potencia: 125 CV      Intensidad: 158 A  
 Frecuencia: 50 hz      Cos  $\phi$ : 0,87      Potencia: 92 kW      Tensión: 400 V

Con todos estos datos el paso siguiente es la introducción de los mismos en Epanet. Para ello se modifica la cota del embalse que se había colocado previamente a 50 metros, para comprobar que la demanda base introducida en los distintos hidrantes era la correcta. La nueva cota será a la que se encuentra el cabezal en la realidad, es decir, 5 metros, y a la salida del mismo se colocarán las tres bombas en paralelo.

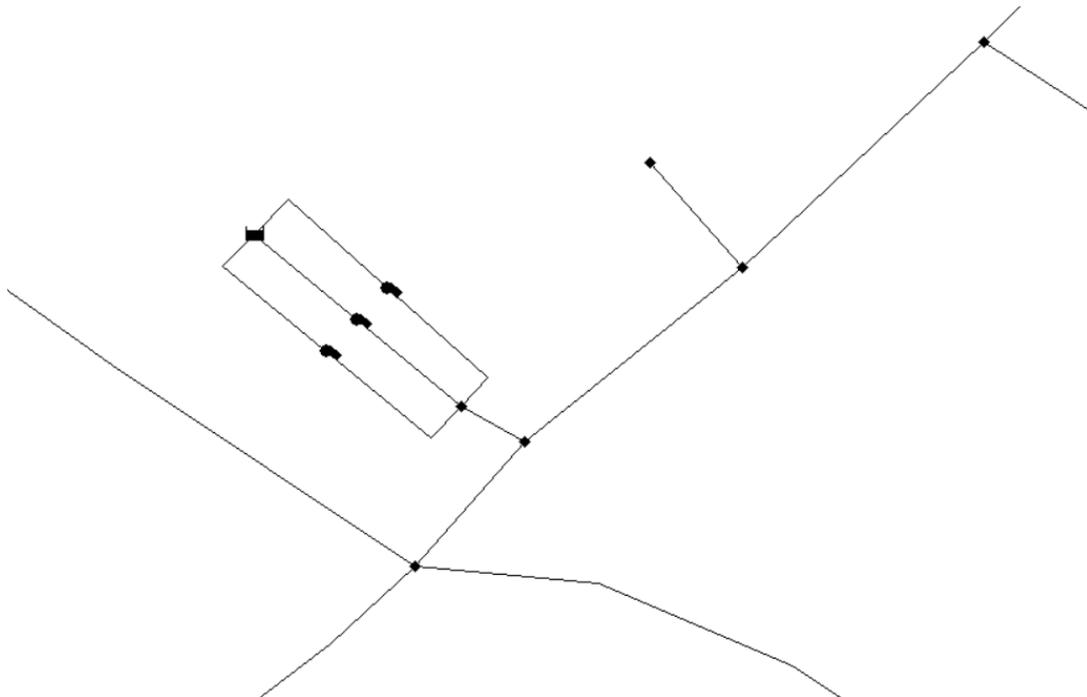
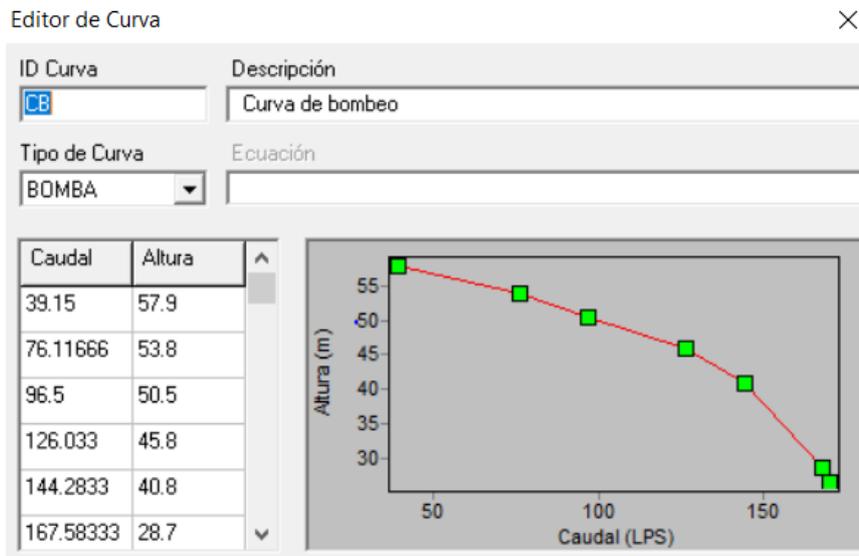
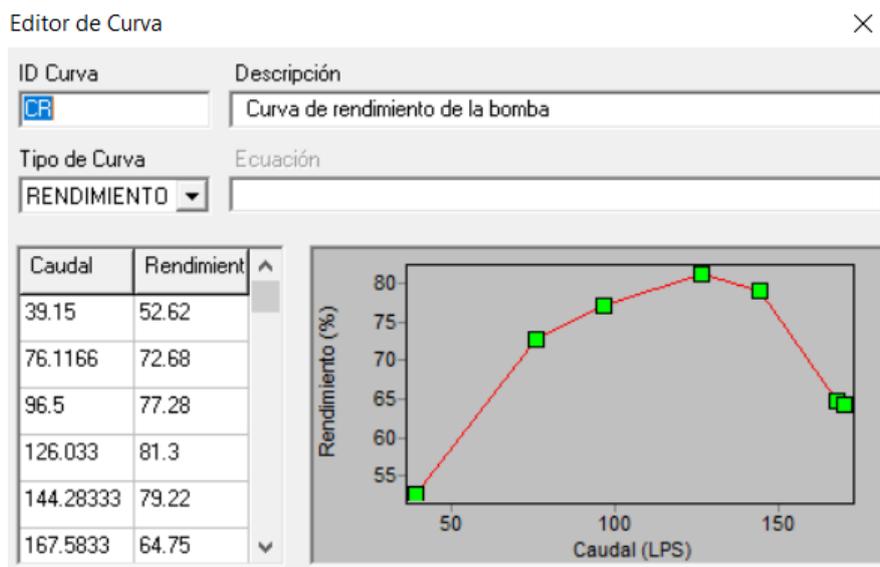


Ilustración 5: Ejemplo configuración de la estación de bombeo en Epanet

En las bombas se introducirán los puntos de trabajo obtenidos en el ensayo mostrado anteriormente, de forma que se crearán dos curvas. CB "Curva de la bomba", donde la posición de los puntos la dará el caudal y la altura aportada, y una segunda curva, CR "Curva de rendimiento", donde los puntos vendrán definidos por el caudal y el rendimiento.



Gráfica 7: Curva de bombeo de la bomba



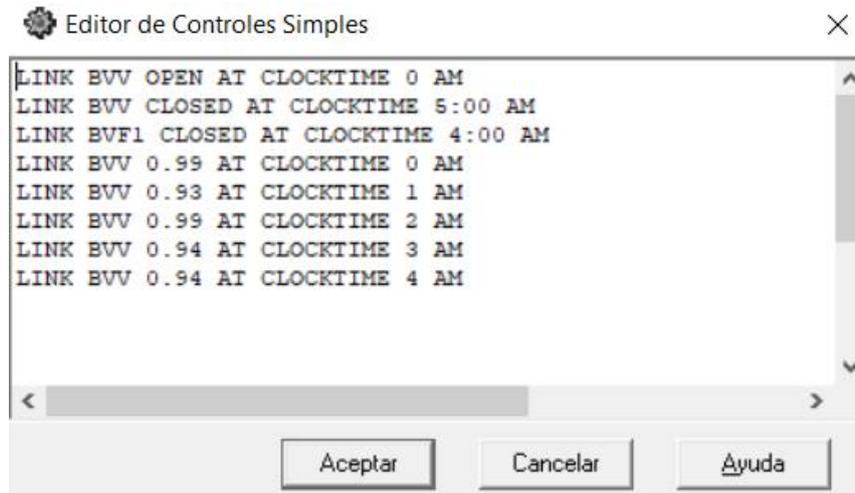
Gráfica 8: Curva de rendimiento de bomba

#### 4.2.1. Control de las bombas

Sobre las bombas, hay que realizar un control, ya que depende del turno y del periodo estarán conectadas unas u otras, y la bomba de velocidad variable modificará su velocidad para acoplarse a las condiciones de funcionamiento de cada momento.

Actualmente, la estación de bombeo trabaja con una presión de consigna aguas abajo de la misma de 45 mca. Para conseguir mantener dicha presión es necesario realizar un control sobre las bombas de forma que, las bombas de velocidad fija se enciendan o se apaguen, y la bomba de velocidad variable modifique su velocidad para de esta manera, adaptarse a las variaciones de la demanda y mantener los 45 mca de presión.

Con estas premisas se diseñaron el control de las bombas para los 7 periodos. Los ajustes efectuados dependen fundamentalmente del periodo, ya que varía el número de horas de riego de 5 a 10, y del caudal inyectado en cada uno de los turnos. A continuación, se muestra uno de los controles diseñados, el mostrado en concreto corresponde con el periodo 1.



*Ilustración 6: Controles de la estación de bombeo*

Destacar que el Turno 5, el que tiene menos caudal, en principio es el último de los turnos, pero en aquellos periodos en los que cada turno riega 2 horas, se adelanta y es el primero que riega de 22:00 a 00:00. Esto es debido a que interesa inyectar el máximo volumen posible de 00:00 a 08:00, es decir, en las horas valle donde la energía es más barata. Esto ocurre en los periodos 3, 4, 5 y 6.

## 5. Auditoría hídrica

La auditoría hídrica es un estudio que ayuda a saber la eficiencia hídrica de una red, ya sea de abastecimiento de agua potable, o de riego. Este tipo de estudio ayuda a controlar las pérdidas de agua, mostrando los puntos en los que la red no es eficiente y señalando donde se puede mejorar, ayudando de esta manera a repartir las inversiones en función de las necesidades reales de la red.

Previo a analizar los resultados obtenidos de la auditoría hídrica efectuada sobre la red número 1 de Nules, se va a realizar una introducción acerca del tipo de pérdidas que puede tener un sistema de abastecimiento de agua a presión y de los balances hídricos que se pueden realizar.

### 5.1. Pérdidas de agua

#### 5.1.1. Tipos de pérdida de agua

El primer paso es diferenciar entre las pérdidas reales y las pérdidas aparentes:

- **Pérdidas reales:** son aquellas debidas a los defectos físicos que pueda tener la red (roturas de tubería, fisuras, malas conexiones, acometidas, etc...)
- **Pérdidas aparentes:** son las debidas a robos, a errores en la medición de los contadores o a errores en el tratamiento de los datos. Las pérdidas aparentes es agua que llega al consumidor final, pero que por una razón u otra no se contabiliza.

Al final las pérdidas de agua son la diferencia entre el volumen inyectado y el volumen facturado por la empresa.

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas de agua} &= \text{Pérdidas reales} + \text{Pérdidas aparentes} \\ &= \text{Volumen inyectado} - \text{Volumen facturado} \end{aligned}$$

Evidentemente cada sistema de red es diferente, y es difícil extrapolar las conclusiones y los datos extraídos de un sistema y aplicarlos a otro, pero por regla general, las pérdidas reales suelen representar un 75% del total de pérdidas que sufre la red. Eso significa que un 25% de las pérdidas son debidas a robos o a errores en la medición.

Estos porcentajes varían mucho dependiendo del tamaño de la red, del número de usuarios, de la antigüedad de la misma, de si es una red de riego o de abastecimiento de agua potable etc... Por ejemplo, cuanto más consumidores tenga y más grande se la red, más fácil será que hayan robos. Cuanto más nueva sea la red, en principio menos fugas deberá tener. Por eso recalcar que los valores que se acaban de dar, y los que se van a dar a continuación son valores orientativos.

Si la red tiene depósitos también se pueden producir fugas en ellos, pero generalmente son mucho menores que las producidas en acometidas y tuberías.

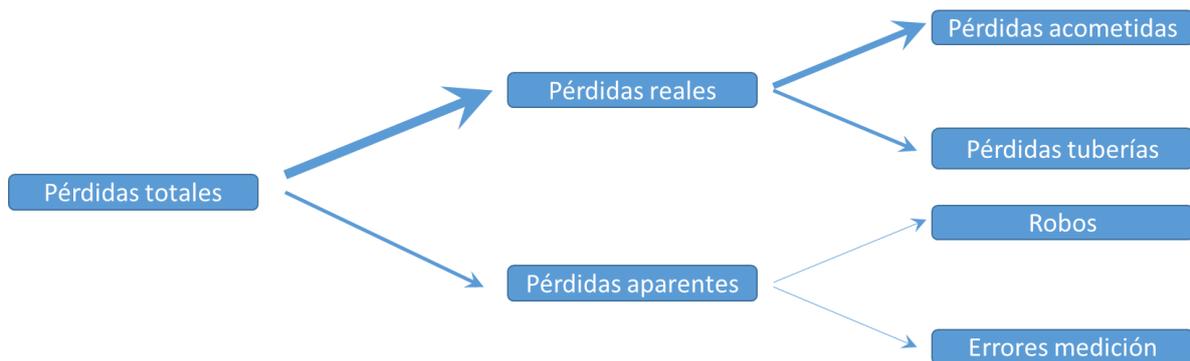


Ilustración 7: Esquema de pérdidas en una red de agua a presión

Las pérdidas de agua de una red pueden llegar a ser considerables, de hecho pueden llegar a ser mayores de un 50%, es decir, que menos de la mitad del agua inyectada llega al consumidor. Según las pérdidas totales de un sistema se puede hacer la siguiente clasificación:

Pérdidas totales (%)	Calificación
$Pt < 10$	Excelente
$10 < Pt < 20$	Bueno
$20 < Pt < 30$	Regular
$30 < Pt < 40$	Malo
$40 < Pt < 50$	Inaceptable
$50 < Pt$	Inadmisible

Tabla 15: Calificación de un red según su porcentaje de pérdidas

### 5.1.2. Causantes de las pérdidas de agua

¿Pero, por qué las redes pierden tanta agua? El principal motivo es la cantidad de elementos que la componen, y la presión a la que se ven sometidos. Y no solo eso, si la red mantuviese la presión constante siempre, la cantidad de fugas y de roturas disminuiría de forma considerable. El problema añadido es que la presión en una red de agua va variando según la demanda, por lo que los esfuerzos mecánicos a los que se ven sometidos también. Esta serie de ciclos de sollicitaciones mecánicas que sufren los elementos de la red es lo que provoca que al final las distintas partes de sistema fallen por fatiga.

Más peligroso aún que las variaciones de presiones propias de una red a lo largo del día son las provocadas por operaciones y maniobras no previstas que generan fuertes transitorios, y que pueden acabar por generar fugas, o peor aún, la rotura del sistema. Este tipo de transitorios son común en algunas redes de nuestro país cuando en épocas de sequía, y debido a las fugas que tiene el sistema, se decide cortar el agua durante unas horas al día. Este hecho está demostrado que genera más fugas en el futuro, y como se ha explicado, puede acabar con la rotura completa de una de las tuberías. Además, en el momento en el que despresurizas la red das la posibilidad de la intrusión patógena al permitir que el agua previamente fugada vuelva a entrar.

### 5.1.3. Problemas causados por las pérdidas de agua

Las pérdidas de agua acarrearán consigo tres problemas fundamentalmente.

Desde el punto de vista económico, las fugas obligan a inyectar más agua, lo que se traduce en un mayor coste económico.

Ambientalmente las fugas generan dos problemas, por un lado, suponen un derroche del agua y obliga a su sustracción del medio natural y por otro provocan un aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> provocadas por los grupos de bombeo al tener que inyectar un caudal más elevado para compensar el fugado.

Por último, desde un punto de vista social, la publicidad que muestra la empresa propietaria de la red es mala, ya que transmite la sensación al usuario de descontrol de la red.

## 5.2. Introducción de las fugas en Epanet

Para la introducción de las fugas en el modelo se utilizó el programa ITAFugas, programa informático desarrollado por el ITA de la UPV, y que está basado en la evaluación de las fugas a partir de la simulación de la red en periodo extendido (*Almandoz et al., 2005*). El ITAFugas es un software libre de uso particular que surge para facilitar la introducción de las fugas, dependientes de la presión, en los modelos de redes en Epanet. Para ello únicamente necesita los siguientes datos:

- Red en Epanet
- Volumen inyectado mensual
- Volumen facturado al mes

Tal y como se explicó en el apartado “2.4 Problema con los contadores de la estación de bombeo” el dato del volumen inyectado en la red no se conoce, por lo que tampoco se conoce el rendimiento volumétrico de la red. Se estima, a partir de la experiencia de la comunidad de regantes, y de las características de la red (antigüedad, presiones medias, condiciones de funcionamiento) que el rendimiento de la red debe de encontrarse en torno al 95%, es decir, un 5% del volumen inyectado se pierde en fugas.

El programa ITAFugas permite aplicar dos métodos para el cálculo de los coeficientes emisores de la red, la elección entre uno y otro vendrá marcada si se conoce la modulación de la inyección.

Para el cálculo de las fugas como se ha explicado es necesario tener un ficho de Epanet .inp, el volumen facturado o registrado y el volumen inyectado o el rendimiento volumétrico. El siguiente paso es diferenciar entre las pérdidas reales y las pérdidas aparentes. Recordar que las pérdidas reales corresponden a las fugas físicas, mientras que las pérdidas aparentes corresponden a robos o lecturas defectuosas de los contadores.

En la presente red nunca se ha detectado ninguna acometida ilegal, es decir, no se ha descubierto a nadie robando ni hay sospechas de que este hecho se produzca. Además, aunque todos los contadores presentan errores en sus lecturas, el error que se puede inducir en la presente red con el número de contadores existente es muy pequeña. Todo esto ayuda a concluir que el 100% de las

pérdidas estimadas que se produzcan serán reales. El porcentaje asociado al volumen incontrolado asociado al consumo será del 0%.

El siguiente paso es calcular la K inicial global, y a partir de ella, y mediante la longitud ponderada de cada uno de los nudos, calcular la  $k_i$  inicial de cada uno de los nudos, que servirá para iniciar la iteración. El cálculo iterativo es necesario ya que, como se mostrará a continuación, en la fórmula de donde se obtiene el coeficiente emisor están presentes la presión y el caudal, y no hay que olvidar que la presión varía en función del caudal.

El cálculo de los coeficientes emisores de cada uno de los nudos se calculó para el periodo 3, pero son válidos para el resto de periodos ya que las características importantes de la red permanecen igual.

A continuación, se muestra los pasos seguidos para calcular los coeficientes emisores.

#### 5.2.1.1. Cálculo específico del Periodo 3

Datos de partida:

Volumen registrado ( $m^3$ )	343.205,463
Rendimiento volumétrico	95%
Volumen inyectado ( $m^3$ )	361.268,908

Tabla 16: Datos periodo 3

Con los datos anteriores se calcula el volumen fugado:

$$\text{Volumen fugado} = \text{Volumen inyectado} - \text{Volumen registrado} = 18.063,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen fugado} = 18.063,4 \frac{\text{m}^3}{\text{periodo}} = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

La K inicial se obtiene de la siguiente fórmula que proviene de la expresión de Torricelli:

$$Q_{if} = K \cdot P^\gamma$$

Donde:

- $Q_{if}$  es el caudal fugado en l/s
- K es el coeficiente emisor
- P es la presión media
- $\gamma$  es el exponente emisor de la red

A partir de esta fórmula y dando un valor a la presión media y al exponente emisor, este último suele ser 1,05 o 1,1; se obtiene la K inicial. A partir de ella se obtendría la  $k_i$  teniendo en cuenta las longitudes ponderadas, y se comenzaría el proceso iterativo definitivo.

### 5.3. Resultados de la Auditoría Hídrica

A continuación, se van a presentar los resultados obtenidos de la auditoría hídrica para los siete periodos en los que dividen el año la Comunidad General de Regantes de Nules-Mascarell. Las diferencias que presentan cada uno de los periodos entre sí son mínimas. Por esa razón se va a explicar

los resultados obtenidos de todos ellos desde un punto de vista global, sin entrar en detalles en cada uno de ellos.

Para la realización de los cálculos, se ha usado la herramienta informática denominada **ITAEnergy**, un software desarrollado por el ITA de la UPV. Se hablará con más detalle de dicho programa en el próximo capítulo, ya que la función principal del mismo es realizar la auditoría energética de una red. Sin embargo, también tiene otras utilidades ya que es capaz de realizar el balance hídrico y mostrar una serie de indicadores sobre el estado de la red.

Antes de comenzar a comentar los resultados, se adjunta una tabla donde se indica el número de días y de horas regadas en cada uno de los periodos.

	Número de días de riego	Horas de riego por turno	Horas regadas en el periodo	Volumen inyectado (m <sup>3</sup> )
Periodo 1	24	1	120	141649,4
Periodo 2	42	1	210	251899,4
Periodo 3	46	2	460	359679,5
Periodo 4	30	2	300	306606,4
Periodo 5	23	2	230	275314,1
Periodo 6	47	2	470	544729,2
Periodo 7	16	1	80	99687,9

Tabla 17: Características de los periodos

Recordar que en todos los periodos existen 5 turnos de riego, y dependiendo del periodo, cada turno de riego tendrá una duración de una hora o de dos horas. En los periodos 3, 4, 5 y 6; se riegan 10 horas al día, por lo que es necesario bombear fuera de las horas valle donde la energía es más cara.

Tras esta breve introducción para poner en situación las condiciones de la red, se procede a adjuntar una tabla con los resultados de la auditoría hídrica.

	Volumen (m <sup>3</sup> /periodo)			Indicadores	
	Volumen consumido	Volumen inyectado	Volumen fugado	Rendimiento Volumétrico (%)	Fugas por unidad de longitud (m <sup>3</sup> /km·h)
Periodo 1	136.997,3	141.649,4	4.652,4	96,72	1,157
Periodo 2	243.832,3	251.899,4	8.067,6	96,8	1,146
Periodo 3	340.929,7	359.679,5	18.748,0	94,79	1,216
Periodo 4	294.752,3	306.606,4	11.855,4	96,13	1,179
Periodo 5	266.487,2	275.314,1	8.825,1	96,79	1,145
Periodo 6	526.647,0	544.729,2	18.084,7	96,68	1,148
Periodo 7	96.636,3	99.687,9	3.051,7	96,94	1,138

Tabla 18: Resultados auditoría hídrica

Como se puede observar la diferencia entre los distintos periodos es muy pequeña. El rendimiento volumétrico, aunque por poco, va variando de un periodo a otro ya que los coeficientes emisores fueron calculados a partir de las características del periodo 3, lo que provoca que, al utilizar esos mismos coeficientes en otros periodos, el rendimiento volumétrico varíe. El segundo indicador que

muestra la auditoría hídrica es el de fugas por unidad de longitud. Y tal y como pasa con el rendimiento volumétrico, varía de un periodo a otro, pero dicha variación es mínima.

## 6. Análisis de la red

### 6.1. Introducción

Una vez el modelo ha sido ajustado, y se ha realizado la auditoría hídrica, se está en condiciones de realizar un análisis detallado del comportamiento hidráulico de la red.

Tras analizar los siete periodos que se han modelado en la red, se han detectado dos zonas de la misma que sufren de manera recurrente problemas de presiones, no llegando de esta forma a la presión mínima recomendada para el correcto funcionamiento de los hidrantes.

La primera zona, que de aquí en adelante se llamará **zona A**, se encuentra situada en límite suroeste de la red, y su principal problema son las pérdidas que se producen en algunos tramos de tuberías. La **zona B**, que se encuentra en el área más elevada de la red llegando a alcanzar una cota de 13 metros, se sitúa el noroeste del sistema. En esta zona, tal y como se detallará más adelante, el principal problema es su distancia respecto a la estación de bombeo y el desnivel a salvar que llega a ser de hasta 8 metros.

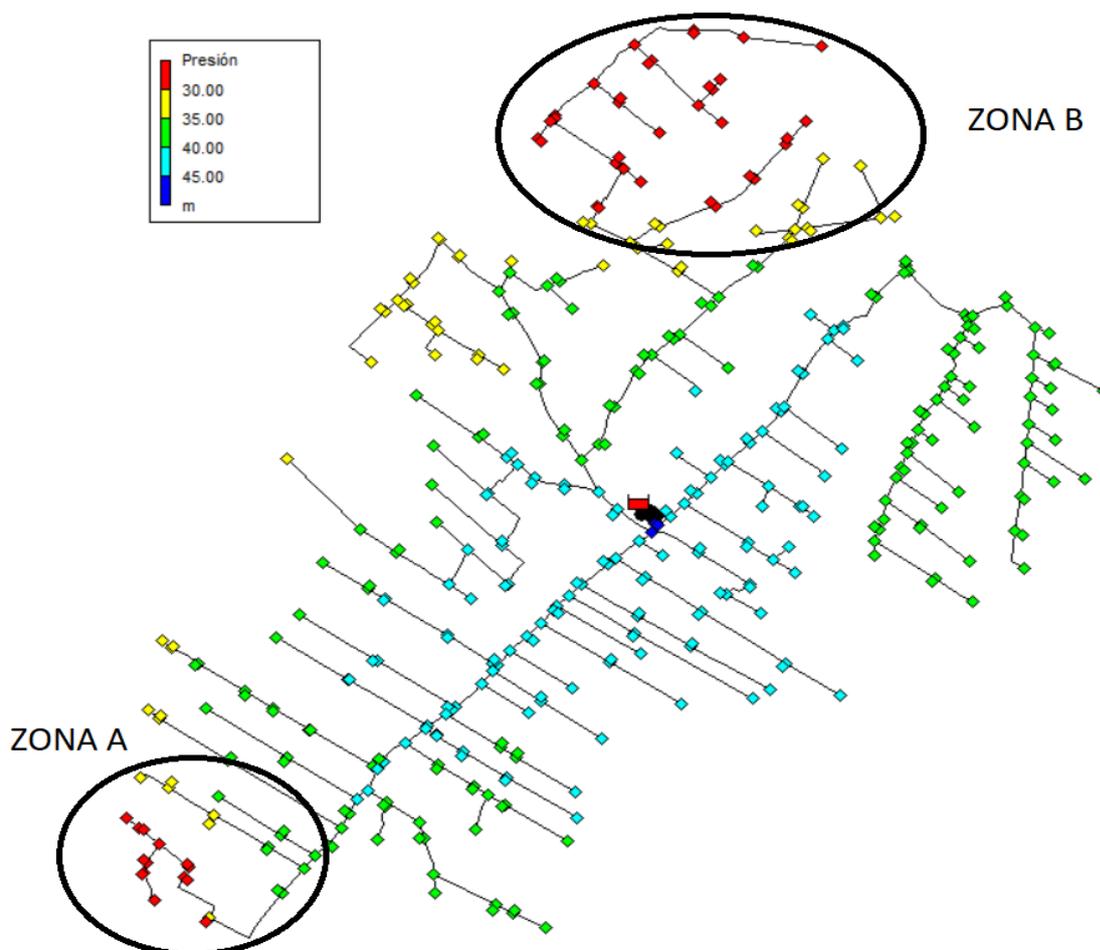
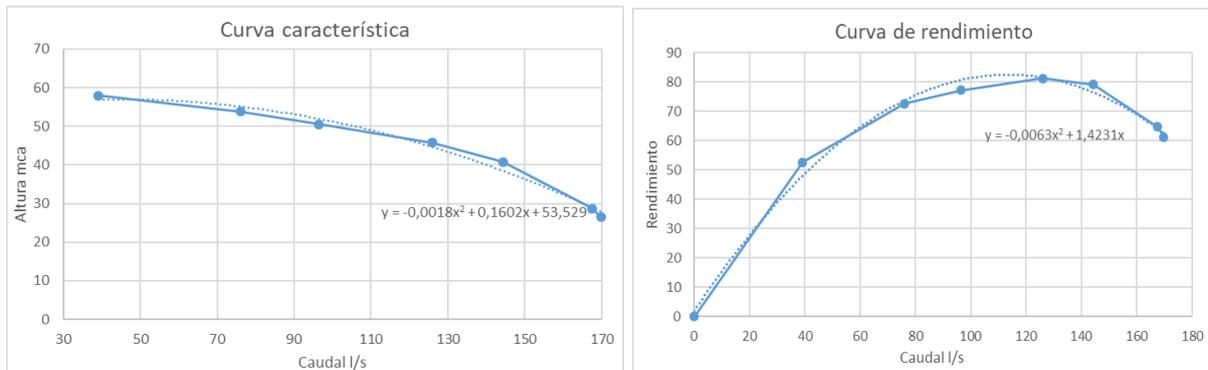


Ilustración 8: Zonas con problemas de presiones

Realizando un primer análisis de la estación de bombeo, como ya se ha explicado anteriormente está compuesta de tres bombas en paralelo con la misma curva característica. La diferencia existente entre ellas es que dos son de velocidad fija mientras que la tercera cuenta con un variador de frecuencia para ajustarse a la presión de consigna de 45 mca que tienen asignada. A continuación, se adjuntan la curva característica y de rendimiento de las bombas:



Gráfica 9: Curvas de las bombas

El problema de las presiones mencionado anteriormente, aparece cuando se inyecta a la red un caudal elevado de forma que el sistema se ve sometido a mayores exigencias. Por esa razón, el análisis de la red se va a efectuar sobre 3 casos diferenciados para tener una mejor perspectiva de cuál es la situación actual del sistema. De esta forma, se podrá apreciar también los distintos puntos de funcionamiento en los que trabajan las bombas, así como las diferentes pérdidas de cargas que se tienen en los tramos de tubería.

## 6.2. Caso 1, máximo caudal

El caso de máximo caudal se produce en el periodo 7 donde se alcanza un caudal inyectado de 396 l/s.

En estas condiciones, en las zonas A y B descritas anteriormente, los hidrantes están trabajando por debajo de los 30 mca recomendados como se puede observar en la ilustración que se adjunta a continuación.

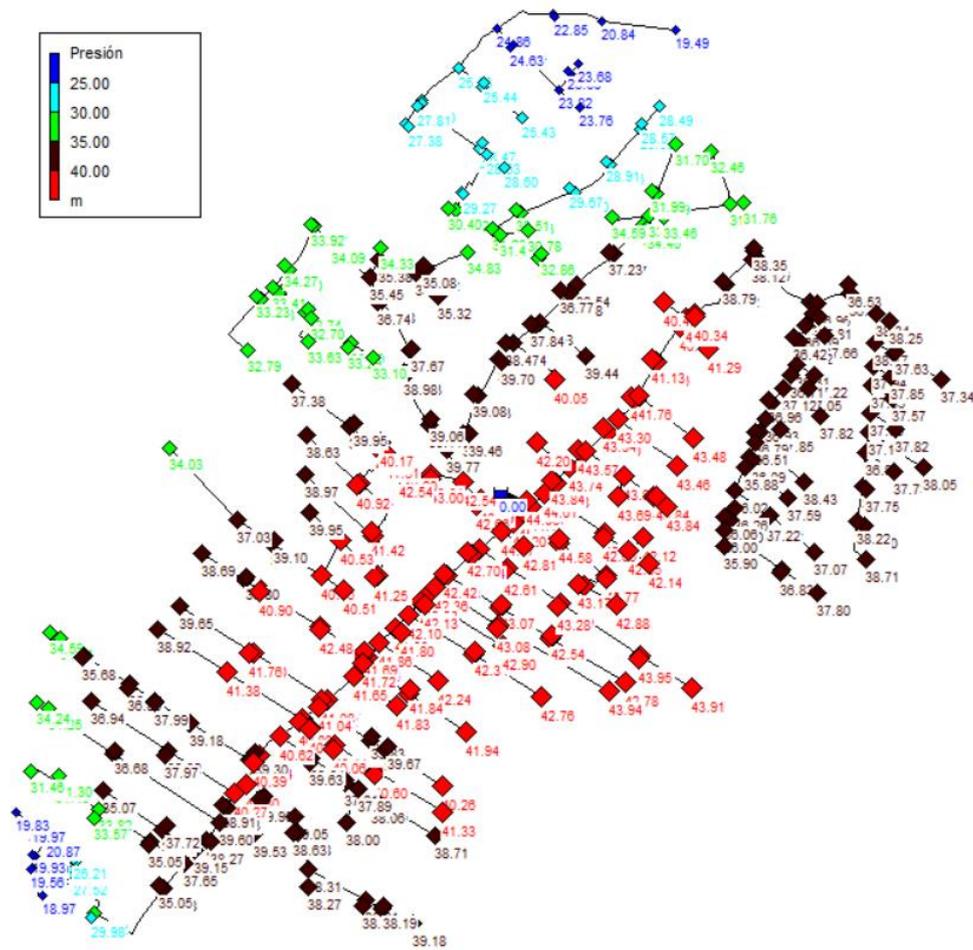


Ilustración 9: Presiones en el turno de máxima caudal

Las zonas con problemas de presiones están contenidas en espacios reducidos, y la gran mayoría de los hidrantes trabajan con sobrepresión, llegando algunos hasta alcanzar los 44 mca.

Como ya se ha comentado anteriormente, la razón por la que se tiene presiones bajas en la zona B se debe a la altura de dicha área, y a la distancia que hay desde la estación de bombeo hasta dicha zona. Es la combinación de ambos factores lo que provoca que en esta zona se encuentren presiones considerablemente más bajas que las del resto de la red. Si bien es cierto que algunos tramos de tuberías que conducen a esta zona tienen unas pérdidas unitarias elevadas, su número reducido, y el hecho de que la mayoría de las tuberías tengan unas pérdidas cercanas a los 5 mca/km imposibilitan que se considere un posible infra-dimensionamiento de la red como uno de los principales culpables.

En lo que respecta a la situación de los hidrantes de la zona A, las pérdidas de carga de las tuberías son claramente las culpables de las presiones reducidas que se tienen.

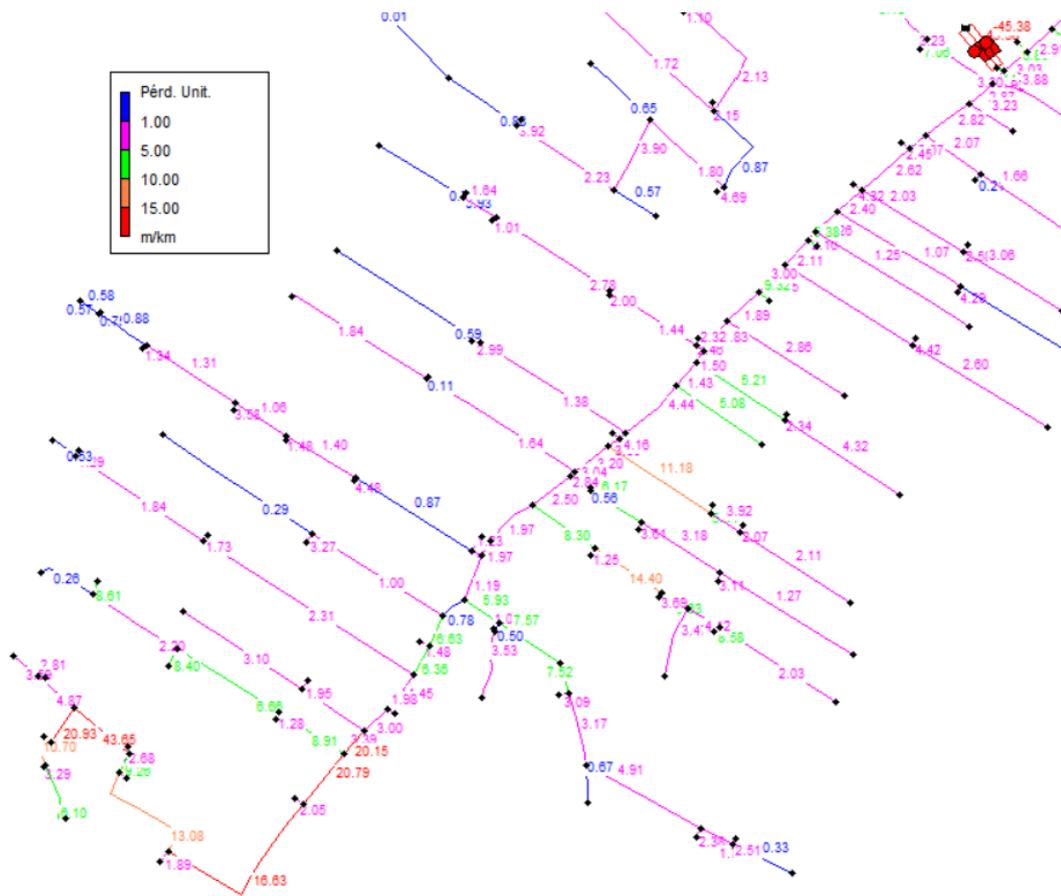
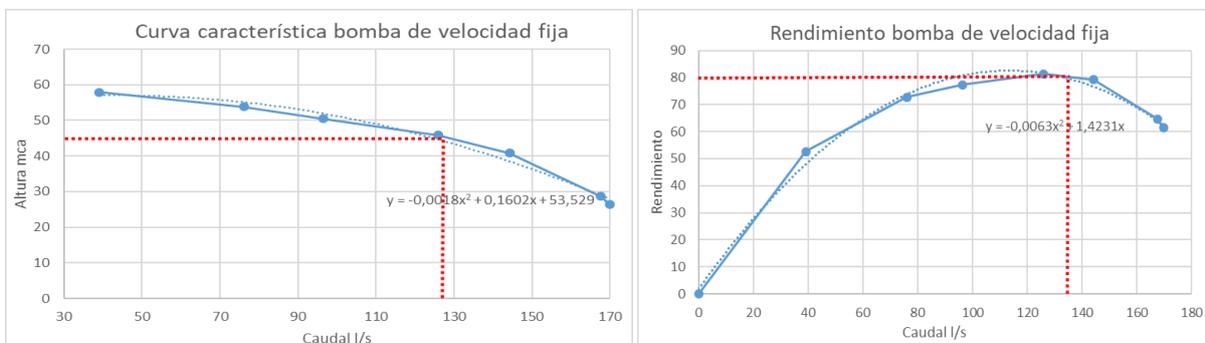


Ilustración 10: Pérdidas unitarias en la Zona A en el momento más crítico

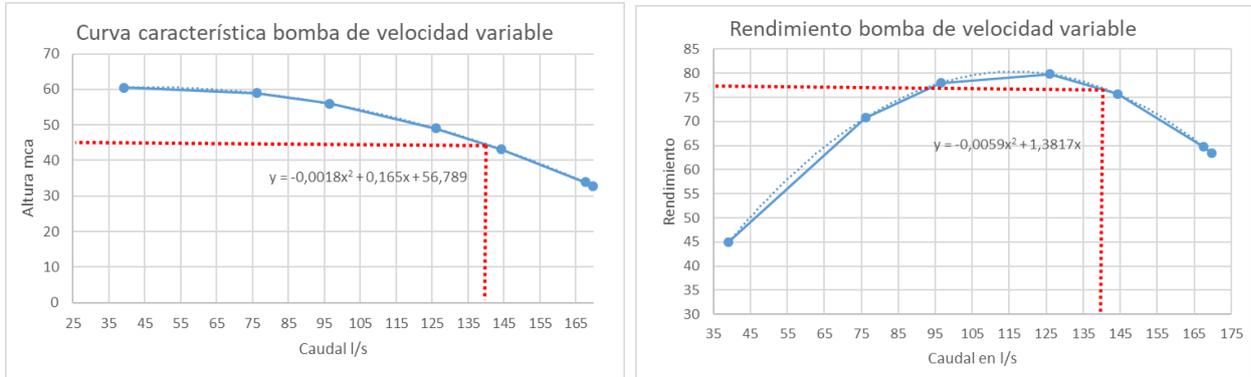
Como puede verse, en los tramos finales de la red que conducen a la zona crítica se encuentran hasta 4 tramos con unas pérdidas unitarias superiores a los 20 mca/km, incluso un tramo llega a superar los 40 mca/km. Con estos datos se puede decir que esta parte de la red sufre un problema de infra-dimensionamiento, al menos para los turnos donde el caudal inyectado es elevado.

Analizando la estación de bombeo en este momento, se observa como las tres bombas están en funcionamiento.



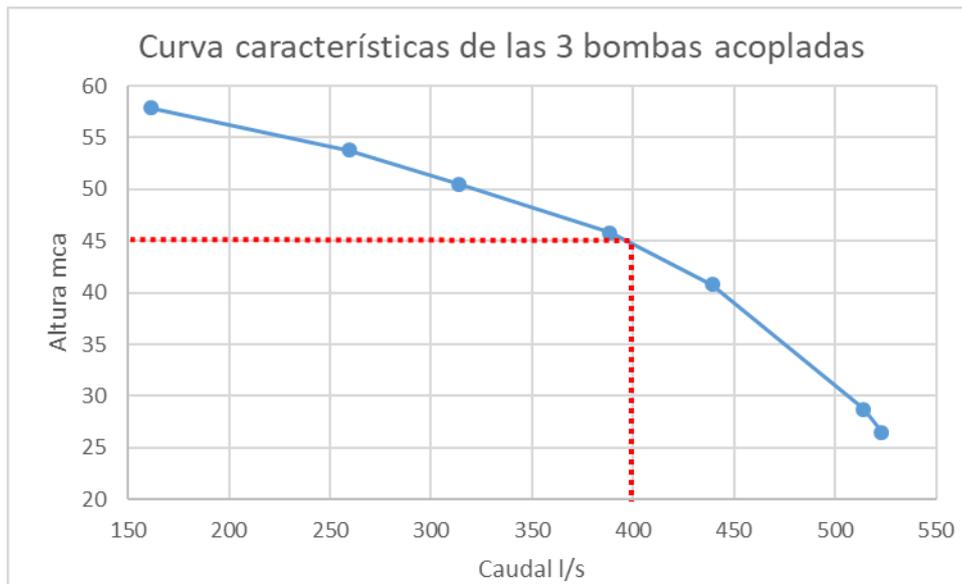
Gráfica 10: Punto de funcionamiento y de rendimiento de las bombas de velocidad fija

En este instante las dos bombas de velocidad fija están impulsando un caudal de 127 l/s a una altura de 45 mca y con un rendimiento entorno al 80%.



Gráfica 11: Punto de funcionamiento y de rendimiento de la bomba de velocidad variable

Mientras tanto, para conseguir impulsar un caudal de 140 l/s a una altura de 45 mca de forma que se cumpla la presión de consigna, la bomba de velocidad variable gira al 103% de su velocidad nominal. En este punto de funcionamiento la BVV alcanza un rendimiento de 77%.



Gráfica 12: Curva característica de las tres bombas acopladas

### 6.3. Caso 2, caudal mínimo

A continuación, se analizará el sistema en el instante en que menor caudal se inyecta al a red. Este hecho, ocurre durante el periodo 4 donde durante el turno 5 de riego el caudal inyectado es de 182 l/s.

En estas condiciones de mínimo caudal se cumple la presión mínima de 30 mca en todos los hidrantes de la red. Sin embargo, aparece otro problema, el de las sobrepresiones. Como se podrá observar en la siguiente ilustración, un gran número de hidrantes trabajan con presiones muy por

encima de la mínima necesaria. De hecho, el hidrante que tiene una menor presión está trabajando cerca de 4 mca por encima de lo necesario. El culpable de esta situación es el trabajar con una presión de consigna en la descarga de la estación de bombeo, en lugar de fijar una presión mínima en los hidrantes más críticos. De la forma en la que actualmente se gestiona la estación de bombeo, se tienen problemas por presiones inferiores a la necesaria en determinados turnos, y por sobrepresiones en otros. Esta situación sería evitable con una correcta regulación de las bombas.

Además, si se compara el mapa de presiones en estas condiciones, con el que se tiene cuando se trabaja con el caudal máximo, se pueden observar diferencias interesantes. Con caudal máximo, las presiones mínimas se registran en la zona A, debido a las pérdidas unitarias en los tramos de tuberías, que se ven acrecentadas con el aumento del caudal. Cuando el caudal inyectado es mínimo, las pérdidas unitarias se reducen, por lo que el factor más crítico pasa a ser el desnivel geométrico entre los hidrantes y la E.B. Este hecho provoca que ahora los hidrantes con menor presión se encuentren en la zona B.

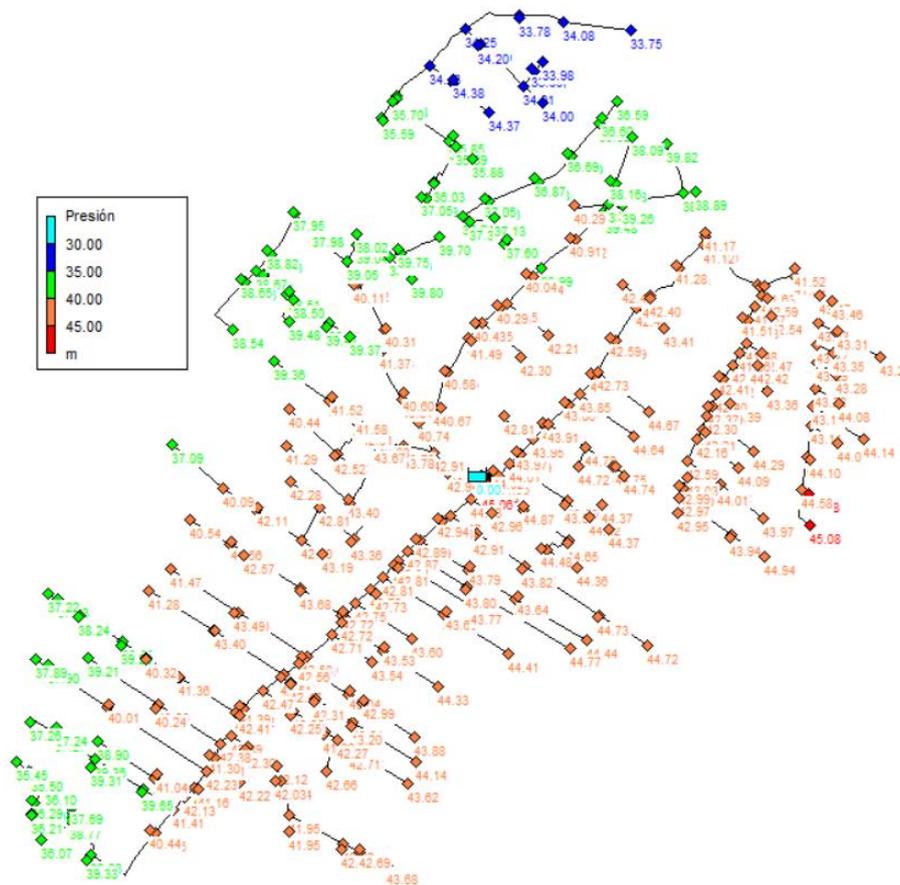


Ilustración 11: Mapa de presiones de los nudos con caudal mínimo inyectado

En la ilustración siguiente se puede comprobar cómo, efectivamente, las pérdidas unitarias se han visto reducidas de forma considerable con caídas superiores al 80% en algunos casos.

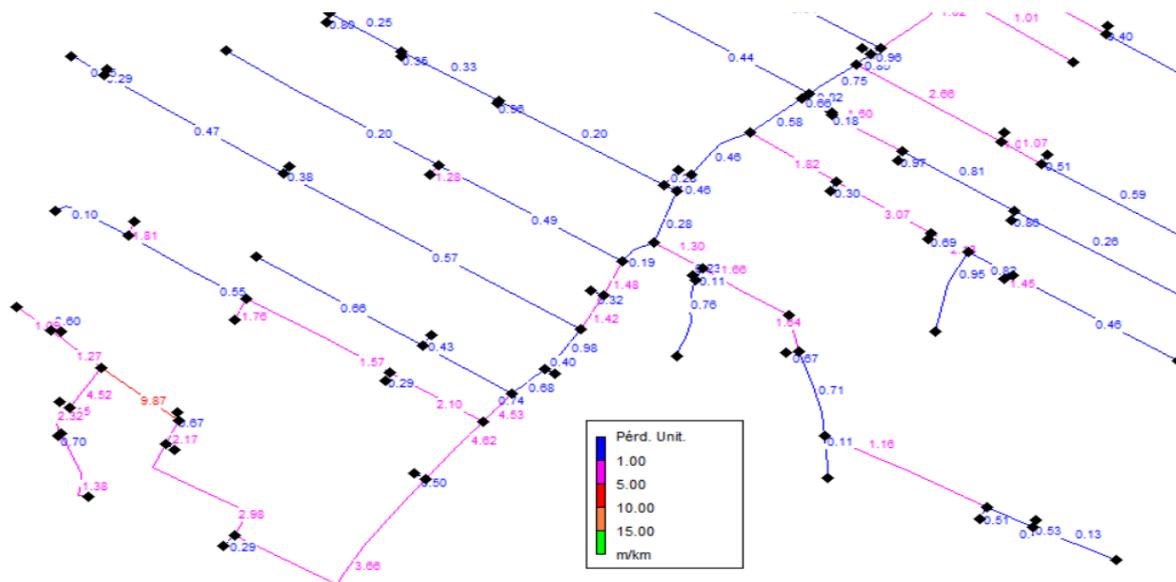
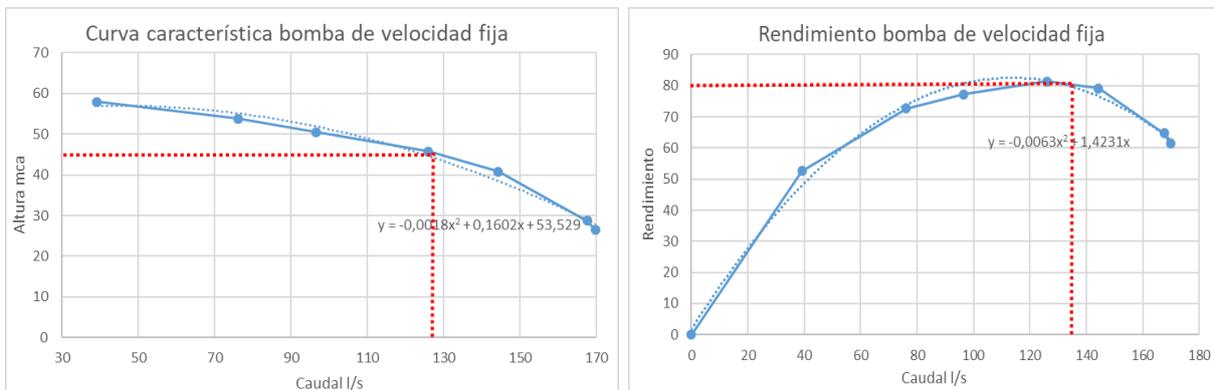
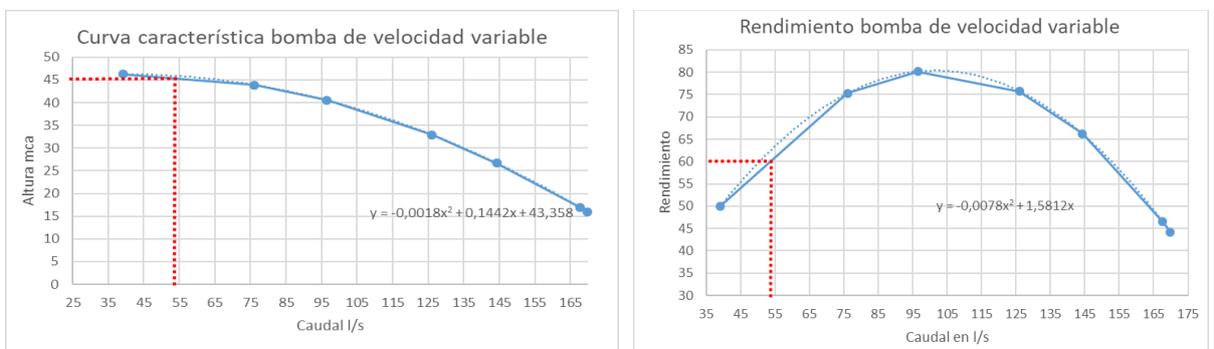


Ilustración 12: Pérdidas unitarias en la zona A en el momento de menor caudal

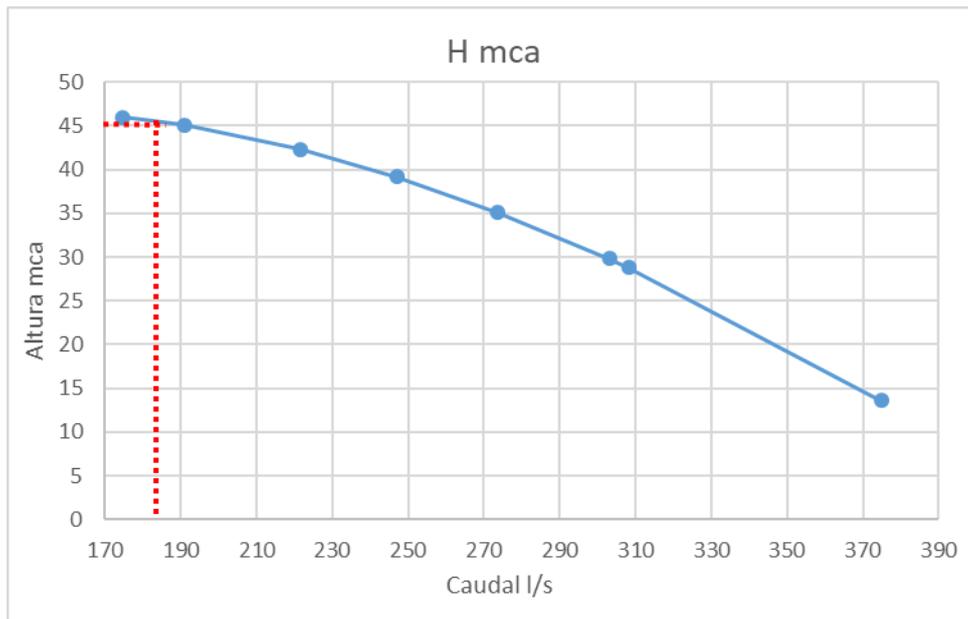
La estación de bombeo en este instante funciona con dos bombas únicamente, manteniendo parada una de las bombas de velocidad fija. La BVF bombea 128 l/s, a una altura de 45 mca y con un rendimiento de nuevo del 80%. Por su parte, la BVV bombea 53,3 l/s a una altura de 45 mca girando el 90% de su velocidad nominal. En estas condiciones alcanza un del 60%.



Gráfica 14: Punto de funcionamiento y de rendimiento bomba de velocidad fija



Gráfica 13: Punto de funcionamiento y de rendimiento bomba de velocidad variable



Gráfica 15: Curva característica con las 2 bombas acopladas

## 7. Auditoría energética

El objetivo de la auditoría energética es analizar el gasto/coste energético y compararlo con el mínimo gasto/coste teórico que en condiciones óptimas debería de tener el sistema. La diferencia entre el coste energético real y el mínimo teórico es el sobrecoste energético. Es muy común en las redes que exista un sobrecoste, el cual habrá que procurar reducir al mínimo, pero con el que se tendrá que convivir. Pero en determinadas circunstancias dicho sobrecoste energético es eliminable, y tenerlo supone un despilfarro energético y económico.

### 7.1. Balance energético

La ecuación integral de la energía, mediante la cual se realiza el balance energético, se aplica a un volumen de control que es atravesado por flujos hídricos y energéticos conocidos. De ahí la importancia de haber resuelto previamente la auditoría hídrica de la red, así como de tener el modelo matemático del sistema bien resuelto. El volumen de control del sistema se puede definir de la forma que más convenga, de esta forma los elementos que queden en el exterior interactuarán mediante energía “de flujo”, mientras que los internos podrán almacenar energía (depósitos) y disiparla (tuberías y válvulas). Todo este trabajo se puede encontrar en “*Energy Audit of Water Networks*”. Cabrera E y col (2010).

A continuación, se adjunta una imagen donde se aprecia el volumen de control escogido para la red estudiada en el presente trabajo y los términos que intervienen en el balance energético.

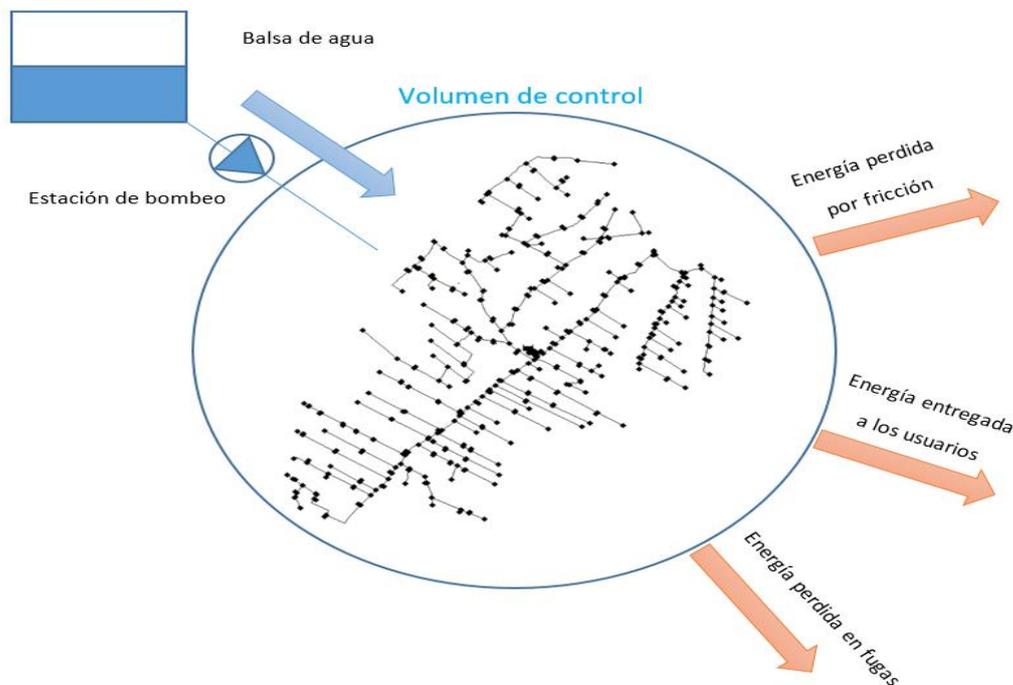


Ilustración 13: Volumen de control y elementos intervinientes en el balance energético

Las energías intervinientes en el sistema se dividen en energía aportada y energía consumida. Las energías entrantes están formadas por la energía natural suministrada y la energía de eje. Las energías “salientes” la forman la energía útil cedida a los usuarios, la energía asociada a fugas, la energía disipada por las pérdidas de fricción y la energía de compensación asociada a depósitos internos del sistema. Remarcar que en el presente caso no existe ningún depósito de este estilo. Si se escribe el balance que se acaba de explicar en una fórmula resulta lo siguiente:

$$\text{Energía aportada} = E_N(t) + E_P(t) = E_U(t) + E_L(t) + E_F(t) \pm E_C(t) = \text{Energía disipada}$$

Donde:

- $E_N(t)$  es la energía natural suministrada
- $E_P(t)$  es la energía de eje suministrada por grupos de bombeo
- $E_U(t)$  es la energía útil suministrada a los usuarios
- $E_L(t)$  es la energía asociada a fugas
- $E_F(t)$  es la energía invertida en vencer las pérdidas debido al rozamiento
- $E_C(t)$  es la energía de compensación asociada a depósitos internos

A continuación, se adjunta el esquema del balance energético de una red de distribución. Si el balance se realiza a largo plazo la energía asociada al depósito de compensación se puede obviar, además, como se ha comentado, en la red de Nules no tienen ninguno. Destacar, que entre la energía consumida hace una diferenciación entre la energía disipada por la fricción, y la energía de salida entregada a los usuarios o bien perdida en las fugas.

Energía entregada	$E_N(t) + E_P(t)$	$E_U(t)$	Energía de salida
		$E_L(t)$	
		$E_F(t)$	Energía disipada

Tabla 19: Esquema en el que se divide un balance energético

Para terminar, se va a adjuntar una tabla con las fórmulas mediante las cuales se obtienen las distintas energías que juegan un papel importante en el balance energético:

ENERGÍA CONSUMIDA kWh	Energía útil	Energía útil entregada a los usuarios	$E_u(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left( \sum_{i=1}^n q_{ui}(t_k) \cdot h_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k$
	Pérdidas de energía	Energía perdida en fugas	$E_l(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left( \sum_{i=1}^n q_{li}(t_k) \cdot h_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k$
		Energía perdida por fricción	$E_f(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left( \sum_{j=1}^{n_l} (q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k)) \Delta h_j(t_k) \right) \cdot \Delta t_k$
		Energía perdida en estaciones de bombeo	$E_{wp}(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left( \sum_{i=1}^{np} q_{pi}(t_k) \cdot h_{pi}(t_k) \left( 1 - \frac{1}{\eta_{pi}(t_k)} \right) \right) \cdot \Delta t_k$
ENERGÍA ENTREGADA kWh	Energía suministrada por las bombas		$E_p(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left( \sum_{i=1}^n \frac{q_{pi}(t_k) \cdot h_{pi}(t_k)}{\eta_{pi}(t_k)} \right) \cdot \Delta t_k$
	Energía suministrada natural		$E_n(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left( \sum_{i=1}^n q_{ni}(t_k) \cdot h_{ni}(t_k) \right) \cdot \Delta t_k$

Tabla 20: Términos intervinientes en la auditoría energética. Fuente: Cabrera E, y col 2010.

## 7.2. Programa informático (ITAEnergy)

La auditoría energética se llevará a cabo mediante una herramienta informática, el ITAEnergy, programa desarrollado por el Instituto Tecnológico del Agua de la U.P.V, y cuyo objetivo es poder realizar una auditoría energética de una red de agua a presión a partir del modelo en Epanet.

El programa muestra la energía entregada a los usuarios y la que se pierde como consecuencia de las fugas, la fricción o por las pérdidas ocurridas en la presión de bombeo. Las fórmulas que utiliza son las mismas que las explicadas en el apartado “6.1 Balance energético” y el usuario lo único que tiene que hacer es cargar el modelo, decidir el tiempo de simulación del programa y fijar la presión de referencia.

### 7.2.1. Valores obtenidos mediante el ITAEnergy

El software informático devuelve datos del balance hídrico y de la auditoría energética realizada, así como de una serie de indicadores calculados que se explicarán a continuación.

#### 7.2.1.1. Balance hídrico

El balance hídrico calculado por el ITAEnergy es exactamente igual que el explicado anteriormente, así que únicamente se mostrarán los resultados que devuelve el programa:

- Volumen inyectado
- Volumen consumido
- Volumen fugado
- Volumen almacenado en los depósitos
- Rendimiento volumétrico
- Fugas por unidad de longitud
- Error cometido en el balance energético

#### 7.2.1.2. Auditoría energética

En Auditoría energética realizada, el programa divide todas las energías intervinientes en la red en dos grupo, energía total aportada y energía total consumida, como es lógico el valor de las dos debe coincidir. A continuación, se muestra las diferentes energías intervinientes junto a una breve explicación de las mismas.

- Energía total aportada: Es la energía que se inyecta al sistema, y puede ser a su vez de dos tipos:
  - Energía aportada por la bomba
  - Energía natural
- Energía consumida: Se trata de todas las energías salientes de la red. En este apartado también se puede distinguir entre energía útil, la que se entrega al usuario, y energía perdida, toda aquella que se consume a lo largo de la red y que no llega al usuario.
  - Energía entregada a los usuarios
    - Energía mínima requerida

- Energía topográfica
- Energía de exceso
- Energía disipada por fricción
- Energía disipada en las válvulas
- Energía perdida a través de las fugas´
- Energía perdida en la bomba
- Energía de compensación

### 7.2.1.3. Indicadores del estado de la red

Adicionalmente, el programa ITAEnergy muestra una serie de indicadores que sirven para comprender de una mejor manera el estado actual de la red. Los indicadores que se mostrarán y explicarán a continuación, se pueden clasificar en dos grupos, el primer grupo lo forman indicadores de contexto, y son independientes de la gestión del sistema, es decir, dependen únicamente de las características físicas de la red. El segundo grupo lo forman los indicadores energéticos de gestión, estos últimos sí que facilitan información concreta del estado de la red y se pueden modificar tomando medidas de reducción del consumo energético.

- Indicadores de contexto
  - C<sub>1</sub>: Procedencia de la energía

El indicador C<sub>1</sub> muestra de toda la energía suministrada, que porcentaje de ella proviene de forma natural, es decir, por medio de la gravedad sin necesidad de utilizar bombas. Sus valores pueden ir de 1 a 0, siendo 1 el valor más favorable y que supondría que toda la energía suministrada proviene de forma natural.

$$C_1 = \frac{E_{natural}}{E_{suministrada}} = \frac{E_{natural}}{E_{entrada}}$$

- C<sub>2</sub>: Exigencia energética de la red

El indicador C<sub>2</sub> nos da una idea de las exigencias energéticas de la red asociadas a los desniveles topográficos existentes entre los diferentes nudos. El valor más favorable de C<sub>2</sub> es el 1, e irá aumentando conforme más desniveles tenga la red. Su valor se obtiene de dividir la energía mínima requerida por los usuarios ( $E_{uo}$ ) entre la energía mínima teórica requerida por una red plana e ideal ( $E_{min,flat}$ ).

$$C_2 = \frac{E_{uo}}{E_{min,flat}}$$

- Indicadores de gestión
  - I<sub>1</sub>: Exceso de energía suministrada

EL indicador I<sub>1</sub> sirve para representar las sobrepresiones que sufren los diferentes nudos de la red

$$I_1 = \frac{E_{entrada}}{E_{uo}}$$

- I<sub>2</sub>: Eficiencia de la red

Este indicador muestra el rendimiento entre la energía de entrada en el sistema, y la que finalmente llega a los usuarios. Cuanto mayor sea el valor de I<sub>2</sub> mayor será el rendimiento del sistema, siendo imposible alcanzar al valor idea de la unidad.

$$I_2 = \frac{E_{util}}{E_{entrada}}$$

- I<sub>3</sub>: Energía de fricción

El tercer indicador sirve para constatar sobre todo si el dimensionamiento de las tuberías ha sido el correcto. Obviamente es imposible que no se pierda energía debido a la fricción del agua con las tuberías, pero su valor si debería de estar en un intervalo razonable de 0,2 – 0,4.

$$I_3 = \frac{E_{fricción}}{E_{entrada}}$$

- I<sub>4</sub>: Energía asociada a las fugas

Este indicador no solo tiene en cuenta la energía perdida debida a ellas mismas, sino que además contabiliza la pérdida de carga adicional que provocan, y que se obtiene de realizar la resta entre la energía de fricción real y la energía de fricción de la propia red sin que hubiera fugas.

$$I_4 = \frac{E_L + E_F - E'_F}{E_{entrada}}$$

- I<sub>5</sub>: Suficiencia en el cumplimiento de los estándares

El quinto indicador sirve para detectar si la red sufre presiones mínimas por debajo de la de referencia, lo que significaría que no se estaría ofreciendo un servicio correcto al cliente.

- I<sub>5</sub> < 1: a los diferentes nudos de la red no les llega presión suficiente
- I<sub>5</sub> > 1: significaría que la presión de la red se mantiene por encima de los niveles mínimos, pero un valor muy alto sería contraproducente y que implicarían sobrepresiones y por tanto la eficiencia energética de la red se vería reducida

$$I_5 = \frac{E_{util}}{E_{uo}}$$

- I<sub>6</sub>: Energía adicional de bombeo generada por fugas

Este indicador sirve para contabilizar el gasto energético extra

$$I_6 = k = \frac{E_{bombeo}}{E'_{bombeo}}$$

Auditoría energética

**Resultados del cálculo**

Archivo procesado: D:\TFM\Auditoría energética\Periodo 1\periodo1confugas.inp

Presión de referen: 25 mca

Duración simulaci: 5 horas Intervalo de cálculo: Cada minuto

Presión mínima: -5,4 mca Energía por m3 inyectad: 0,161 kWh/m3

Presión media: 38,8 mca Energía por m3 consumi: 0,166 kWh/m3

Presión máxima: 45,6 mca

Revisar los avisos

INDICADORES		
<b>Indicadores de Contexto</b>		
Procedencia de la energía	$C_1 = \frac{E_{Natural}}{E_{Entrada}}$	0,034
Exigencia energética de la red	$C_2 = \frac{E_{uo}}{E_{min.plana}}$	1,195
<b>Indicadores de Gestión</b>		
Exceso de energía suministrada	$I_1 = \frac{E_{Entrada}}{E_{uo}}$	2,040
Eficiencia de la red	$I_2 = \frac{E_{Uti}}{E_{Entrada}}$	0,711
Energía de fricción	$I_3 = \frac{E_{Friccion}}{E_{Entrada}}$	0,069
Energía asociada a las fugas	$I_4 = \frac{E_L + E_F - E'_F}{E_{Entrada}}$	0,030

Balance hídrico Auditoría energética Indicadores Avisos

Exportar a Excel Cerrar

Ilustración 14: Ejemplo ventana del ITAEnergy

### 7.3. Resultados obtenidos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la auditoría energética efectuada sobre la red número uno de Nules. De los siete períodos en los que se divide el año, únicamente se mostrarán los de dos periodos, uno para representar los periodos en los que cada turno de riego dura una hora, y el segundo para los periodos en los que cada turno de riego dura dos horas.

Debido a los problemas para alcanzar una presión de 30 mca que sufren dos pequeñas zonas de la red, se decidió fijar la presión mínima de referencia del programa ITAEnergy en 25 mca, de forma que los datos proporcionados por la auditoría y por el diagnóstico energético se ajusten lo máximo posible a la realidad.

#### 7.3.1. Resultados del periodo 2

Para mostrar los resultados energéticos de la red, cuando se riega por turno una hora, se ha escogido el periodo 2, ya que es el que tiene un mayor volumen de agua inyectada y un mayor número de días regados con 42.

Recordar que el agua inyectada en cada uno de los turnos viene determinada por unos porcentajes facilitados por la Comunidad de Regantes de Nules, dichos porcentajes se muestran en la siguiente tabla:

<b>Cabezal 1</b>	Turno 1	23%
	Turno 2	20,5%
	Turno 3	23%
	Turno 4	21%
	Turno 5	12,5%

Tabla 21: Porcentajes de volumen inyectado por turnos

De nuevo resaltar que el Turno 5 presenta un volumen de agua inyectada considerablemente inferior al del resto. Ello es debido a que este turno es reciente, y aglutina las parcelas de los comuneros que se han ido uniando más tarde.

Como ya se ha explicado anteriormente, la estación de bombeo se ha programado para ofrecer en todo momento 45 mca a la salida de la misma. Esto se consigue diseñando un control sobre la estación de bombeo.

	Periodo 2		
	BVV	BVF	BVF1
Turno 1	$\alpha = 0,99$	On	On
Turno 2	$\alpha = 0,94$	On	On
Turno 3	$\alpha = 0,99$	On	On
Turno 4	$\alpha = 0,95$	On	On
Turno 5	$\alpha = 0,94$	On	Off

Tabla 22: Funcionamiento de la estación de bombeo en el periodo 2

Como se puede observar, las tres bombas están funcionando en todos los turnos salvo en el quinto, donde una de las bombas de velocidad fija se desconecta.

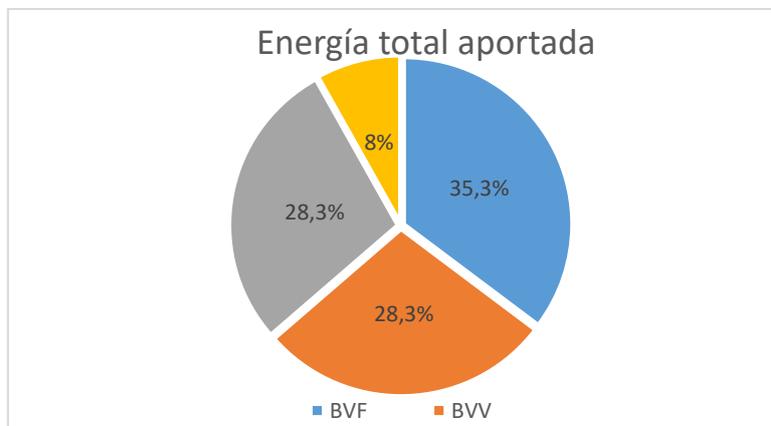
<i>Auditoría energética. Periodo 2</i>	kWh/día	kWh/periodo	Porcentaje (%)
<b>Energía total aportada</b>	1008	<b>42339</b>	
Energía aportada por las bombas	926	38907	91
Energía de la bomba BVF (Tpo. func. 5,00 h)	356	14951	38
Energía de la bomba BVV (Tpo. func. 5,00 h)	285	11986	30
Energía de la bomba BVF1 (Tpo. func. 4,00 h)	285	11969	30
Energía natural	81	3432	8
<b>Energía total consumida</b>			
	100	<b>42339</b>	
Energía entregada a los usuarios	726	30504	72
Energía mínima requerida	520	21858	71
Energía topográfica	79	3349	10
Energía de exceso	126	5327	17
Energía disipada por fricción	69	293	6
Energía perdida a través de las fugas	24	1028	2
Energía perdida en las bombas	187	7875	18
Energía perdida en la bomba BVF	71	3015	38
Energía perdida en la bomba BVV	58	2443	31
Energía perdida en la bomba BVF1	57	2416	30

Tabla 23: Resultados de la auditoría energética del periodo 2

Como se puede observar, la energía total aportada coincide con la total consumida. Si esto no fuera así significaría que habría habido algún error al calcular la auditoría con el programa ITAenergy.

Analizando con más detenimiento la primera parte de la tabla, se puede ver que la mayor parte de la energía que se aporta al sistema proviene de la estación de bombeo (E.B.), y únicamente un **8%** proviene de forma natural. Esto es lógico pues la balsa con la EB está situada a una cota de 5 metros, y la cota máxima y mínima de la red son 13 y 3 metros respectivamente.

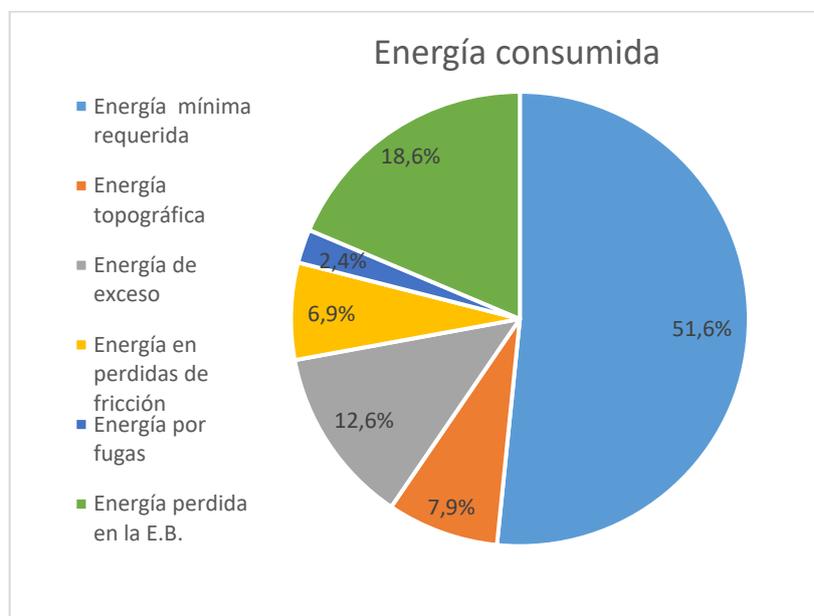
En cuanto a las bombas, la de velocidad fija (BVF) es la que más aporta con un **38,5%**, esto es debido a que está continuamente encendida. La BVV aporta prácticamente lo mismo que la BVF1 (**30,75%**), y eso que la BVF1 no trabaja en el turno 5, esto es debido a que la BVV adapta su velocidad mediante el variador de frecuencia para alcanzar la presión de consigna establecida.



Gráfica 16: Energía total aportada en el periodo 2

Los resultados de la segunda parte de la auditoría muestran que, de toda la energía consumida, más de un 70% es entregada a los usuarios. La energía perdida en fugas apenas supone un 2,5%, lo cual es lógico si se tiene en cuenta que las fugas de esta red son testimoniales. La energía que se pierde debido a la fricción del agua con la red supone casi un 7%, mientras que la energía que se pierde en la EB se sitúa en un 18%.

Volviendo a la energía entregada a los usuarios, un 71,7% de la misma es energía mínima requerida por los usuarios, un 11% es energía topográfica, y un 17,5% es debido a la energía de exceso. El bajo valor de la energía topográfica es lógico debido al poco desnivel topográfico presente en la red. El hecho de haber reducido la presión mínima de servicio de 30 a 25 mca, ha provocado un aumento de la energía de exceso, lo que conlleva consigo una reducción del porcentaje de energía mínima requerida. Este hecho se corregirá con las medidas de mejora que se propondrán más adelante, y se constatará como la energía de exceso se reducirá, aumentando la energía útil del sistema.



Gráfica 17: Energía consumido en el periodo 2

Como puede observarse de una manera más clara en el gráfico anterior, la energía mínima requerida supone un 51,6% del total, no es una cifra mala, pero es mejorable.

Para hacerse una mejor idea de cuál es el estado actual de la red, se va a proceder a comentar los indicadores que ha calculado ITAenergy en referencia al periodo 2.

Indicadores de Contexto	
Procedencia de la energía $C_1$	0,081
Exigencia energética de la red $C_2$	1,316
Indicadores de Gestión	
Exceso de energía suministrada $I_1$	1,937
Eficiencia de la red $I_2$	0,72
Energía de fricción $I_3$	0,069
Energía asociada a las fugas $I_4$	0,029
Suficiencia en el cumplimiento de estándares $I_5$	1,396
Energía adicional de bombeo generada por fugas $I_6$	1,019

Tabla 24: Indicadores del periodo 2

El indicador  $C_1$  muestra, de toda la energía suministrada, que porcentaje de ella proviene de forma natural, siendo 1 el valor más favorable. Como se constata la mayor parte de la energía la suministra la EB ya que  $C_1 = 0,081$

El indicador  $C_2$  da una idea de las exigencias energéticas de la red asociadas a los desniveles topográficos. Siendo 1 el valor más favorable, en la presente red  $C_2 = 1,05$ ; lo que pone de manifiesto los bajos desniveles topográficos existentes en la red.

EL indicador  $I_1$  sirve para tener una idea del exceso de energía del sistema, y su valor para este caso es de  $I_1 = 1,937$ . En cuanto a la eficiencia de la red, que se mide sobre 1, y se calcula dividiendo la energía entregada a los usuarios entre el total de la energía aportada, se obtiene un resultado meritorio con un  $I_2 = 0,72$ . Esto quiere decir que de toda la energía aportada al sistema, más de un 70% llega a los usuarios.

Los indicadores  $I_3$  y  $I_4$  calculan el porcentaje de energía que se ha perdido debido a las pérdidas por fricción y por fugas, y como se observa en la tabla anterior se obtienen unos resultados para estos indicadores bueno. Aunque el indicador de las pérdidas por fricción salga realmente bueno, lo que implica un correcto dimensionamiento de las tuberías de la red, hay que destacar que una tubería del sistema tiene un diámetro incorrecto, lo que provoca que un sector sufra presiones por debajo de las requeridas como ya se ha comentado previamente.

El indicador  $I_5$  muestra la suficiencia del cumplimiento de los estándares de la red. Pero este resultado hay que cogerlo con precaución, ya que el cálculo lo obtiene cogiendo el total de energía entregada a los usuarios y el total de energía mínima requerida. Este hecho significa que  $I_5$  puede ser mayor que 1, pero que en determinados nudos la presión sea insuficiente. En el presente caso  $I_5 = 1,4$ .

Por su parte el gasto energético extra que suponen las fugas apenas es apreciable y obtiene un valor de  $I_6 = 1,019$ .

### 7.3.2. Resultados periodo 6

El periodo elegido para representar las partes del año en los que en cada turno se regaban 2 horas ha sido el periodo 6. Su elección se debe a que se trata del periodo con más días de riego y, sobre todo, el periodo en el que más volumen de agua se inyecta con diferencia.

En este periodo tal y como pasaba con el periodo 2 no se llegaban a cumplir las presiones mínimas, por lo que a la hora de calcular la auditoría energética se redujo la presión de referencia a 25 mca. El ajuste de la E.B. se ha hecho para conseguir la presión de consigna aguas abajo de la misma de 45 mca, y su funcionamiento a lo largo del periodo se muestra a continuación.

	Periodo 6		
	BVV	BVF	BVF1
Turno 1	$\alpha = 0,975$	On	On
Turno 2	$\alpha = 0,92$	On	On
Turno 3	$\alpha = 0,975$	On	On
Turno 4	$\alpha = 0,93$	On	On
Turno 5	$\alpha = 0,93$	On	Off

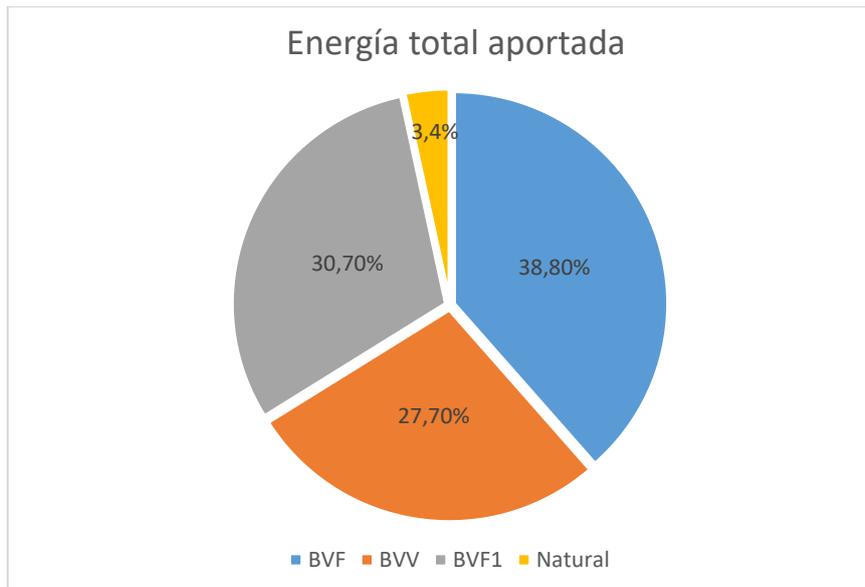
Tabla 25: Funcionamiento de la estación de bombeo en el periodo 6

Tal y como ocurre en la mayoría de los periodos, las tres bombas funcionan de continuo salvo en el turno 5, donde la BVF1 se para. Sin más dilación se adjuntan los resultados de la auditoría energética.

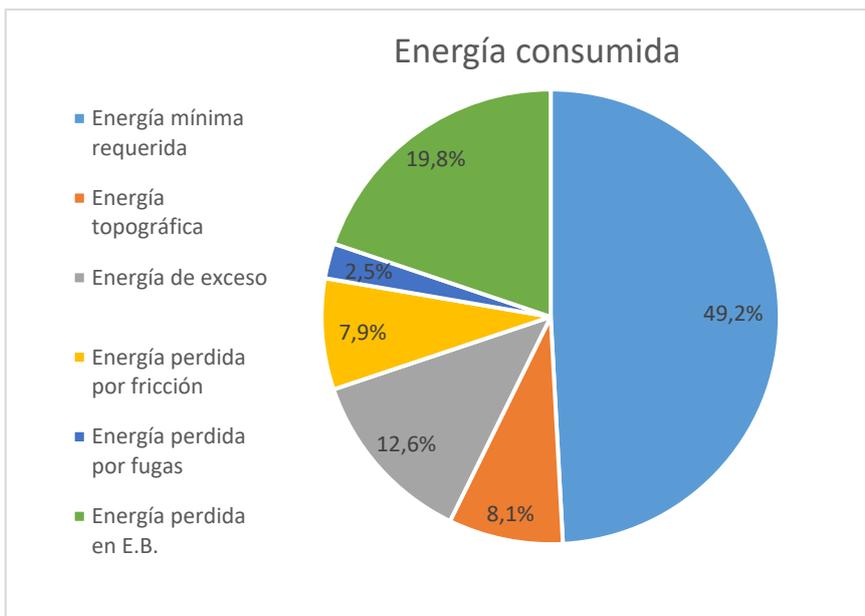
<i>Auditoría energética. Periodo 6</i>	kWh/día	kWh/periodo	Porcentaje (%)
<b>Energía total aportada</b>	1859	8740	
Energía aportada por las bombas	1796	84440	96
Energía de la bomba BVF (Tpo. func. 5,00 h)	712	33473	39
Energía de la bomba BVV (Tpo. func. 5,00 h)	514	24171	28
Energía de la bomba BVF1 (Tpo. func. 4,00 h)	570	26795	31
Energía natural	63	2968	3
<b>Energía total consumida</b>	1859	87407	
Energía entregada a los usuarios	1297	60980	69
Energía mínima requerida	915	43002	70
Energía topográfica	149	7041	11
Energía de exceso	234	11005	18
Energía disipada por fricción	147	6916	7
Energía perdida a través de las fugas	46	2161	2
Energía perdida en las bombas	369	17349	19
Energía perdida en la bomba BVF	143	6753	38
Energía perdida en la bomba BVV	110	5182	29
Energía perdida en la bomba BVF1	115	5413	31

Tabla 26: Resultados de la auditoría energética del periodo 6

Cogiendo los datos de la tabla anterior se crean las siguientes gráficas donde se podrá ver mejor el estado de la red.



Gráfica 18: Energía aportada en el periodo 6



Gráfica 19: Energía consumida durante el periodo 6

Analizando la energía aportada, destacar respecto al periodo 2 que la energía natural todavía es menor, quedándose en este periodo en apenas un 3,5%. En cuanto a la energía suministrada por las bombas, la BVF que está en funcionamiento durante todo el periodo es la que más aporta con un 38,8%, seguido por la BVF1 con un 30,7% pese a que no funciona durante el turno 5 y, por último, la BVV con un 27,7%.

En cuanto a la energía consumida, la energía mínima requerida supone menos de la mitad de toda la energía aportada, lo cual significa que la eficiencia energética del periodo 6 será peor que la del periodo 2. Parte del porcentaje perdido por la energía mínima requerida se la ha llevado las pérdidas

por fricción en la red, lógico si se tiene en cuenta que se ha inyectado un mayor volumen, con puntas de caudal también mayores. Los resultados de las pérdidas en la EB también empeoran, y un 19,8% de la energía se pierde en el sistema de bombeo. Por lo demás, los valores son similares a los del periodo 2.

Indicadores de Contexto	
Procedencia de la energía $C_1$	0,034
Exigencia energética de la red $C_2$	1,199
Indicadores de Gestión	
Exceso de energía suministrada $I_1$	2,033
Eficiencia de la red $I_2$	0,698
Energía de fricción $I_3$	0,079
Energía asociada a las fugas $I_4$	0,03
Suficiencia en el cumplimiento de estándares $I_5$	1,418
Energía adicional de bombeo generada por fugas $I_6$	1,018

Tabla 27: Indicadores del periodo 6

Se aprecia como el indicador  $C_1$  todavía es más bajo que en el periodo 2 situándose en  $C_1=0,034$ . Mientras que la exigencia energética de la red continúa siendo baja, pero sube hasta  $C_2=1,2$ .

EL indicador  $I_1$  del exceso de energía del sistema se sitúa en  $I_1 = 2,033$  mientras que la eficiencia de la red alcanza el  $I_2 = 0,698$ ; ambos valores ligeramente peores que los registrados en el periodo 2, pero muy similares.

Los indicadores  $I_3$  y  $I_4$  que calculan el porcentaje de energía que se ha perdido debido a las pérdidas por fricción y por fugas obtiene un valor de  $I_3 = 0,079$  y  $I_4 = 0,03$ . Se pone de manifiesto el aumento de las pérdidas por fricción, hecho que ya se había observado con el aumento del porcentaje de energía perdida debido a la fricción.

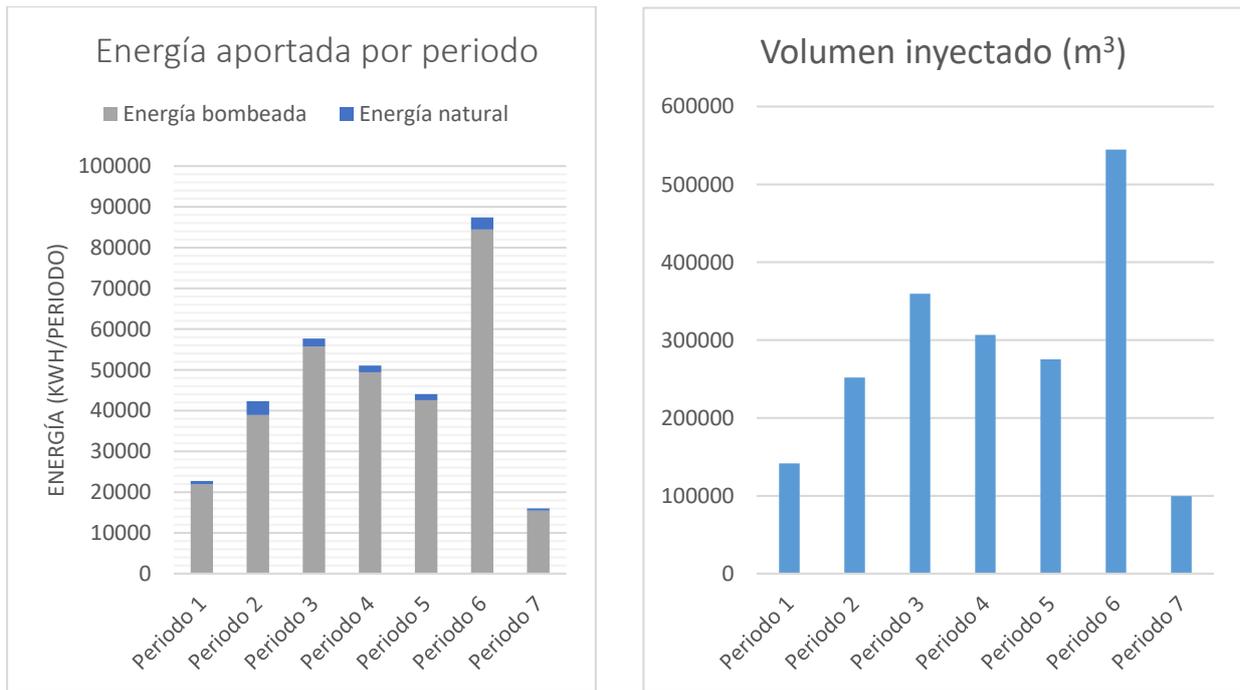
Por su parte, tanto el indicador de la suficiencia del cumplimiento de los estándares y de la energía adicional de bombeo debido a las fugas apenas han sufrido ningún cambio.

### 7.3.3. Resultados globales

A continuación, se analizan los resultados obtenidos de todos los periodos desde un punto de vista de global.

#### 7.3.3.1. Energía aportada

En las dos tablas siguientes se adjuntan la energía aportada por periodo, así como el volumen inyectado en  $m^3$ .



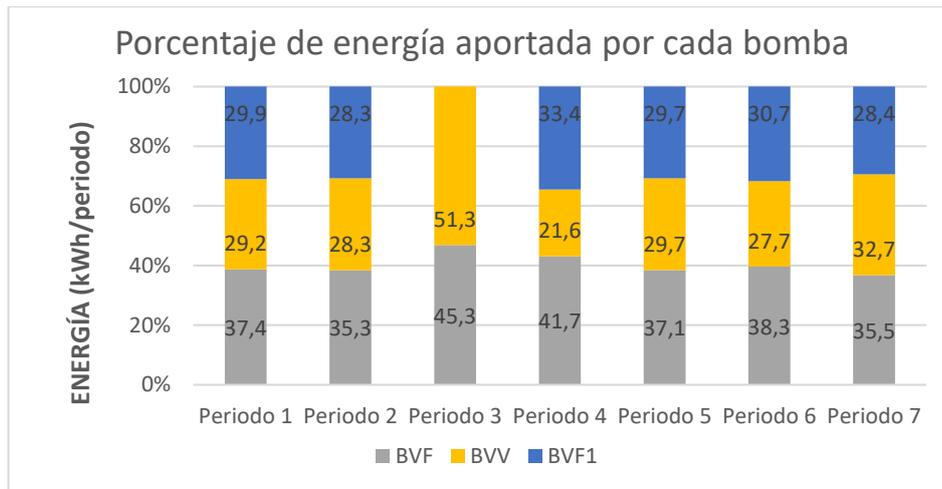
Gráfica 20: Comparativo energía aportada y volumen inyectado

Como puede observarse, la energía natural en el total de la energía aportada es ínfima, aspecto que ya se había comentado anteriormente. En cuanto a la diferencia entre periodos, únicamente varía la cantidad de energía aportada en función del volumen de agua inyectado en dicho periodo. Este hecho se puede ver al comparar las dos tablas mostradas arriba. La forma de las gráficas son exactamente la misma.

Analizando pues con más detalle la EB, hay que volver a decir que la componen 3 bombas de las mismas características, con el importante matiz de que dos de ellas son de velocidad fija, y una de ellas posee un variador de frecuencia para variar su velocidad.

El funcionamiento de la misma ya se ha explicado en esta memoria. La EB funciona de forma que aguas debajo de la misma se consigan 45 mca. Para ello se juega con las tres bombas, desconectando y conectando las bombas de velocidad fija, y variando la velocidad de la bomba de velocidad variable para adaptarse así a las variaciones de caudal de cada uno de los turnos.

Eso significa que la BVV (bomba de velocidad variable) será la única bomba que seguro esté siempre funcionando, la BVF y BVF1 (las dos bombas de velocidad fija) podrán estar en determinados turnos apagadas, pero hay que recordar que siempre que estén funcionando lo harán al 100%. Antes de seguir analizando la E.B. a lo largo del año. Se adjunta una tabla con los porcentajes de energía aportada por cada una de las bombas en cada uno de los periodos.



Gráfica 21: Porcentaje de energía aportada de cada una de las bombas

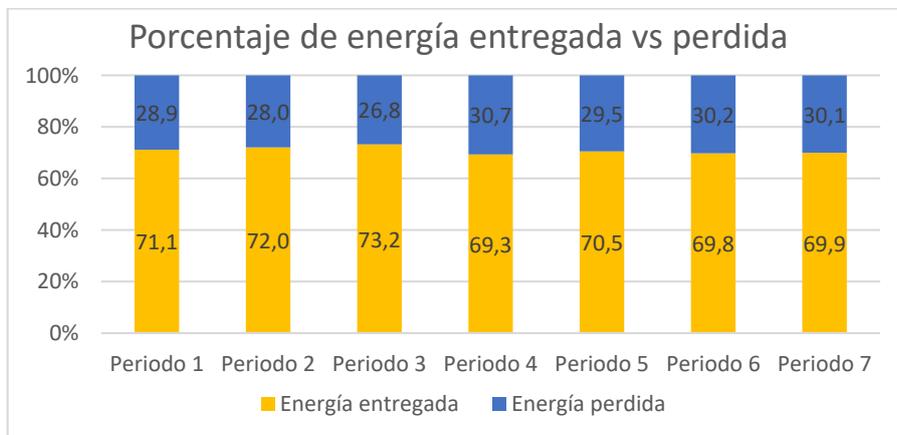
La BVF es la bomba que más energía aporta en cada uno de los periodos, salvo en el periodo 3, esto ocurre porque la BVF1 en mucho de los periodos se encuentra apagada en el Turno 5, y porque la BVV, pese a que trabaja también todo el tiempo, nunca lo hace al 100% ya que se dedica variar su velocidad para mantener la presión de consigna ante los cambios de caudal.

En cuanto a la BVV y a la BVF1 depende del turno aporta más una u otra. Por ejemplo, en el Periodo 3, debido a los bajos caudales que había, la BVF1 no se conectó en ningún momento, de hecho, en este periodo la BVF también se paró en el Turno 5. Esto provocó que la BVV en el Periodo 3 fuera la bomba que más energía aportó. Es cierto que, generalmente, la BVF1 aporta más que la BVV, pese a que en el Turno 5 se mantiene apagada en todos los periodos.

### 7.3.3.2. Energía consumida

La forma en la que se consume la energía es más diversa a como se aporta. Este hecho se refleja en la cantidad de aspectos diferentes que se van a analizar a continuación.

Existen dos formas principales de clasificar la energía consumida, por un lado, está la energía que es entregada a los usuarios, y por otro está la energía que se consume en el camino por la red.



Gráfica 22: Comparativo energía entregada y energía consumida en pérdidas

Como se aprecia en la gráfica anterior, a lo largo del año, entorno al 70% de la energía aportada a la red es entregada a los usuarios, en este caso, energía que llega en forma de presión y caudal a los hidrantes. Esto significa que, en general, un 30% de la energía inyectada se pierde por el camino, ya sea debido a la fricción, a las fugas, o a las pérdidas en la EB.

#### 7.3.3.2.1. Energía entregada a los usuarios

La energía entregada a los usuarios, en este caso, es la energía que llega en forma de presión y de caudal a cada uno de los hidrantes. Ésta a su vez, se divide en otras tres:

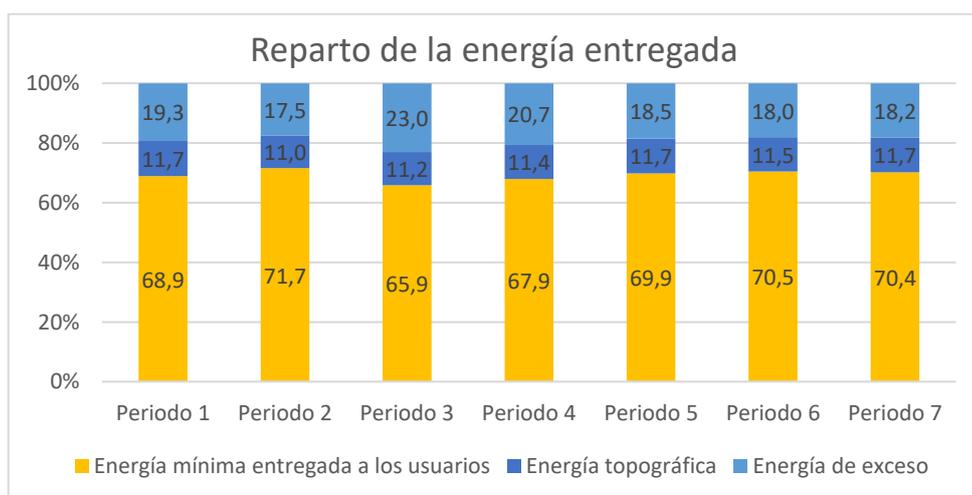
- $E_{uo}$ , energía mínima requerida por los usuarios
- Energía topográfica
- Energía de exceso.

La  $E_{uo}$  es la suma del caudal y la presión con la que se cumplen los requisitos mínimos que el usuario tiene contratado con la empresa suministradora. Desde un punto de vista, lo ideal sería abastecer todos los puntos de consumo en todo momento con la presión mínima necesaria. Si esto se consiguiera, toda la energía entregada a los usuarios sería en forma de  $E_{uo}$ . Lamentablemente, esto no es así, y debido a los desniveles topográficos de la red y a la complejidad de regularla, se suministra muchas veces con presiones por encima de la mínima necesaria.

La energía topográfica es un tipo de energía de exceso debida a las irregularidades del terreno donde se asienta la red. Esto causa que para asegurar la presión mínima en un nudo A, cuya cota es mayor que la de un nudo B, se tenga que llegar al nudo B con una presión superior a la mínima requerida para asegurar dicha presión mínima en el nudo A.

Por último, se tiene la energía de exceso, que es causada por una regulación incorrecta de la E.B ya que está aportando más energía de la necesaria.

Una vez explicados los tipos de energía entregada a los usuarios se adjuntan unas tablas con los resultados obtenidos.



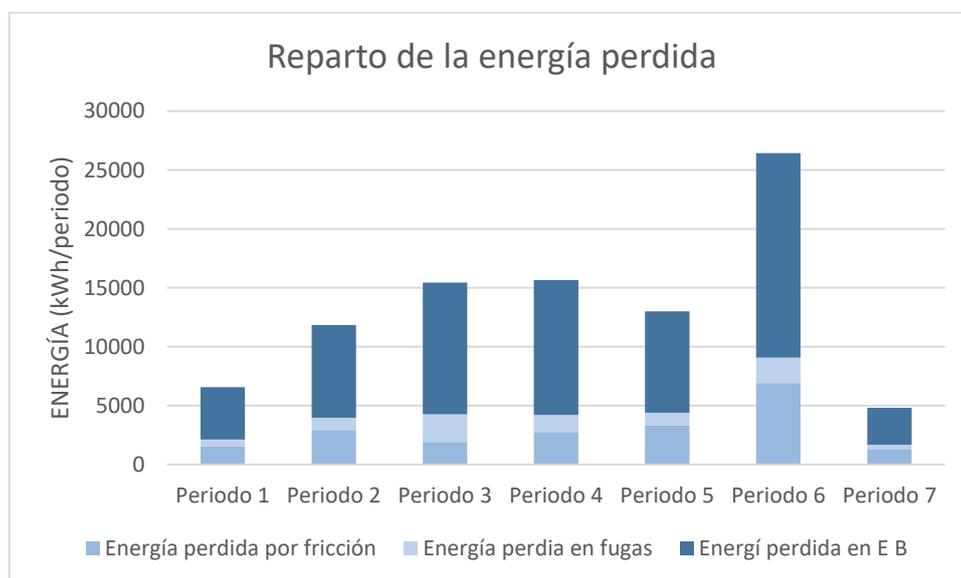
Gráfica 23: Reparto de la energía entregada

Como se acaba de mencionar, la energía entregada a los usuarios se divide en tres energías más. Se puede ver como en torno a un 70% de la energía que llega a los usuarios es en forma de  $E_{uo}$ , es decir, en forma de energía mínima requerida por los usuarios. En torno a un 11% y un 12% es energía topográfica debida a los desniveles geográficos existentes en la red. Este tipo de energía no se puede eliminar a no ser que se pueda modificar la configuración de la red.

La energía de exceso propiamente dicha, es decir, la energía que está aportando de más en este caso la estación de bombeo, se sitúa en torno al 20%. Este tipo de energía se puede reducir regulando el funcionamiento de la E.B. y será uno de los puntos a tratar en el apartado de mejoras.

#### 7.3.3.2.2. Energía perdida

La energía se puede perder por tres razones, por la fricción del agua con los propios elementos del sistema, por el agua que se fuga que lleva embebida la energía mediante la cual se ha bombeado, y, por último, las pérdidas que se producen en la estación de bombeo.

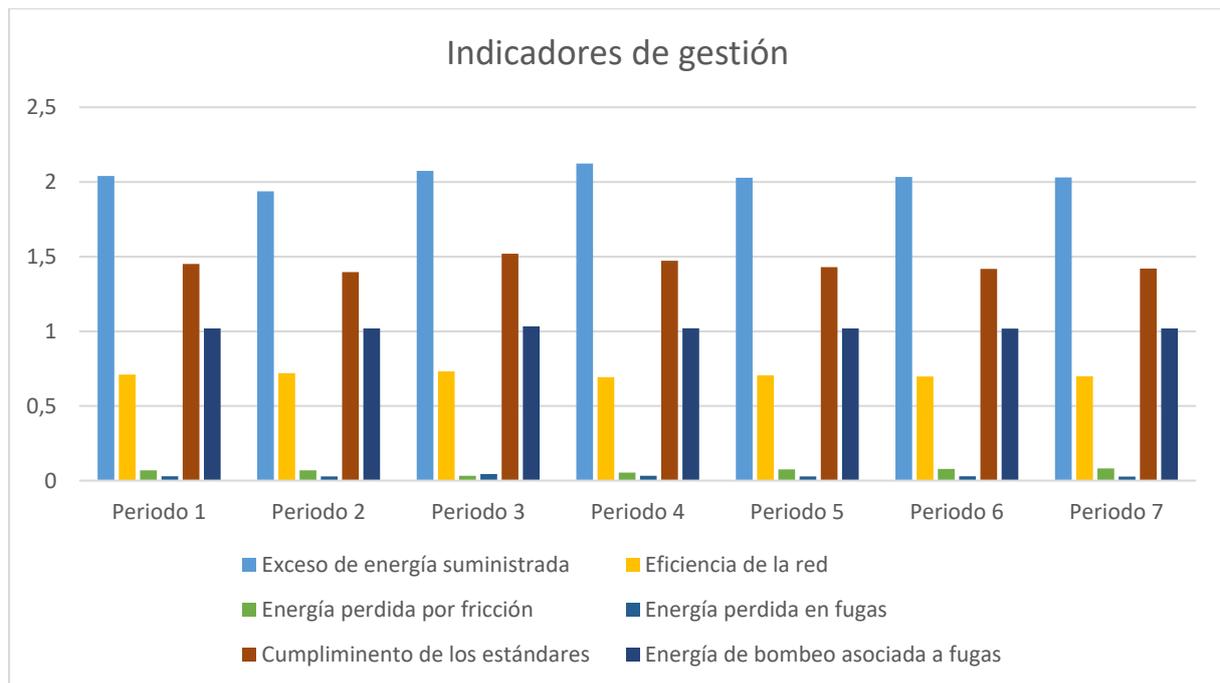


Gráfica 24: Reparto de la energía perdida

La energía pérdida en las fugas es muy pequeña, lógico si se tiene en cuenta el bajo porcentaje de fugas que presenta la red. La energía perdida por la fricción adquiere valores más altos, especialmente en aquellos periodos donde el volumen inyectado y el caudal bombeado son elevados. Aun así, los mayores valores de energía perdida se obtienen en todos los periodos en la estación de bombeo.

#### 7.3.3.3. Indicadores

Como se ha explicado anteriormente, los indicadores son un recurso que sirve para mostrar cual es el estado de la red estudiada. A continuación, se adjunta una gráfica con los indicadores de gestión, que son aquellos que puede verse modificados en función de cómo se gestione la red.



Gráfica 25: Resumen de los indicadores de gestión

En todos los periodos, salvo el periodo 2, y por muy poco, la energía suministrada,  $I_1$ , es más del doble de la energía que requieren los usuarios. El exceso de energía varía dependiendo del periodo en el que se esté, pero como se puede observar la diferencia entre cada uno de ellos es mínima.

En cuanto a la eficiencia de la red,  $I_2$ , que se obtiene de dividir la energía total aportada entre la energía aportada a los usuarios, se puede ver que ronda el 70% en todos los periodos. Aun siendo esta eficiencia un valor aceptable para una red se espera poder mejorar dicho dato con las medidas de mejora que se propondrán posteriormente.

Los valores  $I_3$  y  $I_4$  son muy bajos en todos y cada uno de los periodos. El valor  $I_3$  indica que el sistema está correctamente dimensionado, aunque como ya se ha explicado, se ha detectado que una tubería posee un diámetro inferior al debido, y ello provoca que no se alcancen en algunos hidrantes la presión mínima de servicio establecida por la Comunidad de Regantes de 30 mca. Respecto al valor  $I_4$  que hace referencia a las fugas, era de esperar que fuera bajo debido a que prácticamente no existen fugas en la presente red.

Por último, el indicador  $I_6$  hace referencia al gasto energético extra que provocan las fugas. En el presente caso el valor de  $I_6$  es casi 1, lo cual significa que no hay apenas un gasto extra provocado por las fugas, lo cual a su vez es debido porque la presente red no tiene apenas fugas.

## 8. Mejoras propuestas

### 8.1. Alcanzar la presión mínima

Aunque no es una mejora destinada al ahorro energético o hídrico, la primera medida de mejora a implantar será la de conseguir que se alcancen en todo momento y en cualquier punto de la red la presión mínima de funcionamiento de los hidrantes de 30 mca.

Para ello se trabajará con el periodo que tenga el turno en el cual se inyecta un caudal más elevado.

	Máximo caudal (l/s)	Máximo caudal (m <sup>3</sup> /h)
Periodo 1	375	1350
Periodo 2	382	1374
Periodo 3	248	891
Periodo 4	325	1168
Periodo 5	380	1369
Periodo 6	369	1327
<b>Periodo 7</b>	<b>396</b>	<b>1426</b>

Tabla 28: Análisis del periodo más crítico

Como se puede observar en la tabla anterior el periodo más crítico es el séptimo, donde en un turno se llega a bombear 396 l/s. En este instante, la red cuenta con dos zonas en las cuales la presión de los hidrantes es inferior a los 30 mca.

En estas circunstancias, y como se ha comentado en el análisis de la red, tanto la zona A como la zona B presentan hidrantes con presiones inferiores a la mínima recomendada.

Analizando la E.B. se pudo ver como en este instante las 3 bombas están trabajando, y la BVV lo hace al máximo de potencia por lo que, con el sistema actual, y con la distribución de riegos existente, no se puede satisfacer el requisito de presión mínima en todos los hidrantes en los momentos en los que más caudal consumen los regantes.

Una vez analizada la situación actual se presentan tres posibles mejoras para alcanzar la presión mínima. Como luego se verá, dichas medidas no son excluyentes entre sí, sino que pueden ser complementarias.

#### 8.1.1. Añadir una nueva bomba

En la primera propuesta de mejora, para alcanzar la presión mínima se estudiará la posibilidad de instalar tres nuevas bombas en serie, una por cada bomba ya existente.

La regulación de la E.B. hasta el momento consistía en mantener 45 mca a la salida de la misma. En este caso se optará por buscar que en todo momento se cumpla la presión mínima de 30 mca en todos los hidrantes, por lo que a la salida de la E.B. dependiendo de la situación la presión podrá ser mayor o menos a los 45 mca anteriormente citados.

Tras instalar las nuevas bombas en serie y ajustar el funcionamiento de la E.B, se consigue mantener una presión mínima de 30 mca en todos los hidrantes de la red. El problema es que para lograr esto se tiene que trabajar con presiones elevadas en grandes áreas de la red, mayores de 55 mca en algunos casos, con los peligros de rotura y fugas que ello conlleva, y con el gasto energético que supone.

Con todos estos datos se llega a la conclusión de que colocar bombas en serie, si bien soluciona el problema de las presiones mínimas, podría provocar otros y dadas las elevadas presiones generaría un sistema poco eficiente y con un rendimiento bajo. Además, el coste económico que ello supondría en concepto de inversión inicial sería muy elevado, por lo que esta alternativa de mejora queda descartada.

### 8.1.2. Sustituir los tramos con mayores pérdidas

Como ya se ha explicado anteriormente, la red sufre presiones menores de 30 mca en dos zonas localizadas, y en una de ellas se ha identificado claramente cuál es el problema, el infra-dimensionamiento de algunos de los tramos de tuberías.

Es cierto que el valor óptimo de pérdidas unitaria en tuberías depende de muchos factores, por lo que es difícil dar una cifra a partir de la cual se pueda decir que la tubería está infra-dimensionada. Sin embargo, unos valores estándares de pérdida unitaria para el dimensionamiento de los tramos de una red de distribución serían entre 6 y 10 mca/km para tuberías de gran diámetro y entre 2 y 4 mca/km para tuberías más pequeñas. En la presente red se tienen tramos donde las pérdidas unitarias pasan de manera frecuente los 15 mca/km, incluso pueden llegar a superar los 40 mca/km.

La propuesta de mejora consiste en sustituir los tramos con mayores pérdidas unitarias. Tras realizarlo se recogen los siguientes resultados:

	Estado original		Modificación 1		Modificación 2		Modificación 3	
Id tubería	Diámetro original (mm)	Pérdidas Unitaria (m/km)						
p287	125	20,15	160	5,79	160	5,79	160	5,8
p295	110	20,79	125	10,93	125	10,93	160	3,16
p297	110	16,63	125	8,76	125	8,76	125	8,78
p303	75	43,65	110	6,3	110	6,3	110	6,31
p304	75	20,39	110	3,06	110	3,06	110	3,07
p299	110	13,17	110	13,17	125	6,91	125	6,91
	Presión mínima	18,97	Presión mínima	28,36	Presión mínima	29,23	Presión mínima	30,3

Tabla 29: Modificación presión mínima en zona A, mediante sustitución de tuberías

Como se puede observar, sustituyendo las tuberías que presentaban unas pérdidas unitarias elevadas se consigue subsanar el problema de las presiones que sufrían los hidrantes de la **zona A**.

Realizando el mismo proceso sobre la zona B se obtienen los siguientes resultados del modelo de la red en Epanet:

Id tubería	Estado original		Modificación 1	
	Diámetro original (mm)	Pérdidas Unitaria (m/km)	Diámetro original (mm)	Pérdidas Unitaria (m/km)
P122	200	11,41	250	3,69
P120	200	10,45	250	3,32
P87	110	10,16	125	5,36
P366	90	20,38	110	7,41
	Presión mínima	19,49	Presión mínima	24,39

Tabla 30: Modificación de la presión mínima en la zona B, mediante sustitución de tuberías

Como se aprecia, pese a la sustitución de los tramos más solicitados, no se logra alcanzar la presión mínima requerida en la zona B. Esto concuerda con el análisis previo realizado donde se concluía que el problema de dicha zona radicaba en su elevada cota y distancia respecto de la estación de bombeo.

A la vista de los resultados se estima que la opción de sustituir los tramos de tubería con mayores pérdidas unitarias no es la solución para alcanzar la presión mínima necesaria. Sin embargo, sí que se tendrá que tener en cuenta en un futuro pues sería posible obtener un ahorro económico teniendo en cuenta el infra-dimensionamiento que sufren algunos tramos situados en la zona A.

### 8.1.3. Redistribuir los turnos de riego (cada turno riega 1 hora)

En la situación actual se tiene un sistema que riega en 5 turnos. Los 4 primeros tienen unos caudales similares siendo el primero y el tercero; y el segundo y el cuarto prácticamente iguales entre sí. Sin embargo, el quinto turno presenta en todos los periodos un caudal significativamente menor. Esta situación se produjo al unirse nuevos comuneros y aglutinar, en el último turno, a todos los inscritos en la red más tarde. Esta opción se tomó para no alterar la distribución de las parcelas que se regaban en cada uno de los turnos, pero parece evidente que dado el problema de presiones que tiene la red habrá que volver a rehacer la organización del riego de las parcelas de forma que los 5 turnos inyecten el volumen de agua más parecido posible. De esta forma se limitará de una forma importante los problemas de presiones derivados de inyectar grandes caudales de agua.

Como ya se ha comentado anteriormente, los cálculos se efectuarán cogiendo como base el periodo 7, pues es el que tenía el mayor caudal punta. Cabe señalar que las presentes mejoras que se recogen en este apartado solo podrán ser de aplicación para los periodos 1, 2 y 7; puesto que son los único en los que cada turno de riego consta de una hora.

#### 8.1.3.1. Modificación 1

La primera prueba consistió en igualar, modificando el patrón de demanda, el caudal que se inyectaba en cada uno de los turnos. Además, se modificó el control de la E.B. para adaptarse a las nuevas condiciones.

En dichas condiciones se obtienen los siguientes resultados:

	Condiciones originales		Condiciones tras mejora	
	Caudal (l/s)	Presión mínima (mca)	Caudal (l/s)	Presión mínima (mca)
Turno 1	396	Zona A	346	Zona A
Turno 2	355	18,97	346	26,13
Turno 3	396	Zona B	346	Zona B
Turno 4	363	19,49	346	25,87
Turno 5	221		346	

Tabla 31: Resultados tras igualar el caudal de riego en todos los turnos

Al igualar el caudal de todos los turnos se consigue reducir el caudal punta en 50 l/s. Este hecho unido con un ajuste de la E.B. permite aumentar las presiones mínimas de las zonas A y B de 19 mca hasta los 26 mca. De esta forma se está muy cerca de cumplir la presión mínima requerida, lo que demuestra que es efectivo tomar medidas relacionadas con la organización de los turnos.

#### 8.1.3.2. Modificación 2

El siguiente paso es intentar cumplir con la presión mínima requerida modificando los turnos de riego y la duración de los mismos, pero se realizará teniendo en cuenta una condición. No se podrá exceder de las 8 horas de riego, de forma que se regará íntegramente en horas valle.

Modificando los patrones de demanda se consigue repartir en partes iguales el volumen inyectado a lo largo de las 8 horas. Al cambiar el caudal inyectado y aumentar el número de horas de riego se debe ajustar de nuevo los controles sobre la E.B. Tras realizar esto se obtiene los siguientes resultados:

Condiciones tras ajuste de turnos			
Hora		Caudal inyectado (l/s)	Presión mínima (mca)
0:00	Turno 1	219	Zona A
1:00		219	32,19
2:00	Turno 2	219	
3:00		219	
4:00	Turno 3	219	Zona B
5:00		219	
6:00	Turno 4	219	30,34
7:00	Turno 5	219	

Tabla 32: Resultados tras modificar el número de horas de riego

Repartiendo el volumen inyectado a lo largo de ocho horas se consigue reducir el caudal inyectado punta a 219 l/s. De esta forma se logra obtener en todos los hidrantes una presión mínima en cualquier instante mayor de 30 mca.

Otra de las ventajas que aporta redistribuir los turnos es que permite que una de las bombas de velocidad fija permanezca parada constantemente, con lo cual quedaría como bomba de reserva y entraría en caso de que hubiera algún problema en las otras dos.

#### 8.1.4. Redistribución de turnos de riego, (cada turno riega 2 horas)

Hasta ahora se había trabajado con el periodo 7, pues es el que disponía del caudal punta más elevado. El problema es que dicho periodo originalmente riega 5 horas al día, mientras que los periodos 3, 4, 5 y 6 riegan diez horas al día, por lo que debe estudiarse específicamente para dichos periodos cual debe ser la redistribución de los turnos.

El periodo 3 no presenta problema y sin la necesidad de hacer ninguna modificación cumple con la presión mínima, no ocurre lo mismo en el resto de periodos. Para saber cuál de los tres periodos restantes es el más crítico hay que fijarse en el volumen total que inyectan en una jornada de riego.

Horas	Periodo 4		Periodo 5		Periodo 6	
	l/s	m3/h	l/s	m3/h	l/s	m3/h
0:00	182	655	212	765	206	741
1:00	182	655	212	765	206	741
2:00	325	1168	<b>380</b>	1369	369	1327
3:00	325	1168	380	1369	369	1327
4:00	291	1046	340	1226	329	1185
5:00	291	1046	340	1226	329	1185
6:00	325	1168	380	1369	369	1327
7:00	325	1168	380	1369	369	1327
8:00	297	1071	348	1254	337	1214
9:00	297	1071	348	1254	337	1214
<b>Total m3</b>	10216		<b>11967</b>		11588	

Tabla 33: Análisis del periodo más desfavorable

Como se puede observar, el periodo 5 es el que presenta un caudal punta más elevado, y al cabo de la jornada es en el que se inyecta un mayor volumen. Por tanto, será este periodo el que se cogerá de base.

La estrategia a seguir es la misma que la empleada en el periodo 7 donde los turnos de riego duraban una hora. Se va a repartir el caudal de forma que en todas las horas, (los 5 turnos) se inyecte lo mismo, de forma que se tenga el caudal punta más bajo posible. Cabe señalar que en esta ocasión cada jornada de riego dura 10 horas, por lo que al menos uno de los turnos se realizará fuera de la zona valle de la tarifa horaria eléctrica. Esto significa que de ser posible se debe evitar regar durante más tiempo. Por lo que en un principio la opción de ampliar el número de horas de riego por jornada no se contempla.

Con todas estas premisas, se procede a modificar los patrones de demanda y a ajustar la E.B. en la red modelizada en Epanet del periodo 5.

Condiciones tras ajuste de turnos			
Hora		Caudal inyectado (l/s)	Presión mínima (mca)
22:00	Turno 1	332	Zona A
23:00		332	30,76
0:00	Turno 2	332	
1:00		332	
2:00	Turno 3	332	
3:00		332	
4:00	Turno 4	332	30,06
5:00		332	
6:00	Turno 5	332	
7:00		332	

Tabla 34: Resultados tras igualar los caudales en los diferentes turnos

Una vez el volumen inyectado se ha repartido por partes iguales en los diferentes turnos el caudal punta que se obtiene es de 332 l/s. Con este caudal, y ajustando la E.B. se logra asegurar la presión mínima de 30 mca en todos los hidrantes de la red en cualquier instante. Para ello es necesario tener las tres bombas en funcionamiento, y a la BVV se le exige funcionar a una velocidad un 6% superior a la nominal, valor aceptable para una bomba de velocidad variable.

#### 8.1.5. Análisis y conclusiones

Tras analizar las 4 propuestas realizadas para alcanzar la presión mínima, parece evidente que las más beneficiosas son la 3 y la 4, es decir, las de ajustar los turnos de riego.

La primera propuesta, la de incluir bombas en serie, si bien solucionara el problema de las presiones mínimas, lo realiza a un alto coste, tanto económico como energético. Además, el hecho de intentar solucionar el problema introduciendo más presión en la red provocaría un aumento de las pérdidas y la posibilidad de que estas aumenten en un futuro. Por tanto, esta propuesta queda claramente descartada.

La segunda propuesta consistía en reemplazar los tramos de tubería por donde pasa el agua camino a las zonas críticas, y que tuvieran unas pérdidas unitarias elevadas. Tal y como ya se ha comentado, si bien esta medida soluciona los problemas en la zona A, no es la propuesta adecuada para la zona B. Además, se trata de una solución con un alto coste económico, no solo por el precio del material, sino también por la obra civil que acarrearía consigo. Con toda esta información, se estima que tampoco es la solución a adoptar, aunque sí que habría que plantear en un futuro la posibilidad de sustituir al menos el tramo de tubería p303 ya que presenta unas pérdidas superiores a los 40 m/km.

La tercera y cuarta propuesta plantean la posibilidad de reordenar los turnos de riego. El objetivo es repartir el volumen inyectado a lo largo de todos los turnos de forma que se consiga tener el menor caudal punta posible.

Como se ha explicado anteriormente, en los periodos en los que actualmente se riega 5 horas al día, se pasará a regar 8, todas ellas en horas valle. En los periodos en los que actualmente cada turno

dura 2 horas se mantendrán igual, y en total en el día se regará durante 10 horas. Tras coger los dos periodos más críticos, el periodo 5 para aquellos que regaban durante 10 horas, y el periodo 7 para aquellos que regaban 5 horas, se comprueba que esta medida es totalmente efectiva, y se consigue llegar a la presión mínima requerida en todo momento.

Además, se trata de una medida que en principio no tendría ningún coste económico, salvo por supuesto el coste de encargar un estudio detallado y su implementación en el control de la red. Además, a falta de un análisis en profundidad supondría el poder reducir la potencia eléctrica contratada con lo que habría un ahorro en la factura eléctrica.

Con todos estos datos las propuestas escogidas para alcanzar la presión mínima requerida son la de reordenar los turnos de riego.

A continuación, se presentan los datos de la auditoría energética de los dos periodos en los que se ha reorganizado el modo de riego.

#### 8.1.5.1. Periodo 5 (10 horas)

A nivel de auditoría energética el principal cambio será la variación de la presión mínima requerida, pasando de los 25 mca introducidos anteriormente, a los 30 mca con los que trabajan de forma correcta los hidrantes.

Este hecho provoca que la comparación a nivel energético entre el periodo 5 en su estado actual, y el periodo 5 tras la gestión de los turnos de riego, no se pueda realizar en base a los datos absolutos ya que conducirían a conclusiones equivocadas. En lugar de eso, el análisis se realizará a partir de indicadores relativos como los que se adjuntan en la siguiente tabla.

	Periodo 5 original	Periodo 5 tras medidas
<b>Energía total aportada (kWh)</b>	48.985	44.063
<b>Energía mínima requerida por los usuarios (%)</b>	49,3	51,7
<b>Indicadores de Contexto</b>		
Procedencia de la energía	0,034	0,031
Exigencia energética de la red	1,197	1,164
<b>Indicadores de Gestión</b>		
Exceso de energía suministrada	2,028	1,932
Eficiencia de la red	0,705	0,713
Energía de fricción	0,076	0,063
Energía asociada a las fugas	0,029	0,033
Suficiencia en el cumplimiento de estándares	1,43	1,377
Energía adicional de bombeo generada por fugas	1,019	1,018
<b>Indicadores de Diagnóstico</b>		
Rendimiento ideal	0,85	0,87
Rendimiento real	0,49	0,52

Tabla 35: Variación del periodo 5 tras implantación de mejora para alcanzar la presión mínima

Como se puede comprobar en la tabla anterior, pese a que tras las mejoras, la energía aportada es mayor, se obtiene un rendimiento real del sistema superior al obtenido anteriormente. Esto ocurre al aumentar de una manera notable la energía aportada a los usuarios, ya que ello depende la presión

mínima que se marca del sistema. Al aumentar la presión mínima requerida, y tras haber ajustado la E.B, la energía de exceso suministrada también ha bajado, provocando consigo un aumento de la eficiencia de la red. Además, al haber disminuido de forma notable el caudal punta del periodo mediante el ajuste de los turnos de riego, la energía de fricción se ha visto también reducida.

#### 8.1.5.2. Periodo 7 (8 horas)

En este caso, al nivel de la auditoría energética además de cambiar la presión mínima necesaria, se cambiará el número de horas de riego de una jornada, pasando de 5 a 8. Tal y como se comentó en el apartado anterior, los resultados energéticos absolutos de la auditoría no servirán para comparar los sistemas, por lo que se recurrirá de nuevo a indicadores relativos del sistema.

	Periodo 7 original	Periodo 7 tras medidas
<b>Energía total aportada (kWh)</b>	16.011	20.674
<b>Energía mínima requerida por los usuarios (%)</b>	49	58
<b>Indicadores de Contexto</b>		
Procedencia de la energía	0,034	0,035
Exigencia energética de la red	1,198	1,165
<b>Indicadores de Gestión</b>		
Exceso de energía suministrada	2,03	1,723
Eficiencia de la red	0,699	0,723
Energía de fricción	0,082	0,032
Energía asociada a las fugas	0,028	0,041
Suficiencia en el cumplimiento de estándares	1,42	1,246
Energía adicional de bombeo generada por fugas	1,019	1,023
<b>Indicadores de Diagnóstico</b>		
Rendimiento ideal	0,85	0,87
Rendimiento real	0,49	0,58

Tabla 36: Variación del periodo 7 tras implantación de mejora para alcanzar la presión mínima

Se vuelve a constatar que, pese a que la energía total aportada vuelve a ser más elevada, el rendimiento real del sistema aumenta cerca de un 10% respecto al sistema en su estado actual. Las razones son las mismas que las explicadas anteriormente, se aumenta de forma considerable la energía mínima entregada a los usuarios lo que se traduce en un aumento de la eficiencia de la red y una disminución de la de exceso de energía suministrada.

## 8.2. Medidas de mejora sobre el estado actual

Tras mantener una conversación con el técnico de la Comunidad General de Regantes de Nules-Mascarell, se informó que, pese a las presiones menores de 30 mca que se tienen en algunas partes de la red, no tienen problemas para regar de forma correcta. Teniendo en cuenta este dato, tiene mayor interés y más posibilidades de llevarse a la práctica si se plantean medidas para mejorar la eficiencia de la red manteniendo las condiciones de presión actuales.

En una primera aproximación se calculará el gasto energético de los dos escenarios posibles a través de los puntos de funcionamiento de las bombas y, mediante estos datos y los precios de la

energía y de la potencia recogidos en las facturas eléctricas proporcionadas, calcular el coste eléctrico. Se trata de un cálculo aproximado ya que a la hora de calcular la energía consumida y la potencia contratada no se tienen en cuenta los rendimientos de los motores eléctricos, del variador de frecuencia ni del centro de transformación. Cuando se analice en profundidad la medida escogida sí que se trabajará con la factura eléctrica real y se realizará una estimación del ahorro real que se podrá conseguir con su aplicación.

### 8.2.1. Disminución de pérdidas por fricción

La segunda medida busca mejorar la eficiencia del sistema mediante la disminución de las pérdidas provocadas por la fricción en los tramos de tubería. Para ello se realiza un estudio sobre las pérdidas unitarias a lo largo de la red.

Como se ha comentado en apartados anteriores, los hidrantes críticos se sitúan en dos zonas de la red, la zona A y la zona B. Analizando el recorrido del agua hasta la zona A se observa claramente como son múltiples los tramos de tubería que presentan unas pérdidas elevadas. Sin embargo, los tramos por los que tiene que pasar el agua desde la estación de bombero hasta la zona B presentan unas pérdidas mucho más reducidas.

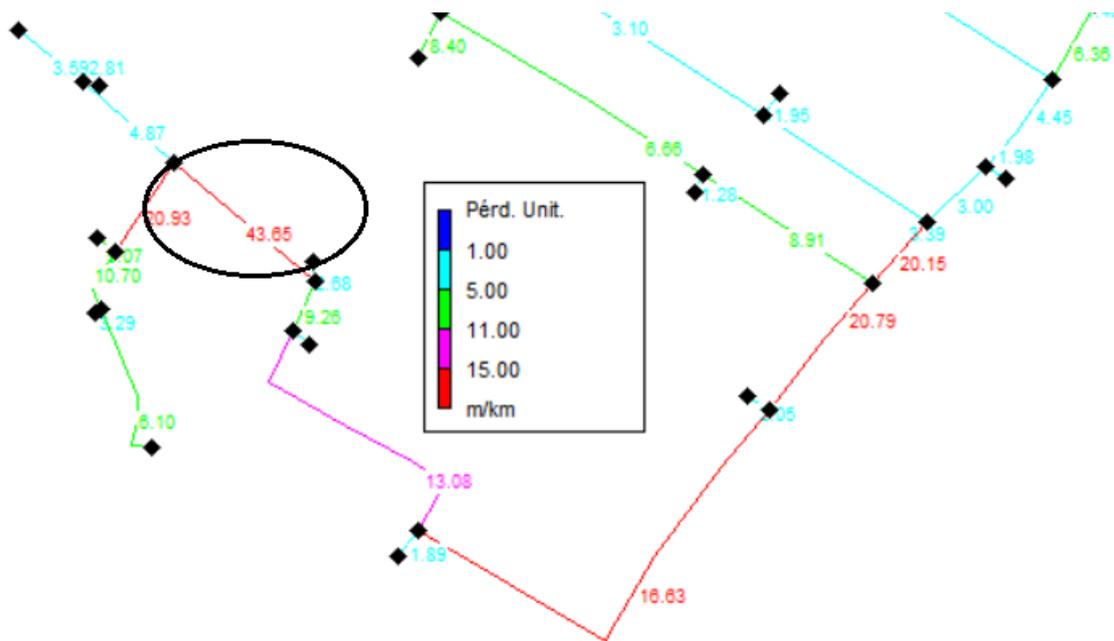


Ilustración 15: Pérdidas unitarias en dirección a la Zona A

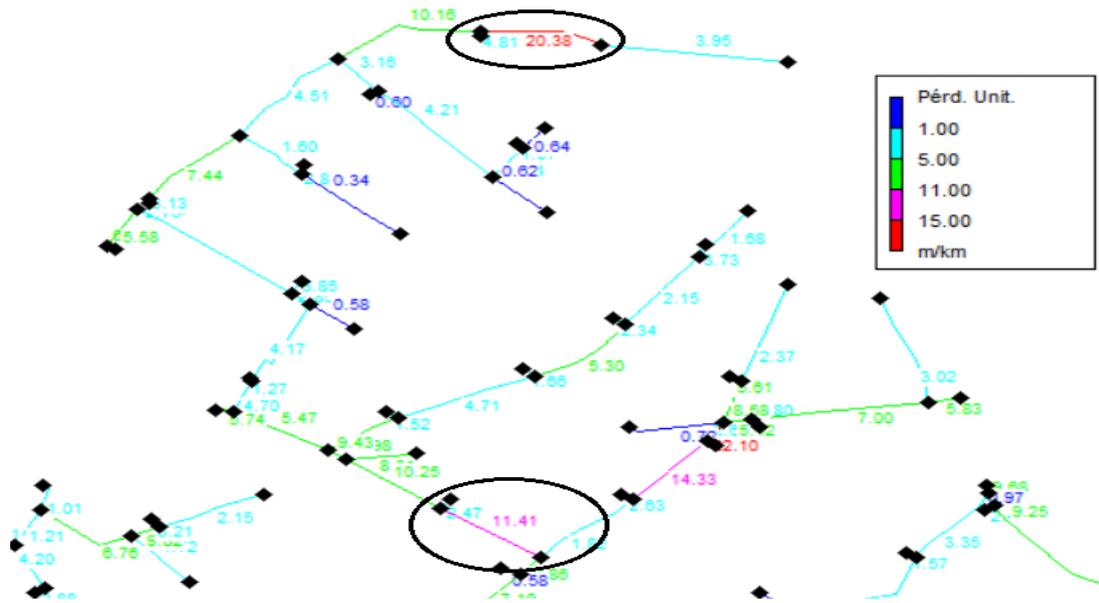


Ilustración 16: Pérdidas unitarias en dirección a la Zona B

Este hecho limita la medida que se está analizando, ya que, por mucho que se disminuyan las pérdidas en los tramos que discurren en dirección a la zona A, la medida estará limitada a las acciones que se puedan tomar en los tramos que transcurren en dirección a la zona B.

Analizando con detenimiento dichos tramos y buscando la máxima rentabilidad a la inversión que supone la instalación de una nueva tubería con un mayor diámetro se decide actuar sobre los dos tramos que presentan mayores pérdidas unitarias y cuya longitud es mayor. Dichos tramos se encuentran señalados en la ilustración anterior.

En la zona A se decide sustituir la tubería p303 de la cual ya se ha hablado en el presente proyecto, ya que presenta unas pérdidas que en algunos turnos superan los 40 mca/km. Además, se comprueba que únicamente sustituyendo dicha tubería se logran reducir las pérdidas en la zona A en mayor medida de lo que se reducen en la zona B pese a la sustitución de dos tramos.

		Estado original		Tras mejora
Zona	Id tubería	Diámetro original (mm)	Longitud (m)	Diámetro modificado (mm)
Zona A	p303	75	111,8	90
Zona B	P366	90	144,1	110
	p122	200	150,2	225

Tabla 37: Cambios de los tramos de tubería

El incremento del diámetro de los tramos sustituidos supone un cambio en el punto de funcionamiento de la estación de bombeo, por lo que se tendrá que ajustar para adaptarla a las nuevas condiciones. Tras este ajuste, se procede a calcular el consumo energético de la E.B. y el ahorro que ello supondrá.

	Energía (kWh)		
	Actual	Mejora	Ahorro
Periodo 1	21921	21350	572
Periodo 2	38790	37526	1264
Periodo 3	55530	49011	6519
Periodo 4	49746	49243	503
Periodo 5	42432	41204	1228
Periodo 6	84271	81632	2639
Periodo 7	15417	14720	697
<b>TOTAL</b>	<b>308108</b>	<b>294687</b>	<b>13422</b>

Tabla 38: Energía consumida tras los cambios de tuberías

	Coste energético actual			Coste energético tras mejora			Ahorro €
	Potencia €	Energía €	Total €	Potencia €	Energía €	Total €	
Periodo 1	208,64	1167,36	1376,00	207,38	1136,91	1344,29	31,71
Periodo 2	229,06	2088,67	2317,72	222,54	2020,59	2243,14	74,59
Periodo 3	359,49	3206,28	3565,77	293,63	2803,71	3097,35	468,43
Periodo 4	282,69	2981,08	3263,77	278,12	2945,78	3223,91	39,86
Periodo 5	116,17	2284,76	2400,93	114,00	2218,64	2332,64	68,28
Periodo 6	500,17	4800,36	5300,53	463,18	4628,94	5092,12	208,41
Periodo 7	119,37	830,13	949,50	114,78	792,59	907,37	42,13
<b>TOTAL</b>	<b>1815,59</b>	<b>17358,63</b>	<b>19174,22</b>	<b>1693,64</b>	<b>16547,17</b>	<b>18240,81</b>	<b>933,41</b>

Tabla 39: Ahorro económico tras la aplicación de la medida

El incremento de los diámetros de tres tramos de tuberías junto con el ajuste de la E.B. supone un ahorro energético anual de 13.422 kWh. Desde el punto de vista económico supone reducir el coste energético en 933,41 €.

La inversión que requiere la aplicación de dicha medida depende del coste del material de los nuevos tramos, así como del coste en obra civil que supondrá su sustitución e instalación. El material escogido para los nuevos tramos de tubería será el PVC, con una presión nominal de trabajo de 10 atm para asegurarse su correcto funcionamiento en la red objeto del presente proyecto. Consultando el precio por metro de los nuevos tramos se obtiene la siguiente tabla (precios consultados en página web de la empresa Aiqsa).

Tubería	Diámetro original (mm)	Diámetro propuesto (mm)	Longitud (m)	Coste €/m	Coste €
p303	75	90	111,8	9,11	1018,50
p366	90	110	144,1	10,49	1511,61
p122	200	225	150,2	43,95	6600,54
				<b>Total</b>	<b>9130,65</b>

Tabla 40: Coste de aplicación de la medida

El coste del material se cifra en 9.130,65 €. A este dato habrá que añadir el coste de la obra civil, para ello se trabajará con un factor de instalación de 1,5. Con estos valores se procede a realizar un resumen económico de la medida.

Ahorro energético (kWh/año)	13422
Ahorro económico (€/año)	933,41
Coste tuberías (€)	9130,65
Factor corrector instalación	1,5
Inversión final (€)	13695,97
Tiempo de retorno (años)	14,7

Tabla 41: Análisis viabilidad de la medida

El coste final de la inversión se estima en 13.695,97 €. Teniendo en cuenta los 933,41 € de ahorro anual que se obtendrían, el tiempo de retorno de la medida se sitúa en 14,7 años. Por lo tanto, la presente medida se desestima ya que no tiene la rentabilidad necesaria ya que el tiempo de retorno que se obtendría resulta demasiado elevado.

### 8.2.2. Eliminación del exceso de energía mediante ajuste de la E.B.

Tras analizar y trabajar con los 7 periodos en los que la Comunidad General de Regantes divide el año se observa que en determinadas condiciones de funcionamiento el sistema trabaja con exceso de energía. Principalmente dicha sobrepresión se tiene en el turno 5 de cada uno de los periodos donde, debido al bajo caudal inyectado, y a la presión de consigna de 45 mca aguas debajo de la E.B. se trabaja con exceso de energía.

La siguiente medida propone ajustar la E.B. de forma que no se tenga exceso de energía en ningún momento. En un primer instante se barajó la posibilidad de instalar en una de las bombas de velocidad fija un variador de frecuencia para poder adaptarse de esta manera mejor a las condiciones de la red. Sin embargo, se pudo comprobar que con una bomba de velocidad variable bastaba para adaptarse a las diferentes condiciones de funcionamiento.

De esta forma se procedió a ajustar la estación de bombeo para eliminar el exceso de energía presente en algunos turnos. Tras realizarlo se obtuvieron los siguientes resultados.

	Energía (kWh)		
	Actual	Mejora	Ahorro
Periodo 1	21921	21567	355
Periodo 2	38790	38274	516
Periodo 3	55530	49709	<b>5821</b>
Periodo 4	49746	49403	343
Periodo 5	42432	41999	433
Periodo 6	84271	83293	978
Periodo 7	15417	14995	422
TOTAL	308108	299241	8868

Tabla 42: Energía consumida tras ajuste de la estación de bombeo

	Coste energético actual (€)			Coste energético tras mejora (€)			Ahorro (€)
	Potencia	Energía	Total	Potencia	Energía	Total	
Periodo 1	208,64	1167,36	1376,00	213,58	1148,48	1362,06	13,94
Periodo 2	229,06	2088,67	2317,72	234,43	2060,88	2295,31	22,41
Periodo 3	359,49	3206,28	3565,77	302,47	2848,40	3150,87	<b>414,90</b>
Periodo 4	282,69	2981,08	3263,77	276,41	2952,88	3229,29	34,48
Periodo 5	116,17	2284,76	2400,93	119,05	2261,44	2380,49	20,43
Periodo 6	500,17	4800,36	5300,53	475,32	4724,29	5199,61	100,91
Periodo 7	119,37	830,13	949,50	121,28	807,39	928,68	20,83
<b>TOTAL</b>	<b>1815,59</b>	<b>17358,63</b>	<b>19174,22</b>	<b>1742,55</b>	<b>16803,77</b>	<b>18546,31</b>	<b>627,90</b>

Tabla 43: Ahorro económico debido al ajuste de la estación de bombeo

Eliminando el exceso de energía se obtiene un ahorro anual de 8.868 kWh, que traducido a términos monetarios se sitúa en 627,9 €. Si se analizan con detenimiento los diferentes periodos se puede observar como la mayor parte del ahorro se obtiene en el periodo 3 con 414,9 €. Analizando pues con más detalle dicho periodo se observa como el caudal inyectado en todos los turnos es reducido, por lo que la presión de consigna de 45 mca impuesta actualmente genera un exceso de energía a lo largo de todo el periodo.

La inversión necesaria para implementar esta propuesta sería reducida. Consistirá en instalar un sistema de control en la estación de bombeo que actuase bajo una presión de consigna determinada cuyo valor se recogería de los hidrantes más críticos de la red. No como ocurre actualmente donde el valor de la presión de consigna de 45 mca se recoge justo aguas debajo de la E.B. por lo que no se tiene en cuenta el comportamiento de la red antes los diferentes puntos de funcionamiento.

### 8.2.3. Ajuste de los turnos de riego y de la estación de bombeo

Con la presente mejora se busca repartir el caudal de agua entre los diferentes turnos por dos motivos. El primero es que, al reducir el caudal punta, la potencia máxima contratada se verá reducida, por lo que en este aspecto y ya de entrada se tendrá un ahorro. El segundo motivo es que, al reducir el caudal medio, las pérdidas a lo largo de la red se reducirán, por lo que la presión aportada por las bombas se verá también reducida, lo cual supondrá de nuevo un ahorro en términos energéticos y económicos.

La estrategia seguida es la misma que la empleada anteriormente cuando se buscaba alcanzar la presión mínima de 30 mca. El caudal inyectado se reparte a partes iguales entre todos los turnos. Además, los periodos 1, 2 y 7, que en la actualidad riegan únicamente 5 horas, se alargan y ocupan las ocho horas valle de la tarifa eléctrica durante la noche.

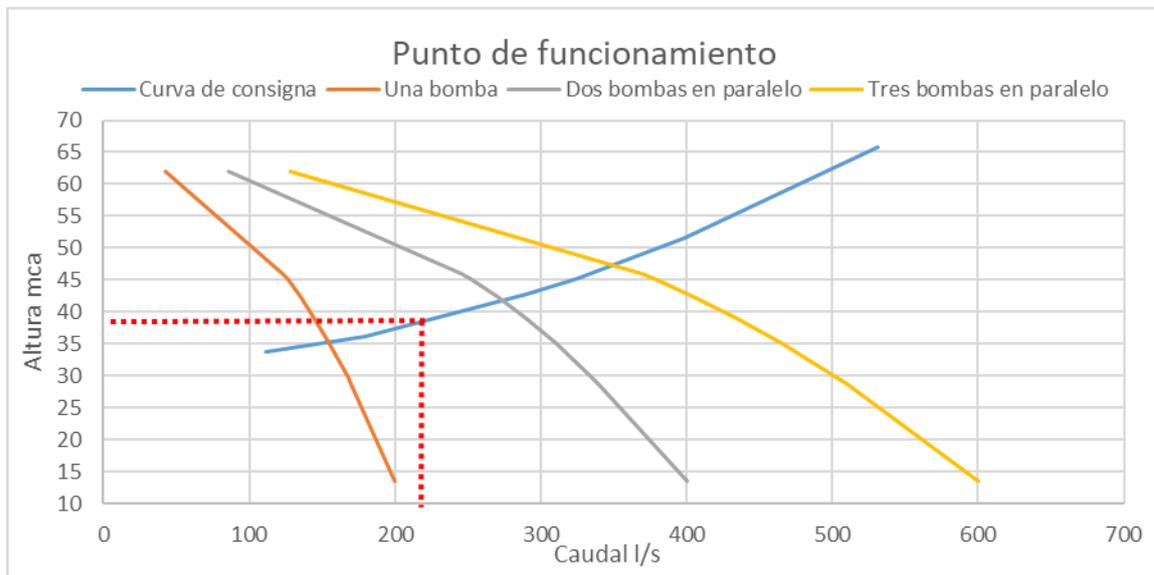
Para conseguir este resultado, únicamente hay que ajustar el patrón de demanda repartiéndolo entre las horas que se vayan a regar con la mejora.

Hora	Periodo 1		Periodo 2		Periodo 3		Periodo 4		Periodo 5		Periodo 6		Periodo 7	
	Caudal l/s		Caudal l/s		Caudal l/s		Caudal l/s		Caudal l/s		Caudal l/s		Caudal l/s	
	Antes	Después												
22:00					141	216	182	284	213	332	206	324		
23:00					141	216	182	284	213	332	206	324		
0:00	375	207	382	211	248	216	325	284	380	332	369	324	221	218
1:00	336	207	341	211	248	216	325	284	380	332	369	324	396	218
2:00	375	211	382	211	222	216	291	284	341	332	329	324	355	218
3:00	342	207	349	211	222	216	291	284	341	332	329	324	396	218
4:00	211	207	213	211	248	216	325	284	380	332	369	324	363	218
5:00		207		211	248	216	325	284	380	332	369	324		218
6:00		207		211	227	216	297	284	349	332	337	324		218
7:00		207		211	227	216	297	284	349	332	337	324		218

Tabla 44: Reorganización de los turnos de riego

En la tabla anterior se observa como se distribuyen los caudales. En el estado actual el punto de funcionamiento va variando en cada turno de riego para adaptarse. La segunda bomba de velocidad fija se enciende y se a paga según el turno de riego, y la bomba de velocidad variable está modificando su velocidad constantemente para adaptarse a las nuevas condiciones.

Sin embargo, con las nuevas condiciones de la medida propuesta la E.B. estará trabajando continuamente en el mismo punto de funcionamiento. Sí se toma como ejemplo el periodo 3 se observa como están trabajando una de las bombas de velocidad fija junto con la bomba de velocidad variable que es la que se adapta a las características de las curvas de consigna de la red. Todo esto se puede observar mejor en la siguiente gráfica.



Gráfica 26: Punto de funcionamiento del periodo 3 en el escenario propuesto

Tras comprobar que la demanda de los distintos hidrantes es la misma que la original se procede a ajustar la estación de bombeo para dejar el sistema en las mismas condiciones de presiones que se tienen actualmente.

Con ambos modelos ya preparados se procede a calcular la energía aportada por las bombas en los dos escenarios:

	Energía kWh		
	Actual	Mejora	Ahorro
Periodo 1	21921	19739	2182
Periodo 2	38790	35550	3241
Periodo 3	55530	50499	5031
Periodo 4	49746	45236	4511
Periodo 5	42432	42846	-414
Periodo 6	84271	84954	-683
Periodo 7	15417	13659	1758
<b>TOTAL</b>	<b>308108</b>	<b>292482</b>	<b>15626</b>

Tabla 45: Consumo energético tras aplicación de la medida

Como se puede observar, con la nueva configuración de la estación de bombeo y del reparto de los turnos se consiguen ahorrar 15.626 kWh al año. Analizando con más detalle se puede observar como en los periodos 5 y 6 hay un incremento del gasto energético. El aumento de la energía consumida en dichos periodos está provocado por el punto de funcionamiento en el cual trabajan las bombas que las obliga a trabajar con rendimientos más bajos de lo que tenían originalmente.

A continuación, se adjuntan dos tablas donde quedan reflejados los puntos de funcionamiento de las tres bombas en el periodo 5 con las condiciones actuales, y con las condiciones que tendrían tras la mejora.

	Condiciones actuales			Condiciones tras la mejora		
	Caudal (l/s)	Altura (mca)	Rendimiento	Caudal (l/s)	Altura (mca)	Rendimiento
BVF	128,18	45,21	<b>80,06</b>	143,41	41,04	<b>75,81</b>
BVF1	128,34	45,17	<b>80,03</b>	143,41	41,04	<b>75,81</b>
BVV	91,10	45,21	<b>77,82</b>	33,07	41,04	<b>46,53</b>

Tabla 46: Rendimiento de las bombas en el periodo 5 actualmente y tras modificación

Se puede apreciar como claramente el punto de funcionamiento impuesto a las bombas en las condiciones actuales favorece un mayor rendimiento de las mismas, lo que provoca que el gasto energético se incremente con la reordenación de los turnos y el ajuste de la estación de bombeo.

Con la energía aportada por las bombas en cada periodo, y las tarifas eléctricas que se presentan a continuación, se obtiene el coste eléctrico que se tiene en las condiciones actuales y el que se tendría si se aplica la mejora:

	Periodos de facturación eléctrica					
	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Energía (€/kWh)	0,111623	0,100256	0,094162	0,079321	0,076297	0,053845
Potencia (€/kW)	0,106938	0,053515	0,039164	0,039164	0,039164	0,017869

Tabla 47: Precio del término variable y fijo de la energía eléctrica

Coste	Coste energético actual			Coste energético tras mejora			Ahorro €
	Potencia €	Energía €	Total €	Potencia €	Energía €	Total €	
Periodo 1	208,64	1167,36	1376,00	103,35	1051,14	1154,49	221,51
Periodo 2	229,06	2088,67	2317,72	115,33	1914,18	2029,51	288,22
Periodo 3	359,49	3206,28	3565,77	405,56	3014,01	3419,57	146,20
Periodo 4	282,69	2981,08	3263,77	333,67	2855,60	3189,28	74,49
Periodo 5	116,17	2284,76	2400,93	103,19	2307,04	2410,23	-9,31
Periodo 6	500,17	4800,36	5300,53	628,84	4981,52	5610,37	-309,84
Periodo 7	119,37	830,13	949,50	57,20	735,45	792,65	156,85
<b>TOTAL</b>	<b>1815,59</b>	<b>17358,63</b>	<b>19174,22</b>	<b>1747,14</b>	<b>16858,95</b>	<b>18606,09</b>	<b>568,12</b>

Tabla 48: Ahorro económico debido al reajuste de los turnos

Como se puede apreciar el ahorro energético al cabo del año se sitúa en 568,12€. Es un ahorro pequeño que se ve perjudicado por los periodos de riego 5 y 6.

Tras detectar estos hechos se decide en dichos periodos modificar únicamente la estación de bombeo para evitar que hubiese exceso de energía. Recalculando de nuevo la energía consumida y su coste se obtienen las siguientes tablas.

	Energía kWh		
	Actual	Mejora	Ahorro
Periodo 1	21921	19739	2182
Periodo 2	38790	35550	3241
Periodo 3	55530	50499	5031
Periodo 4	49746	45236	4511
Periodo 5	42432	41274	1158
Periodo 6	84271	83087	1184
Periodo 7	15417	13659	1758
<b>TOTAL</b>	<b>308108</b>	<b>289044</b>	<b>19065</b>

Tabla 49: Ahorro en el consumo energético

Coste	Coste energético actual			Coste energético tras mejora			Ahorro €
	Potencia €	Energía €	Total €	Potencia €	Energía €	Total €	
Periodo 1	208,64	1167,36	1376,00	103,35	1051,14	1154,49	221,51
Periodo 2	229,06	2088,67	2317,72	115,33	1914,18	2029,51	288,22
Periodo 3	359,49	3206,28	3565,77	405,56	3014,01	3419,57	146,20
Periodo 4	282,69	2981,08	3263,77	333,67	2855,60	3189,28	74,49
Periodo 5	116,17	2284,76	2400,93	119,74	2222,41	2342,14	58,78
Periodo 6	500,17	4800,36	5300,53	473,26	4710,23	5183,49	117,04
Periodo 7	119,37	830,13	949,50	57,20	735,45	792,65	156,85
<b>TOTAL</b>	<b>1815,59</b>	<b>17358,63</b>	<b>19174,22</b>	<b>1608,11</b>	<b>16503,02</b>	<b>18111,13</b>	<b>1063,09</b>

Tabla 50: Ahorro económico anual

Con las nuevas condiciones propuestas se logrará alcanzar un ahorro anual de la factura eléctrica de 1063,09 €. Realmente, en el caso de que se llevara adelante dicha medida, habría que realizar un

estudio más detallado del reparto de riego de las parcelas entre cada uno de los turnos. Es evidente que no es posible inyectar en cada uno de los turnos exactamente el mismo volumen, ya que cada hidrante abastece a un número determinado de parcelas con unas superficies y demandas distintas. Pero, realizando un análisis de la demanda de cada una de ellas, sí que se podría repartir el volumen inyectado de forma que, pese que hubiera pequeñas variaciones, cada turno regara prácticamente lo mismo.

La inversión inicial de llevar a cabo la presente medida no será elevada. El coste se destinará a pagar el estudio de la nueva organización de los turnos, y de la implementación del control de la estación de bombeo para adaptarse a las modificaciones. Dicho control actuará para cumplir en todo momento con la presión de consigna, que tal y como ocurre en la propuesta anterior, se situará en los hidrantes más críticos de la red, por lo que habrá que instalar transductores de presión que envíen datos a tiempo real a la unidad central de control. El funcionamiento del control sobre la estación de bombeo se explica de una forma más detallada más adelante.

Con todos estos datos, se decide escoger la presente medida ya que es la que tiene más opciones de generar un mayor ahorro económico al menor precio. Para ello resulta necesario realizar un análisis de viabilidad económica, en el que se elabore una estimación del ahorro real que supondría su aplicación, así como del presupuesto necesario para su implementación.

## 9. Análisis detallado de la propuesta seleccionada

### 9.1. Introducción

En el presente apartado del proyecto, se va a realizar un análisis detallado sobre la implementación de la mejora seleccionada. Para ello, se calculará el ahorro real en la factura eléctrica que supondrá su aplicación, así como el coste de inversión que será necesario realizar. Posteriormente se realizará un balance económico mediante el cual se estudiará la viabilidad de la mejora.

La medida seleccionada consiste en reorganizar los turnos de riego y en según qué periodos, ajustar el número de horas que se riegan, con el objetivo de reducir el caudal inyectado. Con esta acción se consigue disminuir las pérdidas unitarias, lo que genera un ahorro de energía. Además, al reducir la potencia máxima de las bombas se obtiene un ahorro económico al tener que contratar menos potencia eléctrica por periodo.

Parejo a la reorganización de los turnos de riego, se ajusta la estación de bombeo para adaptarse a los cambios y evitar que se trabaje en algunos turnos con exceso de energía. Para ello se tendrá que instalar un nuevo sistema de control que gobierne el funcionamiento de las bombas el cual se explicará a continuación.

### 9.2. Funcionamiento estación de bombeo

La reorganización de los turnos de riego no tendría ningún sentido si no se reajustara la estación de bombeo para adaptarse a las nuevas condiciones. Actualmente la comunidad de regantes cuenta con un sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) mediante el cual programan los turnos de riego, y realizan el control de las bombas para alcanzar la presión de consigna de 45 mca.

La propuesta es aprovechar al máximo el sistema existente. En el SCADA se grabará la nueva reorganización de los turnos de riego tal y como ya está implementado. La diferencia vendrá en la presión de consigna. En lugar de medir la presión de bombeo de las bombas, se instalarán dos sensores en los hidrantes más críticos de la red. El SCADA realizará el control sobre las tres bombas de forma que en ninguno de los dos sensores instalados la presión descienda de los 25 mca. Presión a la cual está demostrado que los hidrantes funcionan correctamente.

La instalación de dos sensores de presión, uno en la Zona A y otro en la Zona B, obedece a que dependiendo de las condiciones de funcionamiento del sistema el hidrante más crítico se encuentra en una zona de la red o en otra. Cuando el caudal inyectado es pequeño, el hidrante más crítico se sitúa en la Zona B, sin embargo, si el caudal inyectado es elevado, el hidrante crítico se sitúa en la Zona A debido a las pérdidas unitarias elevadas que tienen algunos tramos del sistema.

Para adaptar el sistema de control a las nuevas señales de presión, se instalará un módulo de ampliación de señales de comunicación. Los sensores con la unidad de control se conectarán mediante cableado de fibra óptica para evitar la caída de tensión.

### 9.3. Ahorro económico

Para realizar un cálculo realista del ahorro económico que se obtendrá con la aplicación de la medida seleccionada, es necesario saber el rendimiento de la estación de bombeo. De esta forma se podrá convertir la energía embebida en el agua por las bombas en energía eléctrica.

Desde la red eléctrica, hasta las bombas hidráulicas, la energía tiene que pasar por una serie de elementos en los cuales se producen pérdidas. Dichos elementos son el centro de transformación, el variador de frecuencia en caso de ser una bomba de velocidad variable, y el motor eléctrico de la bomba. En el presente caso de estudio, los rendimientos de dichos elementos son los siguientes:

Rendimiento centro de transformación	98%
Rendimiento del variador de frecuencia	97%
Rendimiento del motor eléctrico	95%

Tabla 51: Rendimientos de los elementos de la estación de bombeo

A partir de dichos valores, y sabiendo la energía entregada por las bombas, se obtiene la energía eléctrica consumida con las condiciones de la mejora aplicadas y su correspondiente coste económico.

	Energía kWh	Coste €
Enero	10687	<b>562,78</b>
Febrero	10687	<b>575,45</b>
Marzo	19259	<b>1036,99</b>
Abril	19259	<b>1036,99</b>
Mayo	27378	<b>1597,09</b>
Junio	27378	<b>1670,96</b>
Julio	49340	<b>3114,68</b>
Agosto	44744	<b>2409,26</b>
Septiembre	44996	<b>2558,90</b>
Octubre	44996	<b>2542,74</b>
Noviembre	14802	<b>797,02</b>
Total	313525	<b>17902,86</b>

Tabla 52: Coste real asociado al consumo de energía

A la hora de la elección de la potencia contratada, se ha dejado un margen de seguridad en los periodos en los que no se bombea para poder hacer frente a imprevistos. Además, en los periodos en los que no se bombea, se deja una pequeña potencia contratada por seguridad, y para alimentar la bomba jockey que mantiene la presión en la red. Además, desde la compañía suministradora de electricidad, se obliga a contratar en periodos de facturación superiores al menos la misma potencia que se haya contratado previamente. Este caso se puede observar en los meses de Julio y Septiembre.

	Potencia a contratada en cada uno de los periodos (kW)					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Enero	50	50	50	50	50	<b>130</b>
Febrero	50	50	50	50	50	<b>130</b>
Marzo	50	50	50	50	50	<b>130</b>
Abril	50	50	50	50	50	<b>130</b>
Mayo	50	50	50	50	<b>130</b>	<b>130</b>
Junio	50	50	50	50	<b>130</b>	<b>130</b>
Julio	50	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>180</b>
Agosto	50	50	50	50	50	<b>250</b>
Septiembre	50	50	50	<b>130</b>	<b>130</b>	<b>240</b>
Octubre	50	50	50	50	<b>130</b>	<b>240</b>
Noviembre	50	50	50	50	50	<b>130</b>

Tabla 53: Potencia contratada en cada periodo eléctrico

Multiplicando la potencia contratada en cada periodo por su coste y por los días contratados, se calcula el coste total asociado a la potencia que asciende a **6.748,36 €**.

Finalmente, añadiendo otros costes como el alquiler de los equipos de media y sumando el coste del IVA (21%), se obtiene el coste eléctrico total.

	Coste total €
Enero	1301,6
Febrero	1316,9
Marzo	1941,9
Abril	1919,7
Mayo	2737,1
Junio	2800,6
Julio	5323,3
Agosto	3682,8
Septiembre	4060,0
Octubre	3955,1
Noviembre	1629,4
<b>Total</b>	<b>30668,4</b>

Tabla 54: Importe de la factura eléctrica con la aplicación de las medidas propuestas

Como se puede observar, el coste eléctrico asociado al funcionamiento anual de la estación de bombeo para el año 2016, con las condiciones propuestas en la medida seleccionada, asciende a **30.668,4 €**.

El coste real de la factura eléctrica, se ha obtenido a partir de las facturas expedidas por la compañía suministradora y es el que se presenta a continuación:

	Energía €	Potencia €	Alquiler equipos + IVA	Total €
Enero	962,90	424,66	351,49	1739,05
Febrero	964,79	383,57	338,32	1686,68
Marzo	1543,00	424,66	478,69	2446,36
Abril	1716,76	410,98	512,27	2640,02
Mayo	1551,76	424,66	748,61	2725,03
Junio	2979,50	812,33	877,18	4669,01
Julio	3411,83	885,50	989,54	5286,87
Agosto	3697,93	702,00	1012,04	5411,97
Septiembre	3979,11	960,59	1148,27	6087,97
Octubre	3165,74	992,60	959,06	5117,41
Noviembre	1356,17	960,59	553,72	2870,47
<b>Total</b>	<b>25329,5</b>	<b>7382,1</b>	<b>7969,2</b>	<b>40680,8</b>

Tabla 55: Importe real de la factura eléctrica año 2.016

En el año 2016, la Comunidad General de Regantes de Nules-Mascarell tuvo que pagar una factura eléctrica que ascendió hasta los **40.680,8 €**. Mediante la aplicación de la media de mejora, junto con una revisión de la potencia eléctrica contratada, se logra un ahorro anual de **10.012,4 €**.

#### 9.4. Análisis de la viabilidad

Una vez se ha calculado el ahorro económico que supondrá la aplicación de la mejora en el coste de la factura eléctrica, y sabiendo la inversión necesaria para llevarla a cabo, se procede a realizar un análisis de su viabilidad económica.

Se recuerda que en el año 2.016 el coste de la factura eléctrica asociada al cabezal de riego número 1 ascendió a **40.680,8 €**. Con la aplicación de la mejora seleccionada, se ha calculado que la nueva red hubiese tenido una factura eléctrica que alcanzaría los **30.668,4 €**, lo que supone un ahorro anual de **10.012,4 €**. Por otra parte, las acciones necesarias para implementar dicha medida de mejora alcanzan un coste de **5.721,93 €**, tal y como se detalla en el presupuesto que se adjunta en los anexos a este documento.

A continuación, se adjunta una tabla resumen donde se exponen aspectos energéticos, medioambientales y económicos de lo que supondrá la aplicación de la mejora:

Análisis energético		
Energía facturada actualmente	449100	kWh/año
Energía facturada escenario propuesto	313525	kWh/año
Ahorro energético	135575	kWh/año
Análisis de emisiones		
Factor de emisión	0,399	kc CO <sub>2</sub> /kWh
Emisiones escenario actual	179191	kc CO <sub>2</sub> /kWh
Emisiones en escenario propuesto	125096	kc CO <sub>2</sub> /kWh
Ahorro en emisiones	54094	kc CO <sub>2</sub> /kWh
Análisis económico		
Coste factura eléctrica actual	40680,83	€/año
Coste factura eléctrica escenario propuesto	30668,39	€/año
Ahorro económico	10012,45	€/año
Inversión	5721,93	€
Tiempo de vida útil	20	años
Amortización de la inversión	286,10	€/año
Beneficio anual neto	9726,35	€/año
Beneficio tras la vida útil	194527,04	€
Tiempo de retorno	0,57	años

Tabla 56: Análisis de viabilidad económica

A la vista de los datos expuestos, la propuesta seleccionada tiene una gran rentabilidad y en menos de un año se habría recuperado el dinero invertido. Además, debido al bajo coste asociado a la implementación de la mejora, únicamente 5.721,93 €, se considera que no es una inversión arriesgada. Será pues decisión de la Comunidad de Regantes de Nules-Mascarell el llevar a cabo la propuesta de mejora descrita.

## 10. Conclusión

En el presente Trabajo Final de Máster se han introducido las técnicas necesarias para la elaboración de un estudio de eficiencia energética de una red de distribución de agua a presión. Se comenzó con la realización de un diagnóstico energético para tener una visión general del estado de la red. Posteriormente, se creó un modelo matemático de la misma mediante el cual obtener datos para la realización de la auditoría hídrica y energética sobre el sistema. Finalmente, se elaboraron una serie de propuestas para mejorar la eficiencia energética de la red buscando como objetivo final obtener un ahorro económico.

Los datos utilizados para la realización de dicho trabajo han sido proporcionados por la Comunidad de Regantes de Nules-Mascarell donde se sitúa la red estudiada. Las herramientas utilizadas están al alcance de cualquier profesional y son los siguientes programas informáticos:

- Microsoft Office
- Epanet
- ITAEnergy
- ITAFugas

Conforme se fue realizando el trabajo, surgieron algunos problemas que se resolvieron de diferentes maneras. Probablemente, el mayor inconveniente fue no tener el dato exacto del volumen inyectado en la red, debido a unos problemas con los caudalímetros instalados en la estación de bombeo. Ello obligó a estimar, de forma razonada, el caudal de fugas de la red. Tras analizar y estudiar otras redes de riego de similares características, se fijaron unas fugas del 5%, lo que supone que prácticamente no se pierde agua en dicho sistema. Esto motivó la decisión de centrarse de una forma más profunda, en el estudio de la eficiencia energética, ya que iba a resultar muy difícil reducir las fugas actuales.

El segundo contratiempo surgió cuando se descubrió que, en dos zonas de la red, y de manera recurrente, había hidrantes que trabajaban por debajo de la presión mínima de servicio para su correcto funcionamiento, que en un principio estaba fijada en 30 mca. Este hecho obligó a reducir la presión mínima de referencia, tanto en el diagnóstico energético como en la auditoría energética, a 25 mca, de forma que los datos proporcionados se ajustasen lo máximo posible al funcionamiento real de la instalación.

A la hora de proponer medidas de mejora se dividieron en dos bloques. Por un lado, se han estudiado medidas para alcanzar la presión de 30 mca en cualquier punto de la red, y para cualquier punto de funcionamiento de la misma. Por otro lado, desde Nules se informó que no estaban teniendo problemas en el riego, y que les interesaba saber que medidas podrían aplicar para mejorar la eficiencia energética de la red con las condiciones de presión actuales. Esta es la razón por la que se realiza un estudio más detallado sobre este tipo de medidas, y por la que la propuesta escogida no busca alcanzar la presión mínima de 30 mca.

En cuanto a las mejoras propuestas, desde un primer momento se buscó que causaran el mayor ahorro económico posible con la mínima inversión necesaria. Aumentando de esta forma las

posibilidades de que en un futuro se lleven a cabo en la vida real. Con todos estos condicionantes y dado la tipología de la red que se tiene, se concluyó que la mejor propuesta era la de reorganizar el riego de las parcelas para de esta forma repartir el caudal inyectado.

Tras analizar los diferentes periodos, se puso de manifiesto, que la forma en la que actualmente se gestiona la estación de bombeo no es la más eficiente posible. El hecho de medir la presión de consigna en la propia estación de bombeo, provoca el trabajar con exceso de energía en algunos turnos, o con unas presiones inferiores a las necesarias en otros. Por esa razón, se decide en la propuesta seleccionada, cambiar el punto donde se mide la presión de consigna, e instalar dos transductores de presión junto a los dos hidrantes más críticos de la red que se encuentran en diferentes zonas.

Con el estudio de las facturas proporcionadas por la empresa suministradora de energía eléctrica, se pone de manifiesto la importancia de ajustar la potencia contratada a la que se necesita. Mediante esta sencilla acción se puede lograr ahorrar al final del año una importante cantidad de dinero.

Con todo lo expuesto anteriormente, en el presente Trabajo Final de Master, se ha conseguido realizar el estudio de la eficiencia energética de una red de riego a presión. Para ello, y mediante la información proporcionada por la Comunidad de Regantes, se realizó un diagnóstico energético de la red y un modelo matemático de la misma. Posteriormente se llevaron a cabo las auditorías hídrica y energética, y con la información obtenida se crearon varios posibles escenarios con las medidas de mejora a aplicar. Finalmente, se seleccionó una y se realizó un estudio de su viabilidad económica mediante el cálculo del ahorro económico y el coste de la inversión inicial que supondría su implementación.

## 11. Referencias y bibliografía

- Almandoz, J., Cabrera, E., Arregui, F., Cabrera Jr., E., & Cobacho, R. (2005). Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6), 458–466
- Cabrera E., 2010. Agua y Energía. Las dos caras de una misma moneda. (Think globally, act locally. René Dubos, 1972).
- Cabrera E., Pardo M., Cobacho R., Cabrera E. Jr., 2010. *Energy Audit of Water Newtorks*
- Cabera E., Gómez E., Cabrera E. Jr., Soriano J., Espert V., 2014. *Energy Assessment of Presurized Water Systems*
- Instituto Nacional de Estadística (INE). ([www.ine.es](http://www.ine.es))
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio ambiente. ([www.mapama.gob.es](http://www.mapama.gob.es))
- Red Contable Agraria Nacional, Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio ambiente. Disponible en Internet. [ <http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/economia/red-contable-recan/> ]
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), 2008. *Ahorro y Eficiencia Energética en las Comunidades de Regantes*.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), *Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío*.
- Cabrera E., ITA, 2016. *Gestión de agua en el Mediterráneo y energías renovables. Eficiencia energética y transporte de agua*. Apuntes de Eficiencia Energética en Instalaciones Hidráulicas, ITA, UPV.
- Soriano J., ITA, 2016. *Máquinas hidráulicas (volúmenes I, II, III, IV)*. Apuntes de Eficiencia Energética en Instalaciones Hidráulicas, ITA, UPV
- Gómez E., ITA, 2015. *Las pérdidas de agua*. Apuntes de Eficiencia Energética en Instalaciones Hidráulicas, ITA, UPV.
- Gómez E., ITA, 2015. *Introducción a la auditoría energética y diagnóstico*. Apuntes de Eficiencia Energética en Instalaciones Hidráulicas, ITA, UPV.
- Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), 2009. *Regadíos Históricos Valencianos. Los regadíos históricos del Baix Millars-La Plana*.
- Virginia X., 2011. *Tesis Doctoral. Aplicación del método de jerarquías analíticas (AHP) a la gestión de agua en redes de abastecimiento*.

## Capítulo 2: Anexos

1. Presupuesto
2. Ensayo de bombas
3. Plano de la red actual



# PRESUPUESTO Y MEDICIONES

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
<b>CAPÍTULO IR01 REORGANIZACIÓN DEL RIEGO</b>									
E01805	ud ESTUDIO DE REORGANIZACIÓN DE LAS PARCELAS								
	Estudio en profundidad del reparto de las parcelas de cada uno de los hidrantes. Para ello se deberá analizar el volumen demandado por cada una de las 1508 parcelas que se riegan actualmente. Analizar los hidrantes que abastecen cada una de dichas parcelas, y repartir el riego de las mismas de forma que el caudal inyectado en los diferentes turnos sea lo más parecido posible. Analizar la idoneidad de esta medida en los periodos en los que se riegue en horas valle. Analizar el funcionamiento de la estación de bombeo por si las condiciones de funcionamiento lo obligasen a trabajar en puntos de funcionamiento de bajo rendimiento.						1,00	423,00	423,00
	<b>TOTAL CAPÍTULO IR01 REORGANIZACIÓN DEL RIEGO.....</b>								<b>423,00</b>

# PRESUPUESTO Y MEDICIONES

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
<b>CAPÍTULO IR02 REGULACIÓN ESTACIÓN DE BOMBEO</b>									
595	<p><b>h Implementación del código que gobierne el SCADA</b></p> <p>IMPLEMENTACIÓN DEL CÓDIGO QUE CONFIGURE EL SCADA PARA TRABAJAR CON LOS DOS TRANSDUCTORES DE PRESIÓN NUEVOS INSTALADOS, Y QUE ORDENE SEGÚN LAS SEÑALES RECIBIDAS EL FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBAS. EL CONTROL DE LAS BOMBAS SE EFECTUARÁ MEDIANTE SEÑALES DE ARRANQUE O PARO PARA LAS BOMBAS DE VELOCIDAD FIJA, Y ACTUANDO SOBRE EL VARIADOR DE FRECUENCIA PARA LA BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE.</p>						8,00	17,80	142,40
753273	<p><b>Ud CAUDALÍMETRO DN 500</b></p> <p>SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO PARA AGUA (SIEMENS MAG 8000 IRRIGATION), COLOCADO EN TUBERÍA DE ABASTECIMIENTO DE 500 mm de diámetro. SATISFACE EXIGENCIAS DE LA TRANSFERENCIA DE CUSTODIA SEGÚN LAS NORMAS PARA CONTADORES DE AGUA MID y OIML R49. ESPECIALMENTE INDICADO PARA INSTALACIONES DE RIEGO. MÓDULO DE COMUNICACIÓN 3G/UMTS INALÁMBRICO INTEGRADO CON ACCESO A REMOTO A TRAVÉS DE DIFERENTES PROTOCOLOS COMO: SMS, SMTP(S) O FTP(S) PRESION DE SERVICIO MÁXIMA 7BAR</p>						1,00	1.156,80	1.156,80
161651	<p><b>u MODULO DE AMPLIACIÓN DE SEÑALES DE COMUNICACION</b></p> <p>Módulo de ampliación de señales de libre configuración, montaje e instalación</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conexión a través de CAN Bus</li> <li>- Incorpora 4 salidas de Relé y 6 entradas, salidas universales</li> <li>- Montaje en carril DIN EN 50022</li> <li>- Tensión nominal 12 V CC</li> </ul>						1,00	698,00	698,00
65165	<p><b>Ud TRANSDUCTOR DE PRESIÓN</b></p> <p>TRANSDUCTOR DE PRESIÓN CON SALIDA EN TENSIÓN DISEÑADO PARA UTILIZARSE EN LA MAYORÍA DE EQUIPOS INDUSTRIALES. CUBRE TODAS LAS SALIDAS DE TENSIÓN ESTÁNDAR, VERSIONES ABSOLUTAS Y RELATIVAS, RANGOS DE MEDICIÓN DE 0-1 A 0-600 BARES. SEÑALES DE SALIDA DE 0-5 V, 1-5 V, 1-6 V O BIEN DE 0-10 V.</p>						2,00	535,08	1.070,16
651156	<p><b>Ud CABLEADO DE CONTROL</b></p> <p>Manguera eléctrica fibra óptica recomendada para exteriores. Fibra monomodo con núcleo y revestimiento de sección 9/125 micrones, de bajo coeficiente de fricción, LZHS (LOW SMOKE ZERO HALOGEN), inmune a interferencias eléctricas y protección contra humedad y roedores.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 fibras monomoso (SM) proteguda exteriores</li> <li>- Sección del nucleo central y su revestimiento de 9/125 micrones</li> <li>- Sección total del cable 6.0 mm</li> </ul>						1,00	2.231,57	2.231,57
									<b>5.298,93</b>
<b>TOTAL CAPÍTULO IR02 REGULACIÓN ESTACIÓN DE BOMBEO.....</b>									<b>5.298,93</b>
<b>TOTAL.....</b>									<b>5.721,93</b>



ISO 2548 CLASE C  
PROC. PR-09

BOMBA N° 273053-08  
PRUEBA N° 4852cl

FECHA: 20/06/2008

BOMBA: cpt 150-460

ORDEN: 708805  
RODETE: 394

**DATOS DEL MOTOR**

Vel.: 1450 RPM      P: 125 CV      TIPO: cime  
f: 50 hz      P: 92 kW      I: 158 A      N° MOTOR:  
Rend.: 95 %      Cos φ: 0.87      U: 400 V      IP-55

**DATOS DE SERVICIO**

CAUD.: 6666,667 l/min      CAUD.: 400 m3/h      P: 123,374012203299 CV  
HMT: 50 m      Vel.: 1450 RPM      P: 92,0000009000001 kW

**CONDICIONES DEL ENSAYO**

∅ TUBO ASP.: 200 mm      VERTEDERO: m      MANOMETRO: 0.....25  
∅ TUBO IMP.: 150 mm      CAUDALIMETRO:      TRANSDUCTOR:  
DIF. EJES: 1 m

**PROTOCOLO DE ENSAYOS**

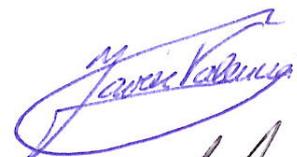
BOMBA N° 273053-08

nr	Vel	Hasp	Himp	Hvel	Hman	I	U	Pred	Pab	r	Caudal	
	RPM	m	m	m	m	A	V	kW	CV	%	l/min	m3/h
1	1492	-1.4	60.4	0	62.8	67.5	386.9	33.4	43.11	-.06	-2	-.12
2	1485	-1.4	59.4	.2	62	87.5	387.3	48.5	62.6	56.46	2565	153.9
3	1485	-1.5	54.6	.74	57.84	111.2	386.3	64.8	83.64	75.27	4898	293.88
4	1479	-1.6	49.7	1.42	53.72	130.5	386.9	77.4	99.9	80.78	6761	405.66
5	1481	-1.7	45.3	1.81	49.81	139.1	387.2	83	107.13	78.96	7642	458.52
6	1481	-1.9	34.1	2.65	39.65	152.7	386.8	91.7	118.36	68.8	9243	554.58
7	1479	-2	26.6	3.25	32.85	161	386	96.5	124.56	59.99	10237	614.22
8	1477	-2.1	23.6	3.44	30.14	163.4	385.9	97.9	126.37	55.85	10537	632.22

OBSERVACIONES:

ENSAYO REALIZADO POR:

PRUEBA VALIDA

 BOMBAS IDEAL

 TRAGCA

 ASISTENCIA TECNICA

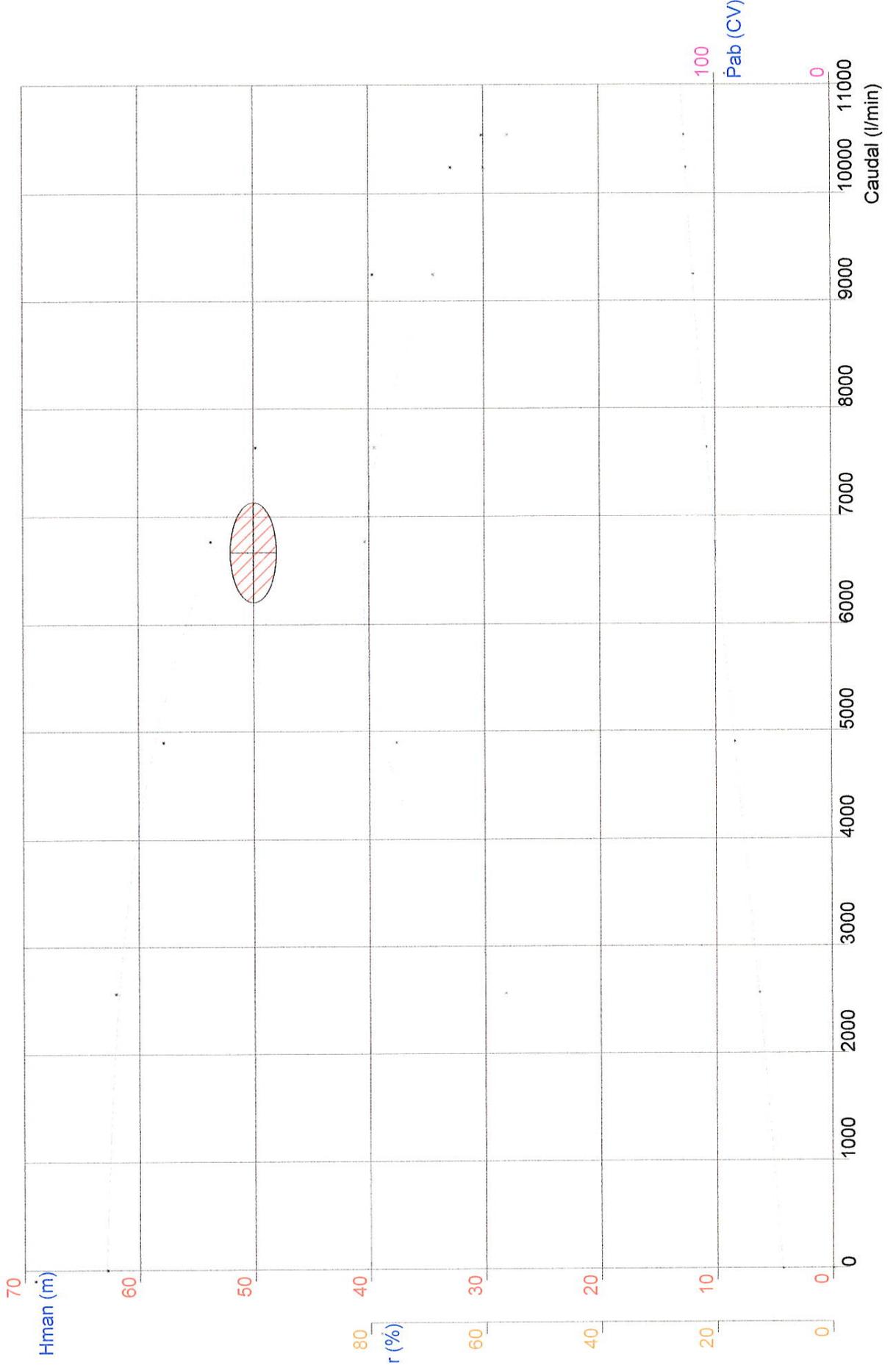
 C-REGANTES



ISO 2548 CLASE C  
PROC. PR-09

cpt 150-460  
1450 RPM

BOMBA N° 273053-08  
PRUEBA N° 4852cI





ISO 2548 CLASE C  
PROC. PR-09

BOMBA N° 273054-08  
PRUEBA N° 4851cl

FECHA: 05/06/2008

BOMBA: cpt 150-460

ORDEN: 708805  
RODETE: 390

**DATOS DEL MOTOR**

Vel.: 1450 RPM P: 125 CV TIPO: cime  
f: 50 hz P: 92 kW I: 158 A N° MOTOR:  
Rend.: 95 % Cos φ: 0.87 U: 400 V IP-55

**DATOS DE SERVICIO**

CAUD.: 5833,333 l/min CAUD.: 350 m3/h P: 123,374012203299 CV  
HMT: 50 m Vel.: 1450 RPM P: 92,0000009000001 kW

**CONDICIONES DEL ENSAYO**

Ø TUBO ASP.: 200 mm VERTEDERO: m MANOMETRO:  
Ø TUBO IMP.: 150 mm CAUDALIMETRO: TRANSDUCTOR: 0.....25  
DIF. EJES: 1 m

**PROTOCOLO DE ENSAYOS BOMBA N° 273054-08**

nr	Vel	Hasp	Himp	Hvel	Hman	I	U	Pred	Pab	r	Caudal	
	RPM	m	m	m	m	A	V	kW	CV	%	l/min	m3/h
1	1491	-1.2	58	0	60.2	70.1	387.8	33.6	43.37	-0.3	-1	-0.6
2	1489	-1.3	57.9	.17	60.37	86.6	386.7	46.4	59.89	52.62	2349	140.94
3	1484	-1.4	53.8	.65	56.85	107.9	387.7	61.5	79.38	72.68	4567	274.02
4	1489	-1.5	50.5	1.04	54.04	120	388.9	69.7	89.97	77.28	5790	347.4
5	1486	-1.7	45.8	1.77	50.27	136.3	389	80.5	103.91	81.3	7562	453.72
6	1485	-1.8	40.8	2.32	45.92	145.9	387.9	86.4	111.52	79.22	8657	519.42
7	0	-2.1	28.7	3.13	34.93	156.7	388	93.4	120.56	64.75	10055	603.3
8	0	-2.1	26.5	3.22	32.82	158.4	386.6	93.9	121.2	61.34	10193	611.58

**OBSERVACIONES:**

PRUEBA VALIDA

**ENSAYO REALIZADO POR:**

PRO TANGIA

JLF INGENIERIA

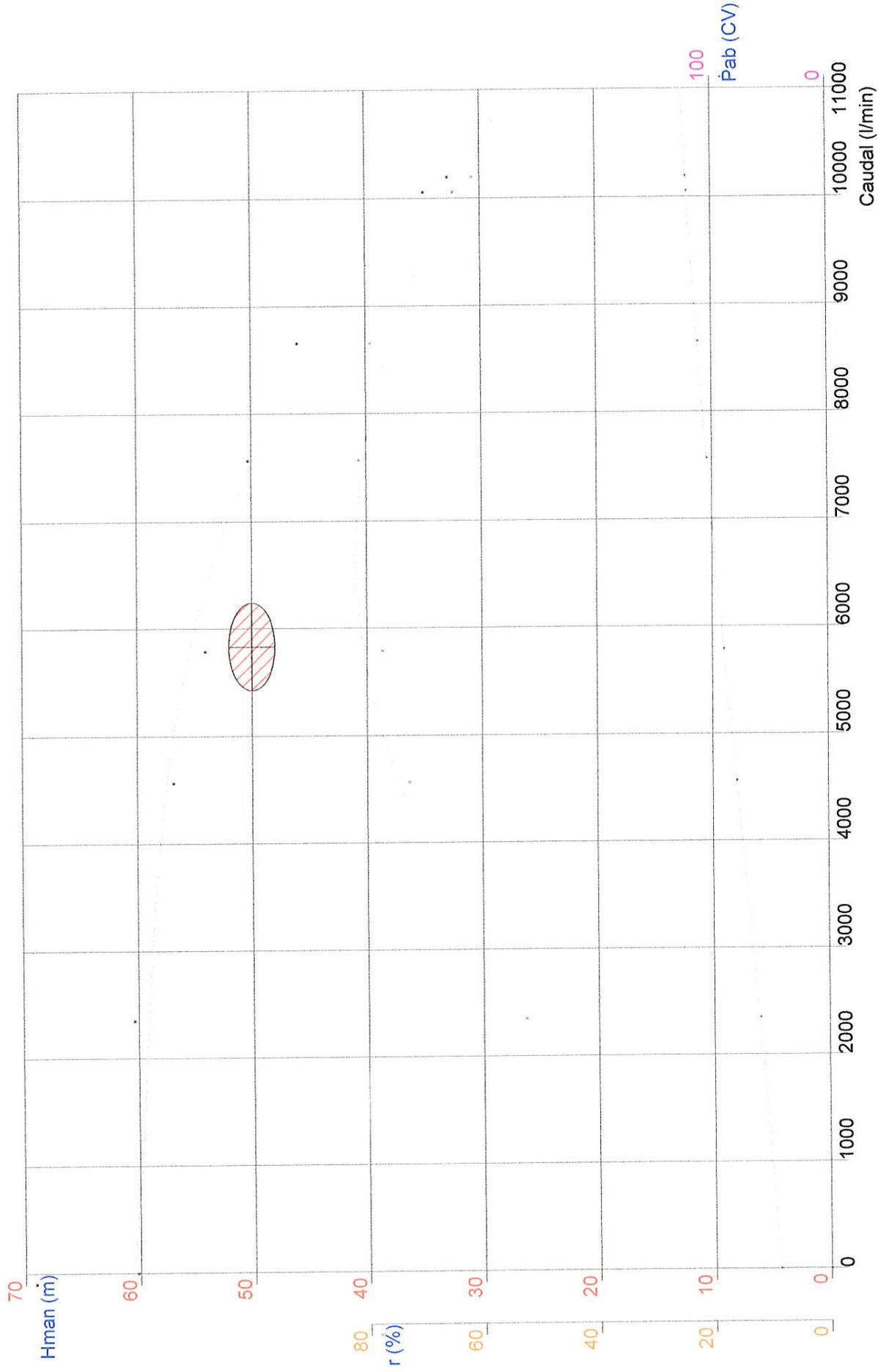
B. IDEAL

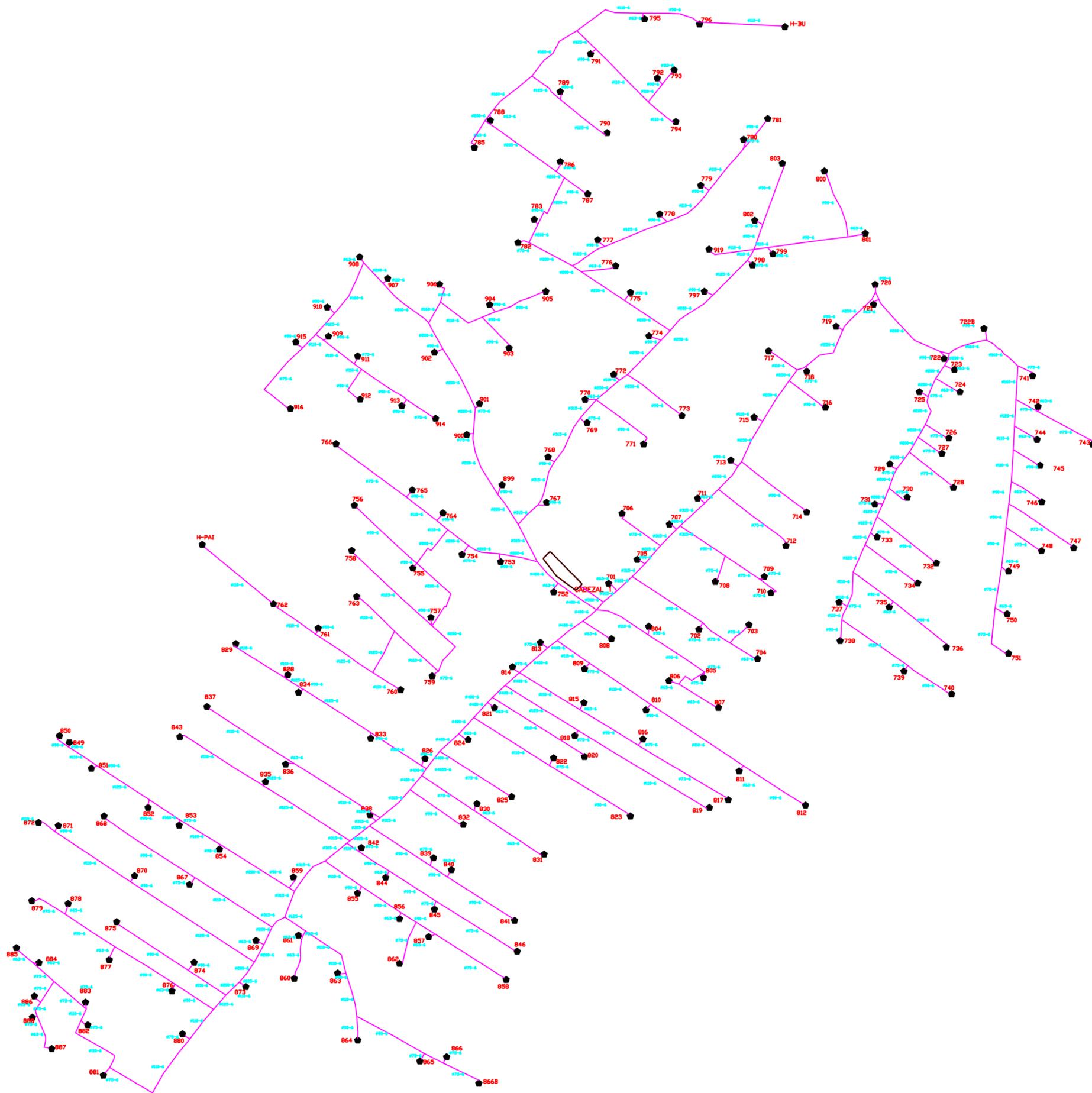


ISO 2548 CLASE C  
PROC. PR-09

cpt 150-460  
1450 RPM

BOMBA N° 273054-08  
PRUEBA N° 4851ci





TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT  
POLITÀCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALÈNCIA

Proyecto:

**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA  
ENERGÉTICA DE LA RED DE RIEGO  
ABASTECIDA POR EL CABEZAL  
NÚMERO UNO EN EL TÉRMINO DE  
NULES**

Plano:

**Distribución actual de la red de riego**

Fecha:

Mayo 2018

Escala:

1/11000

Nº Plano:

1

Autor del proyecto:

Javier Roselló Tornero