

Trabajo Fin de Máster

SIMULACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE BOMBAS TRABAJANDO COMO TURBINAS A PARTIR DEL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE PICANYA

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

ROBERTO DEL TESO MARCH

Director:

VICENT B. ESPERT ALEMANY

Codirector/es:

ELENA GÓMEZ SELLÉS

SEPTIEMBRE, 2016



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Simulación de la recuperación de energía mediante bombas trabajando como turbinas a partir del análisis energético de la red de abastecimiento de agua potable del municipio de Picanya

Título del TFM en inglés: Energy analysis of the Picanya water distribution network and simulation of energy recovery using pumps working as turbines

Título del TFM en Valenciano: Simulació de la recuperació d'energia mitjançant bombes treballant com turbinas a partir de l'anàlisi energètic de la xarxa d'abastament d'aigua potable del municipi de Picanya

Alumno: ROBERTO DEL TESO MARCH

Director: VICENT B. ESPERT ALEMANY

Codirector/es: ELENA GÓMEZ SELLÉS

Fecha de Lectura: septiembre, 2016

RESUMEN

Con el presente Trabajo Final de Máster se pretende poner de manifiesto la importancia de la eficiencia energética en los sistemas de distribución de agua urbana, y la posibilidad de utilizar bombas trabajando como turbinas (PATs) como medio para llegar a tal fin.

Para ello, el trabajo se centra en el estudio de la red de distribución de agua potable del municipio de Picanya. El suministro de agua de esta localidad se realiza mediante conexión directa a la red básica metropolitana, esto hace que la presión en cabecera sea excesiva, existiendo una válvula reductora de presión (VRP) que permite adecuar las presiones a las requeridas en el municipio.

Tras un análisis preliminar basado en la identificación de caudales consumidos, y en la caracterización de la propia red, se realiza la auditoría energética de este sistema de

distribución. De dicha auditoría se concluye que una manera de mejorar la eficiencia energética del sistema sería recuperando la energía disipada por la VRP situada en cabecera. Para ello se decide instalar en paralelo a la VRP una bomba funcionando como turbina. La simulación de este posible escenario de recuperación de energía se realiza mediante el software ALLIEVI, el cual permite modelizar el funcionamiento de la bomba trabajando como turbina a través de las curvas universales que lleva implementadas.

Una vez realizado el modelo de la red con ALLIEVI, se sigue una metodología que permite obtener el punto óptimo de funcionamiento de la bomba a instalar, y que funcionará como turbina, con el que se consigue la mayor recuperación de energía junto a un correcto funcionamiento del sistema.

Una vez hecho esto, se simulan y estudian diferentes alternativas de instalación de las PATs como son su colocación en serie y la eliminación de la VRP para que en todo momento el caudal circule por la bomba.

Por último, se obtendrán una serie de conclusiones de este estudio realizado en la red de distribución de agua potable de Picanya

RESUM

Amb el present Treball Final de Màster es pretén posar de manifest la importància de l'eficiència energètica en els sistemes de distribució d'aigua urbana, i la possibilitat d'utilitzar bombes treballant com turbines (PAT) com a mitjà per arribar a aquest fi.

Per a això, el treball es centra en l'estudi de la xarxa de distribució d'aigua potable del municipi de Picanya. El subministrament d'aigua d'aquesta localitat es realitza mitjançant connexió directa a la xarxa bàsica metropolitana, això fa que la pressió en capçalera siga excessiva, per aquesta raó hi ha una vàlvula reductora de pressió (VRP) que permet adequar les pressions a les requerides pel municipi.

Després d'una anàlisi preliminar basat en la identificació de cabals consumits, i en la caracterització de la pròpia xarxa, es realitza l'auditoria energètica d'aquest sistema de distribució. D'aquesta auditoria es conclou que una manera de millorar l'eficiència energètica del sistema seria recuperant l'energia dissipada per la VRP situada a capçalera.

Per això es decideix instal·lar en paral·lel a la VRP una bomba funcionant com turbina. La simulació d'aquest possible escenari de recuperació d'energia es realitza mitjançant el programa ALLIEVI, el qual permet modelitzar el funcionament de la bomba treballant com turbina a través de les corbes universals que porta implementades.

Una vegada realitzat el model de la xarxa amb ALLIEVI, se segueix una metodologia que permet obtenir el punt òptim de funcionament de la bomba a instal·lar, i que funcionarà com turbina, amb el qual s'aconsegueix la major recuperació d'energia al costat d'un correcte funcionament del sistema. Un cop fet això, es simulen i estudien diferents alternatives d'instal·lació de les PATs con són la seua colocació en serie i l'eliminació de la VRP perquè en tot moment el cabal passe per la bomba.

Finalment, s'obtindran una sèrie de conclusions de l'estudi realitzat a la xarxa de distribució d'aigua potable de Picanya.

ABSTRACT

This final Project was designed to show the importance of energy efficiency in urban water distribution systems, and the possibility of using Pumps As Turbines (PATs) as means to this end.

For that reason the focus of the study is on the Picanya water distribution network. The water supply of the town is done by direct connection to the metropolitan core network, this makes the pressure excessive, and because of this, there is a pressure reducing valve (PRV) which helps to bring the pressures required in the municipality.

After doing an identification of the consumed flow rates and a characterization of the network, an energy audit of the distribution system was performed. That audit concludes that one way to improve the energy efficiency of the system would be recovering the energy dissipated by the VRP located at the head. For this reason, it was decided to install in parallel with the VRP a pump operating as a turbine. The simulation of the energy recovery was performed by ALLIEVI software, which is able to show a model of a pump working as a turbine through universal curves leading implemented.

Once the model of the net was created, different operating points were tested until finding the one that allowed the highest energy recovery with proper operation of the system. Once this was done, different scenarios were simulated and studied, such as install in serial with the VRP a pump operating as a turbine, and the elimination of the VRP in order that at all times the volume can flow through the pump.

Finally, the study of the Picanya water distribution network used to draw conclusions.

Palabras clave: bombas trabajando como turbinas (PATs), recuperación de energía, eficiencia energética, válvula reductora de presión (VRP), red de distribución de agua

Paraules clau: bombes treballant com turbinas (PATs), recuperació d'energia, eficiència energètica, vàlvula reductora de pressió (VRP), xarxa d'abastament d'aigua

Keywords: pumps working as turbines (PATs), energy recovery, energy efficiency, pressure reducing valve (PRV), water distribution systems

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	1
1.1.1 Agua para la energía.....	1
1.1.2 Energía para el agua	2
1.1.3 Previsiones futuras	4
1.2 Mejora de la eficiencia energética en las redes a presión	5
1.3 Las bombas trabajando como turbinas (PATs).....	6
1.4 Objetivos y metodología	7
2 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA RED	9
2.1 El municipio de Picanya	9
2.2 Identificación de caudales	10
2.3 Caracterización de la red	13
2.3.1 Cartografía de la red.....	13
2.3.2 Diámetros y materiales de las tuberías.....	14
2.3.3 Presiones en la red	14
3 MODELO MATEMÁTICO DE LA RED	17
3.1 Construcción del modelo.....	17
3.1.1 Esqueletización.....	17
3.1.2 Asignación de demandas.....	20
3.1.3 Curvas de modulación	22
3.1.4 Fuente de suministro	25
3.1.5 Modelación de fugas	26
3.2 Funcionamiento del modelo	31
4 ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA	35

4.1	El software ITAEnergy.....	35
4.2	Balance hídrico	37
4.3	Auditoría energética.....	40
4.3.1	Energía total aportada	40
4.3.2	Energía total consumida.....	41
4.4	Conclusiones de la auditoría energética	46
5	MODELACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA	49
5.1	Modelo de la red con ALLIEVI.....	49
5.1.1	Tuberías del modelo.....	50
5.1.2	Asignación de demandas.....	51
5.1.3	Fuente de suministro	53
5.1.4	Comparación del modelo	55
5.2	Introducción de la PAT en el modelo	57
5.2.1	Obtención del punto óptimo de funcionamiento de la bomba.....	62
5.3	Recuperación de energía.....	64
5.3.1	Mejora del punto óptimo de funcionamiento	67
5.3.2	Curvas características reales	75
5.3.3	Funcionamiento de la bomba en el modo turbina	79
5.4	Análisis de la VRP.....	85
5.4.1	Cavitación en la válvula	85
5.4.2	Cambio de la VRP	87
6	ALTERNATIVAS DE INSTALACIÓN DE LA PAT	90
6.1	Colocación en serie de la PAT.....	90
6.2	Eliminación de la VRP	93
7	CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	96



Anejo 1 : Planos.....	101
Plano 1: Plano de situación.....	101
Plano 2: Plano de cotas.....	102
Plano 3: Red de distribución de agua potable.....	103
Plano 4: Plano de usos del suelo	106
Anejo 2 : Descripción del modelo en EPANET.....	107
Anejo 3 : Cálculo de energías	109
Anejo 4 : Selección del punto óptimo de funcionamiento real	115
Escenario diurno	115
Escenario nocturno.....	118
Anejo 5 : Representación de las curvas universales	122
BIBLIOGRAFÍA	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Cobertura de la demanda energética peninsular (Red Eléctrica de España, 2015)	2
Figura 2-1: Evolución de la población del municipio de Picanya	10
Figura 2-2: Usos del agua en el municipio de Picanya	12
Figura 3-1: Primera esqueletización (izquierda); segunda esqueletización (derecha)	18
Figura 3-2: Esqueletización final en AutoCAD	19
Figura 3-3: Esqueletización final en EPANET	20
Figura 3-4: Zonas de consumo que agrupa cada uno de los 46 nudos de consumo del modelo	21
Figura 3-5: Curva de modulación para consumos industriales (arriba izquierda), docentes (arriba derecha), deportivos (abajo izquierda) y domésticos (abajo derecha)	23
Figura 3-6: Demandas del nudo “id1” introducidas en EPANET	25
Figura 3-7: Leyes de control y esquema de la fuente de entrada de agua a la red	26
Figura 3-8: Balance hídrico técnico	28
Figura 3-9: Datos de partida para la realización del modelo con las fugas incorporadas	31
Figura 3-10: Curva de evolución de caudal a través de la VRP	33
Figura 3-11: Distribución de presiones en el momento de mínimo consumo (3:00h)	34
Figura 3-12: Distribución de presiones en el momento de máximo consumo de la red (11:00 h)	34
Figura 4-1. Selección de los parámetros de cálculo para la realización de la auditoría	36
Figura 4-2: Primeros resultados del cálculo energético	36
Figura 4-3: Esquema de las energías entrantes y salientes en la red	40
Figura 4-4: Esquema de energías entregadas a los usuarios	42
Figura 4-5: Energía entregada a los usuarios en el momento de mínimo y máximo consumo	44
Figura 4-6: Energías consumidas en el sistema	45
Figura 5-1: Esquema primario de la red con ALLIEVI	50
Figura 5-2: Ley de caudal asignada al nudo “pd1”	52
Figura 5-3: Curva de pérdidas seleccionada para la VRP	54
Figura 5-4: Modelo matemático realizado con ALLIEVI	56

Figura 5-5: Presión en el nudo “d30”. EPANET (izquierda); ALLIEVI (derecha)	57
Figura 5-6: Caudal por la VRP. EPANET (izquierda); ALLIEVI (derecha)	57
Figura 5-7: Instalación de la PAT en paralelo a la VRP	57
Figura 5-8: Datos a introducir en la bomba funcionando como turbina	58
Figura 5-9: Diagrama de campos de trabajo de una bomba. (Abreu, et al., 2012)	59
Figura 5-10: Asistente para el cálculo del momento de inercia del grupo de bombeo.....	61
Figura 5-11: Rango de puntos óptimos de funcionamiento a estudiar	68
Figura 5-12: Puntos óptimos de funcionamiento estudiados en la primera acotación.....	69
Figura 5-13: Puntos óptimos de funcionamiento estudiados en la segunda acotación	70
Figura 5-14: Puntos óptimos de funcionamiento estudiados en la tercera acotación.....	71
Figura 5-15: Puntos óptimos de funcionamiento estudiados en la cuarta y última acotación	71
Figura 5-16: puntos de funcionamiento óptimos analizados y energía recuperada para el escenario diurno.....	72
Figura 5-17: puntos óptimos de funcionamiento analizados para el escenario nocturno,	72
Figura 5-18: Curva 50-16/ ϕ 135 seleccionada para el escenario diurno	76
Figura 5-19: Presión a la salida de la VRP con la curva real de la bomba (escenario diurno) .	77
Figura 5-20: Curva 32-26/ ϕ 205 seleccionada para el escenario diurno	78
Figura 5-21: Presión a la salida de la VRP con la curva real de la bomba (escenario nocturno)	79
Figura 5-22: Caudal y altura de la bomba en el escenario diurno	80
Figura 5-23: Curva característica de la bomba 50-16/ ϕ 135 funcionando como turbina.....	80
Figura 5-24: curva de rendimiento de la bomba 50-16/ ϕ 135 funcionando como turbina.....	81
Figura 5-25: Caudal y altura de la bomba en el escenario nocturno	81
Figura 5-26: Curva característica de la bomba 32-26/ ϕ 205 funcionando como turbina.....	82
Figura 5-27: curva de rendimiento de la bomba 32-26/ ϕ 205 funcionando como turbina.....	82
Figura 5-28: Curva NE 620/ ϕ 200 seleccionada para el escenario diurno	83
Figura 5-29: Curva característica de la bomba NE 620/ ϕ 200 funcionando como turbina	84
Figura 5-30: curva de rendimiento de la bomba NE 620/ ϕ 200 funcionando como turbina ...	84
Figura 5-31: Caudal circulante por la VRP en el escenario diurno	86
Figura 5-32: Diagrama 1 de cavitación de la VRP.....	86
Figura 5-33: Diagrama 2 de cavitación de la VRP.....	87

Figura 5-34: Comparación de la apertura de la válvula en “V” y en disco estándar.....	89
Figura 6-1: Esquema de la PAT en serie con la VRP	90
Figura 6-2: Esquema de la PAT sin VRP	93
Figura 6-3: Presión a la salida de la PAT (Q=30 l/s; H=5m; P=2kW).....	94
Figura 6-4: Presión a la salida de la PAT (Q=20 l/s; H=2m; P=0,55kW).....	95
Figura 6-5: Presión en el nudo más desfavorable de la red “cd2”	95
<u>ANEJOS</u>	
Figura A 1: Curvas de Suter para la función $f_h(\theta)$. (Abreu, et al., 2012)	123
Figura A 2: Curvas de Suter para la función $f_\beta(\theta)$. (Abreu, et al., 2012)	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Indicadores de producción y consumo de energía por usos del agua (Corominas, 2010).....	3
Tabla 2-1: Distribución de usos del agua en España, CCVV y Picanya	13
Tabla 2-2: Presiones en el calderín	15
Tabla 3-1: Balance hídrico de la IWA.....	27
Tabla 4-1: Balance hídrico del sistema.....	37
Tabla 4-2: Indicadores representativos del estado del sistema	38
Tabla 4-3: Calificación de la gestión de un abastecimiento en función de η_s	39
Tabla 4-4: Error en el balance volumétrico	39
Tabla 4-5: Energías entrantes al sistema	41
Tabla 4-6: Energías salientes del sistema.....	41
Tabla 5-1: Demanda base del nudo “pd1”	51
Tabla 5-2: Cálculo de las demandas a introducir en la ley de caudal del nudo “pd1”.....	52
Tabla 5-3: Coeficientes K_{v0} de la VRP	54
Tabla 5-4: Relación entre el grado de apertura y el k de la VRP con apertura en “V”	55
Tabla 5-5: Introducción del punto óptimo de funcionamiento en ALLIEVI	62
Tabla 5-6: Coeficientes que relacionan el funcionamiento en modo bomba y turbina	63
Tabla 5-7: Caudales estimados en l/s para el modo turbina	63
Tabla 5-8: Puntos óptimos de funcionamiento a simular en el escenario diurno.....	64
Tabla 5-9: Puntos óptimos de funcionamiento a simular en el escenario nocturno.....	64
Tabla 5-10: Energía obtenida diurna con los puntos de funcionamiento teóricos.....	66
Tabla 5-11: Energía obtenida nocturna con los puntos de funcionamiento teóricos	67
Tabla 5-12: Energía recuperada con la primera acotación	69
Tabla 5-13: Energía recuperada con la segunda acotación	70
Tabla 5-14: Energía recuperada con la tercera acotación	71
Tabla 5-15: Energía recuperada con la cuarta y última acotación.....	71
Tabla 5-16: Puntos óptimos de funcionamiento estudiados y energía recuperada en el escenario nocturno	73
Tabla 5-17: Energía recuperada cambiando la velocidad de rotación nominal de la bomba .	74

Tabla 5-18: Punto óptimo de funcionamiento estimado para el escenario diurno	75
Tabla 5-19: Punto óptimo de funcionamiento estimado para el escenario nocturno	75
Tabla 5-20: Punto óptimo de funcionamiento de la curva 50-16/ ϕ 135	76
Tabla 5-21: Punto óptimo de funcionamiento de la curva 32-26/ ϕ 205	77
Tabla 5-22: Punto óptimo de funcionamiento de la curva NE 620/ ϕ 200	83
Tabla 5-23: Relación entre el grado de apertura y el k de la VRP con disco estándar	88
Tabla 6-1: Energía obtenida en los puntos de funcionamiento estimados extremos con la PAT en línea	91
Tabla 6-2: Primeros puntos óptimos de funcionamiento simulados con la PAT en línea	91
Tabla 6-3: Segundos puntos óptimos de funcionamiento simulados con la PAT en línea	92
Tabla 6-4: Terceros y últimos puntos óptimos de funcionamiento simulados con la PAT en línea	92
Tabla 6-5: punto óptimo de funcionamiento estudiado sin VRP	94
Tabla 7-1: Auditoría energética tras la instalación de las PATs	97
Tabla 7-2: Resumen de las energías recuperadas con la metodología establecida	100
<u>ANEJOS</u>	
Tabla A 1: Cotas y demanda base de los nudos	107
Tabla A 2: Longitudes y diámetros de las tuberías	108
Tabla A 3: Comparación de curvas reales con curvas universales	125



"En un momento en que el mundo sienta las bases de un futuro más sostenible, la vital interrelación entre el agua, los alimentos y la energía plantea uno de los problemas más difíciles a los que nos enfrentamos.

Sin agua no hay dignidad, ni se puede escapar de la pobreza"

*Mensaje del Secretario General de las Naciones Unidas Ban Ki-moon con motivo
del Día Mundial del Agua de 2011*

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El agua y la energía son piezas fundamentales para el desarrollo económico y social de cualquier localidad, encajando una con otra a la perfección debido a que son dos sectores que se encuentran estrechamente interconectados, siendo necesaria en muchos casos el agua para la obtención de energía, del mismo modo que lo es la energía para la obtención y puesta en servicio del agua.

En las siguientes líneas se pretende explicar la relación entre estos dos sectores, y la importancia de tratarlos de manera conjunta para mejorar la eficiencia de los sistemas de distribución de agua a presión.

1.1.1 Agua para la energía

El agua es esencial tanto para la salud de los seres humanos y el cultivo de alimentos, como para la generación de energía. Los procesos energéticos necesitan el agua para su producción. Uno de los ejemplos más claros es la necesidad de disponer de un salto de agua para el funcionamiento de las turbinas en la energía hidroeléctrica, pero este no es el único proceso energético que requiere del uso de este recurso: tanto la extracción de materias primas, como los procesos de limpieza o la refrigeración de plantas térmicas requieren de su uso. De hecho la energía utiliza el 8% del total de agua dulce extraída en todo el mundo y hasta un 40% en algunos países desarrollados, según datos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). En concreto, según la UNESCO, la refrigeración de procesos energéticos representa entre el 1 y el 2% de la demanda total de recursos hídricos en el mundo.

La importancia del agua para generación de energía hidroeléctrica es evidente, destacando que alrededor del 20% de la electricidad mundial es generada a través de este proceso, siendo la fuente de energía comercial renovable más importante y económica del mundo (UNESCO, 2016).

Aunque este porcentaje podría ser más elevado, incluso desbancando a las tradicionales y contaminantes fuentes de energía, con la clara contribución a la lucha contra el cambio climático que esto conllevaría. Pero no es así, la contribución de la energía hidroeléctrica a la

demanda eléctrica se mantiene estable desde la década de los 90, sin haber sufrido un aumento significativo.

Según el Informe de responsabilidad corporativa realizado por Red Eléctrica de España en 2015, la producción de energía a partir de fuentes renovables ha representado un 37% del total generado en el sistema eléctrico peninsular español, siendo la energía eólica la más importante con una contribución a la producción anual de energía del 19%, contribuyendo la energía hidráulica en un 11%. De todos modos, la cobertura de demanda energética sigue realizándose mayoritariamente con fuentes de energía no renovables, tal como puede verse en la Figura 1-1.

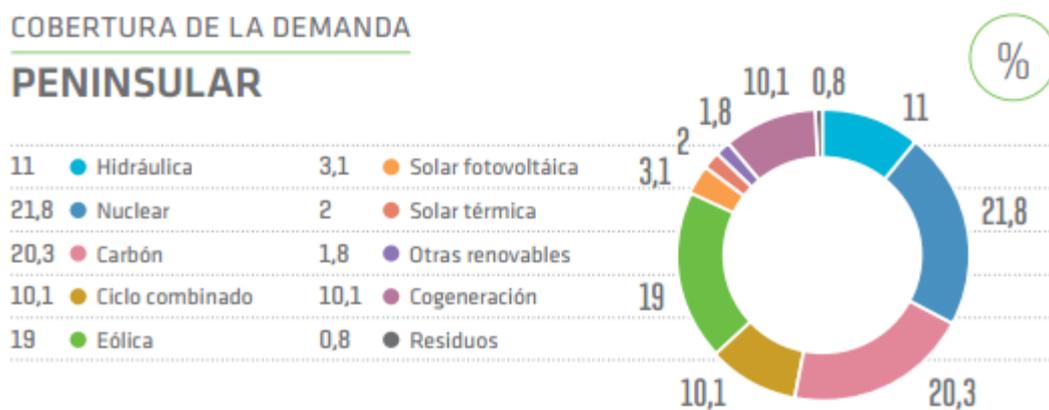


Figura 1-1: Cobertura de la demanda energética peninsular (Red Eléctrica de España, 2015)

Además, la edición 2007 de la World Energy Outlook que publica la Agencia Internacional de la Energía prevé que los combustibles fósiles seguirán atendiendo la mayor parte del aumento de la demanda energética, no siendo ésta una buena noticia para la lucha contra el cambio climático. Aunque hay que decir que también se espera un aumento de la energía hidroeléctrica como consecuencia del aumento del consumo energético estimado.

1.1.2 Energía para el agua

Inciendo sobre la relación entre el agua y la energía del mismo modo que se necesita agua para obtener energía, es imprescindible la energía a lo largo de todo el ciclo integral del agua, utilizándose tanto para su extracción a través de bombeos, como en el transporte, tratamiento (más aún en procesos de desalación), distribución, y depuración.

La energía puede representar entre un 60 y un 80% de los costes de transporte y tratamiento del agua, y hasta un 14% de los costes totales de los servicios relacionados con el agua

(UNESCO, 2016). Según las Naciones Unidas, aproximadamente el 7% del consumo total de energía en el mundo se utiliza para el suministro de agua. Concretamente entre el 2 y el 3 % de la energía que se consume en el mundo se utiliza para el bombeo y tratamiento de agua de las poblaciones urbanas y del sector industrial.

En este sentido, se espera que la extracción de agua subterránea utilice cada vez más energía en los bombeos debido a la bajada de los niveles freáticos que se están produciendo en las diferentes regiones del mundo, ya que actualmente la mayoría de aguas subterráneas se agotan con mayor velocidad que se reponen.

Concretando la situación en la que se encuentra España, se puede ver en la Tabla 1-1 la energía utilizada por usos del agua:

Tabla 1-1: Indicadores de producción y consumo de energía por usos del agua (Corominas, 2010)

		USO	kWh/m ³
Producción	Eléctrico	Hidroelectricidad (salto 100 m)	0,21
		Refrigeración central de ciclo combinado (circuito cerrado)	345
		Refrigeración central termosolar (circuito cerrado)	245
		Refrigeración central térmica (circuito abierto)	17,5
Consumo	Riego	Bombeo (100 m)	0,42
		Riego localizado	0,18
		Riego por aspersión	0,23
	Abastecimiento y saneamiento	Potabilización (ETAP)	0,18
		Depuración secundaria (EDAR)	0,3 - 0,5
		Depuración terciaria	0,15 - 0,25
	Transporte	Proyecto trasvase Ebro (altura man. media 723 m)	3,7
	Desalación	Desalación de agua marina	3,5 - 4
		Desalación de agua salobre	1,4 - 1,8

Los valores de esta tabla hacen ver la necesidad de realizar un uso eficiente y racional del agua, ya que la mejor manera para ser eficiente en el uso de la energía es no necesitarla. En los últimos años éste ha sido el camino a seguir por las diferentes políticas y estrategias propuestas, el ahorro del agua. Siendo prioritario en la situación actual mejorar la eficiencia energética, que en ocasiones se ha visto empeorada debido al aumento energético que ha propiciado las políticas de ahorro de agua implantadas. Un ejemplo claro de ello es la

conversión del riego en la agricultura, pasando de sistemas en lámina libre a sistemas presurizados que necesitan una gran cantidad de energía.

Todos los datos y cifras expuestas, ponen de manifiesto la necesidad de disponer de redes más eficientes desde el punto de vista energético.

1.1.3 Previsiones futuras

Históricamente, los esfuerzos para mejorar la eficiencia en el uso del agua y la energía han sido llevados a cabo por separado (UNEP, 2014). El nexo agua-energía entendido como la relación entre el agua necesaria en el proceso energético y la energía utilizada en el sector del agua, debe tratarse de manera conjunta. Las políticas hídricas y energéticas del presente y del futuro deben llevarse a cabo teniendo en cuenta ambos sectores, más aun con las demandas que se estiman para el futuro.

Según Naciones Unidas, es probable que aumente el consumo de la energía y electricidad en los próximos 25 años en todas las regiones del mundo, estimándose que para 2035, el consumo de energía habrá aumentado en un 35%, lo que conllevará que el consumo de agua por parte del sector aumente en un 85% (Naciones Unidas, 2014).

De estos datos se extrae que la demanda hídrica y energética seguirá aumentando significativamente durante las próximas décadas para satisfacer las economías en crecimiento, el cambio de los estilos de vida junto a los patrones de consumo establecidos y las necesidades de aumento de poblaciones (se estima que la población mundial superará los 9000 millones de personas en 2050, un 33% por encima de la población actual).

El crecimiento poblacional y económico afectan de forma contundente a un recurso tan necesario como es el agua. Los cálculos indican que, de seguir con las prácticas actuales, el mundo se enfrentará a un déficit del 40% entre la demanda proyectada y el suministro de agua disponible a finales de 2030. Actualmente, el 70% del agua que se extrae en el mundo se destina a la agricultura, estimando que para alimentar a más de 9000 millones de personas en 2050 se requerirá un aumento del 60 % en la producción agrícola y del 15 % en la extracción de agua (Banco Mundial, 2016).

Con estas previsiones, y conociendo que las actividades que se encuentran relacionadas con el uso del agua conllevan un consumo energético importante, parece evidente que el

desarrollo conjunto, y no de forma separada, de las políticas tanto hídricas como energéticas es de suma importancia.

Un paso para llegar a tal fin es el decenio 2014-2024 (Decenio de la Energía Sostenible para Todos), declarado por la Asamblea General de las Naciones Unidas. El Decenio reconoce la importancia de tener en cuenta las cuestiones energéticas en la elaboración de la agenda del desarrollo post-2015 y pone de manifiesto la importancia de mejorar la eficiencia energética, el aumento de las energías renovables y las tecnologías más limpias y energéticamente eficientes (Naciones Unidas, 2014). Hay que tener en cuenta que la mejora de la eficiencia en los modelos energéticos contribuirá a reducir el estrés hídrico.

1.2 Mejora de la eficiencia energética en las redes a presión

El crecimiento de los costes energéticos y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para paliar los efectos causados por el cambio climático, han puesto la eficiencia energética del transporte de agua a presión en primera plana del sector.

La mejora de la eficiencia en las redes de distribución de agua viene unida al binomio agua y energía, es necesaria la eficiencia tanto hídrica (entendida como una reducción de uso de agua) como energética de los sistemas, inseparables la una de la otra. Se debe intentar que la máxima cantidad de agua inyectada en un sistema sea consumida, y registrada para tener conocimiento de ello. Este hecho tiene como consecuencia directa una mejora de la eficiencia energética del sistema. Por ejemplo, en el caso de reducir al máximo las fugas en una red y concienciar a la ciudadanía del necesario ahorro de agua que debe llevarse a cabo, se reduciría considerablemente la cantidad de agua a inyectar en un sistema de distribución, viéndose por lo tanto reducido de manera directa el gasto energético de las bombas encargadas de dar suministro a dicho sistema.

Hay diferentes factores que permiten reducir el consumo de energía en una red de suministro, tales como la reducción de las pérdidas, la mejora de la infraestructura, la instalación de sistemas de telecontrol que permitan detectar el ineficiente funcionamiento del sistema, o la optimización de los sistemas de bombeo en su adecuación a la variación de la presión y las demandas del suministro de agua (Ministerio de industria, turismo y comercio; IDAE, s.f.).

La mejora de cada factor implicado en el gasto energético de una red de distribución conlleva al aumento de la eficiencia energética del sistema y por lo tanto la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

1.3 Las bombas trabajando como turbinas (PATs)

Existe un método como son las bombas funcionando como turbinas, también llamadas PATs por su acrónimo inglés *Pump as Turbine*, que ayudan a recuperar parte de la energía empleada en el funcionamiento de una red a presión. El uso de esta tecnología será la parte central del presente trabajo, presentando las principales ventajas e inconvenientes que tendría su incorporación a una red de distribución real.

La función principal de una bomba es aprovechar la energía mecánica que un motor transfiere a un eje a partir de una determinada energía eléctrica consumida, para proporcionar energía a un fluido con la intención de dotar a una instalación de un caudal y presión determinados. No obstante, este tipo de máquina hidráulica puede funcionar en sentido inverso (por ello se consideran máquinas reversibles) teniendo un comportamiento similar al de una turbina, aprovechando la energía del fluido para transformarla en energía mecánica haciendo girar el eje que conecta la bomba al motor. El motor en esta ocasión se convierte en generador produciendo energía eléctrica, utilizando normalmente para ello motores asíncronos.

Por lo tanto las máquinas hidráulicas reversibles, bombas trabajando en sentido inverso, pueden funcionar como instalaciones de generación hidroeléctrica, en ocasiones denominadas de microgeneración debido a que suelen utilizarse para proporcionar energías no demasiado grandes.

La utilización de bombas funcionando como turbinas, presenta una serie de ventajas sobre las turbinas tradicionales, siendo una de ellas la ventaja económica, ya que el coste de las bombas suele ser inferior al de las turbinas, entre otras cosas debido a que las bombas se fabrican para trabajar en un amplio rango de caudales y alturas, esto hace que exista una gran diversidad de bombas para una instalación, mientras que las turbinas se diseñan con características específicas para un emplazamiento determinado. Además, en la mayoría de ocasiones las bombas se ofertan con el motor integrado, pudiendo por lo tanto funcionar como un sistema de turbina y generador conjunto al hacerlas rotar en sentido inverso.

Sin embargo, la falta de información en los catálogos de los fabricantes sobre el funcionamiento de una bomba al operar como turbina, impide en muchas ocasiones implementar este tipo de equipos, ya que no existe forma rápida y sencilla de predecir su comportamiento sobre la instalación, recurriendo a ensayos de laboratorio o a ecuaciones teóricas que permitan estimar el funcionamiento de la bomba en el modo turbina.

1.4 Objetivos y metodología

Para dar solución al problema existente en la estimación del comportamiento que puede tener la instalación de PATs en un sistema, el objetivo principal del presente trabajo es realizar la simulación de bombas trabajando como turbinas, de tal forma que se pueda estimar de manera rápida y fiable tanto su comportamiento como la energía producida por la misma.

Para ello se ha desarrollado una metodología concreta que permite el estudio y el cálculo de la potencial energía recuperable con la instalación de estos elementos en sistemas de abastecimiento. Con el objetivo de aplicar y verificar la bondad de la metodología, se ha estudiado su aplicación en un abastecimiento concreto.

A lo largo del presente trabajo, se estudiará y analizará la posibilidad de instalar PATs, en el municipio de Picanya. El objetivo es cuantificar qué porcentaje de la energía disipada en la válvula reductora de presión existente a la entrada del abastecimiento de agua potable del municipio es potencialmente recuperable.

A partir del modelo matemático construido de la red se realiza la auditoría energética del sistema, de la que se extrae que una de las posibles medidas para mejorar la eficiencia energética del sistema es colocar una PAT que permita recuperar parte de la energía perdida en la válvula reductora de presión.

El presente estudio trata de dar solución a uno de los principales inconvenientes de la instalación de este tipo de elementos, la falta de información por parte de los fabricantes en sus catálogos al funcionar fuera del primer cuadrante de las curvas altura-caudal, siendo necesario en la mayoría de ocasiones acudir a ecuaciones teóricas que permitan estimar el comportamiento de la bomba en el modo turbina, o bien realizar pruebas de laboratorio.

Con el objetivo de encontrar alternativas a estos métodos tradicionales de cálculo o ensayo, se recurre a la simulación de las bombas funcionando como turbinas con el software ALLIEVI.

Hay que destacar que la función principal de este programa es el cálculo y simulación de transitorios hidráulicos, utilizando para ello un algoritmo de resolución basado en el método de las características. No obstante, al permitir simular bombas que trabajen fuera del primer cuadrante mediante el uso de las curvas universales, se decide utilizar este software como simulador del comportamiento de las PATs, y de la recuperación de energía esperada por su parte.

Con este estudio se comprueba como a través de la simulación de la PAT, se puede seleccionar aquella bomba que permita recuperar la mayor energía posible al sistema, además de comprobar su funcionamiento y por tanto la afección que puede causar a la red.

2 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA RED

Una vez puesto de manifiesto la importancia de la eficiencia energética en las redes de distribución de agua potable y explicado el funcionamiento básico de las PATs como medio para mejorar de la eficiencia energética de un sistema de distribución, se va a realizar el estudio de un caso concreto como es el de la red de distribución de agua potable del municipio de Picanya. Para ello, y con el fin de caracterizar, explicar y definir el sistema, se realiza a continuación un análisis preliminar de este sistema de distribución.

En este análisis se habla en primer lugar del propio municipio, de tal forma que quede explicada su situación y población. En segundo lugar se estudian los caudales consumidos registrados por los abonados, y finalmente se caracteriza la red de distribución, explicando tanto el perfil longitudinal de las tuberías, como los diámetros y materiales utilizados en la misma.

2.1 El municipio de Picanya

El municipio de Picanya se sitúa a cinco kilómetros de la ciudad de Valencia y a 2 de la localidad de Torrent, estando localizado en el Área Metropolitana de Valencia. Envuelto por las poblaciones de Valencia, Paiporta, Catarroja, Torrent, Alaquàs y Xirivella. En el plano de situación del Anejo 1 se puede ver gráficamente dónde queda localizada esta población.

Picanya está situada sobre la llanura litoral del sur de Valencia, caracterizada por una topografía prácticamente llana en toda su extensión, con una ligera pendiente uniforme y descendiente desde el noroeste del término hacia el sudeste, como puede verse en el plano de cotas del Anejo 1.

La zona se caracteriza por un alto dinamismo social y económico dentro del conjunto de la Comunidad Autónoma, contando con una población en 2015 de 11.270 habitantes según el INE¹. Población que se ha incrementado en casi 3.000 habitantes en los últimos 20 años, siendo el año 2012 el año con mayor número de habitantes (11.319), como puede verse en la Figura 2-1.

¹ Instituto Nacional de Estadística de España

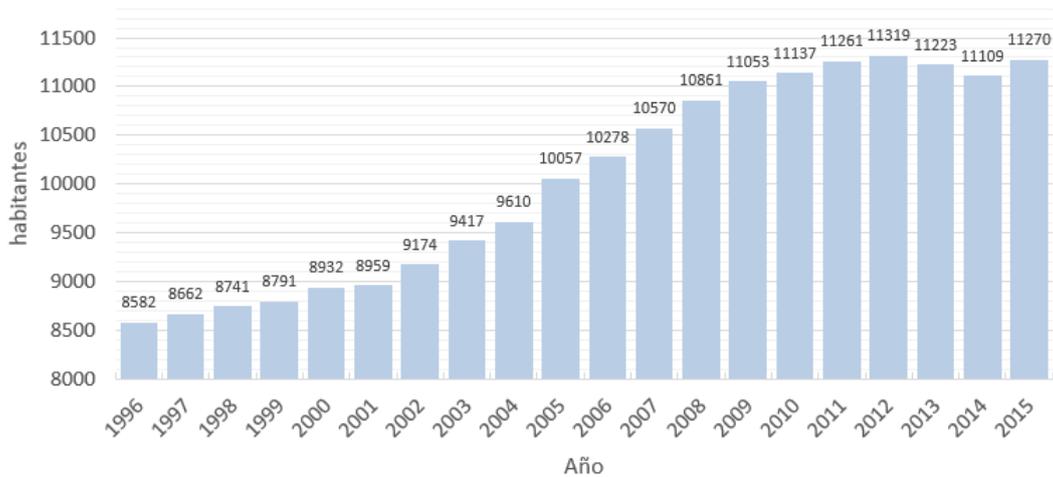


Figura 2-1: Evolución de la población del municipio de Picanya.

Hasta finales del siglo XX el municipio de Picanya se abastecía de agua procedente de un antiguo pozo construido en 1929, el cual se sitúa en el casco antiguo de la localidad, exactamente en la calle Verge de Monserrat nº 11. El agua era bombeada desde el pozo hasta un depósito elevado que abastecía por gravedad a la población, pero esta captación tuvo que abandonarse debido al alto contenido en nitratos del agua subterránea, pasando el suministro de agua potable a realizarse mediante conexión directa a la red básica metropolitana². En la actualidad las instalaciones de bombeo y el depósito elevado se conservan por su interés histórico y cultural, siendo aprovechadas por la empresa suministradora de agua como oficinas de gestión.

2.2 Identificación de caudales

Debido a que el mayor número de habitantes se da en el 2012, serán los datos de consumo registrado de agua de este año facilitados por la empresa suministradora los que se analizarán y utilizarán a lo largo del estudio. A partir de esta información se identifica un volumen registrado en el año 2012 de 769.599 m³/año. Este volumen registrado engloba la demanda de usuarios domésticos, industrial y servicio públicos, ya que a través de la red de distribución de agua potable del municipio se abastece tanto a la población en su consumo doméstico, como a sectores económicos y servicios públicos.

² Red arterial de tuberías encargada del transporte del agua en alta desde la planta potabilizadora hasta la entrada de los municipios de diversas comarcas valencianas.

Dentro del caudal registrado de servicios públicos, se diferencia entre el destinado a edificios e instalaciones públicas como son polideportivos, colegios, ayuntamiento... y el destinado al riego de jardines municipales.

Cabe destacar que Picanya cuenta con una gran extensión de zonas verdes, donde los árboles son un factor fundamental para el entorno, contando con más de 300.000 m² de zonas verdes, que suponen más de 20.000 unidades botánicas arbóreas (Ajuntament de Picanya, 2010). Actualmente estas zonas verdes se riegan con agua procedente de la red de abastecimiento, teniendo un consumo registrado en el año 2012 de 40.953 m³/año, que representa el 5,3% del agua registrada total del municipio. Según un estudio realizado esta cifra podría aumentar hasta los 67.839 m³/año en los años más secos, suponiendo así el 8,8 % del total de agua registrada (del Teso, et al., 2014). Esta cifra es significativa y se convierte en un derroche de agua potable, ya que para el riego de jardines municipales se podría utilizar un agua de menor calidad, por ello la alternativa que plantea el estudio anterior es realizar una red de riego que parta desde el antiguo pozo, para regar con agua de mayor contenido en nitratos, ya que sus valores son aptos para este fin.

El consumo registrado del resto de servicios públicos es de 42.416 m³/año, esto representa un 5,5 % del agua registrada total. Esto supone que el caudal total registrado de servicios público representa alrededor del 11% del consumo total del municipio (5,3% riegos municipales; 5,5 % resto de servicios públicos).

En cuanto al consumo anual doméstico registrado en 2012, éste fue de 474.304 m³/año, representando el 61,6 % del agua registrada total, siendo por lo tanto el uso doméstico el más significativo de la población. Por último, el 27,5 % del consumo registrado se debe a consumos económicos (industriales y comerciales), traduciéndose esta cifra en un volumen de 211.926 m³/año.

En la Figura 2-2 puede verse un resumen en forma de gráfico de los diferentes usos del agua en el municipio de Picanya. Además en el plano de usos del suelo del Anejo 1, se identifica que zonas del municipio se destinan a uso doméstico, cuales a servicios públicos y zonas verdes y por último qué zonas pertenecen al sector industrial.

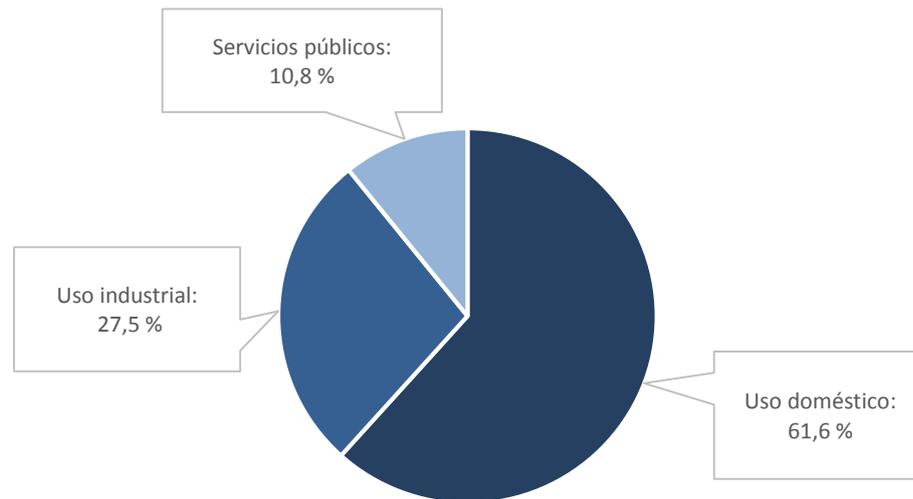


Figura 2-2: Usos del agua en el municipio de Picanya

La empresa suministradora cuenta con el dato de agua inyectada a la red, siendo de 1.030.086,3 m³/año. Esto quiere decir que aproximadamente el 75% del agua suministrada se registra a través de los contadores, existiendo por lo tanto un 25% de agua no registrada. Estos valores se encuentran dentro de la media española. Un estudio publicado por el INE en el año 2013, indica que “Durante el año 2013, se suministraron a las redes públicas de abastecimiento urbano 4.324 hectómetros cúbicos (hm³) de agua. Las tres cuartas partes (3.211 hm³) fueron volúmenes de agua registrada, es decir, medidos en los contadores de los usuarios.”

Por otro lado, la XIII encuesta nacional de AEAS sobre el suministro de agua potable y saneamiento en España publicada en 2014, también indica que existe en los últimos años un aumento del agua no registrada (ANR). Del 23,3% en el año 2010 al 24,6% en el 2012 (AEAS, AGA, 2014). Dato similar al obtenido para el abastecimiento estudiado.

En cuanto a los usos del agua que se realizan en Picanya, estos difieren ligeramente de las estadísticas recogidas para España donde, según este informe, en 2013 el volumen de agua registrado y distribuido a los hogares españoles fue de 2.218 hm³, lo que supuso el 69,1% del total. Los sectores económicos usaron 695 hm³ (el 21,6%), mientras que los consumos municipales (riego de jardines, baldeo de calles y otros usos) alcanzaron los 298 hm³ (el 9,3%). (INE, 2015). En la Tabla 2-1 puede verse un resumen comparativo de estas estadísticas.

Tabla 2-1: Distribución de usos del agua en España, CCVV y Picanya

	Año 2013				Año 2012	
	España		CCVV		Picanya	
	hm ³	%	hm ³	%	m ³	%
Uso doméstico	2218	69,1	285,7	78,5	474.304	61,6
Uso industrial y comercial	695	21,6	44,6	12,2	211.926	27,5
Consumos municipales	298	9,3	33,8	9,3	83.369	10,8
Total	3211	100	364,1	100	769.599	100

Estos datos difieren de los realizados en el XIV Estudio Nacional de Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España 2016, el cual ofrece datos recogidos en el año 2014 donde el 73% del agua urbana es de uso doméstico, el 11% se dedica al consumo industrial y comercial y el 16% restante se asigna a otros usos, como pueden ser los municipales o institucionales (AEAS, 2016).

En cualquier caso, estas estadísticas indican que el uso industrial y comercial en el municipio de Picanya tiene una importancia reseñable en detrimento del uso doméstico.

2.3 Caracterización de la red

2.3.1 Cartografía de la red

El recorrido de las diferentes tuberías que completan la red de distribución de agua potable de Picanya suma un total de unos 47 km, cuyo trazado mayoritariamente se realiza de forma mallada. Este tipo de trazado permite realizar el suministro a un mismo punto siguiendo trayectos alternativos, de tal forma que se garantice el abastecimiento de agua aunque existan cortes, averías o roturas en las conducciones. Además al distribuirse el agua por toda la red siguiendo diferentes caminos, las redes malladas permiten normalmente una distribución más uniforme de las presiones. En el plano de la red de distribución del Anejo 1 puede consultarse el trazado de la misma.

Esta morfología mallada ayuda a mantener la calidad del agua, ya que evita largos tiempos de residencia del agua en la red, permitiendo favorecer las condiciones mínimas de calidad para hacerla apta para el consumo.

Como ya se ha dicho, una de las principales características de este municipio es la carencia de grandes desniveles, manteniendo una cota topográfica prácticamente constante alrededor de 30 msnm. Esto se traduce en un perfil longitudinal de la red prácticamente plano, cuya cota

en el punto más bajo es de aproximadamente 25 msnm y la más alta entorno a 35 msnm, es decir, la diferencia de cotas máxima es de alrededor de 10 m.

2.3.2 Diámetros y materiales de las tuberías

A lo largo de los 47 km de tuberías existentes en el municipio se encuentran diferentes diámetros y materiales. Los diámetros van desde los 32 mm situados en algunas zonas malladas del casco antiguo y en ramales terminales, hasta los 300 mm de un tramo concreto situado en la Av. de l'horta donde existe un gran consumo debido a un instituto y a un parque de bomberos.

La acometida en alta desde la que se abastece toda la población, entronca con una tubería de fibrocementos de 250 mm con la que se da entrada a la red de distribución del municipio. Este material, prohibido actualmente, es el más utilizado en la red, siendo usado por tramos con diámetros que van desde los 50 hasta los 300 mm.

El resto de materiales utilizados son plásticos, existiendo polietileno de alta densidad y PVC. El polietileno de alta densidad es utilizado en diámetros comprendidos entre 32 mm (algunas acometidas de riego) y 160 mm, mientras que el PVC se usa en tuberías con diámetros de 110 y 140 mm.

2.3.3 Presiones en la red

La fuente de suministro de la red está situada en la C/ Verge del Carmen. La presión en este punto de entrada depende de la red básica metropolitana, existiendo dos escenarios en los que la presión de entrada se mantiene prácticamente constante. El primer escenario mantiene a la entrada del municipio una presión de 48 mca entre las 00:00 y las 06:00 horas, mientras que el segundo mantiene una presión de entrada de 52 mca desde las 06:00 hasta las 24:00.

Estas presiones impuestas por la red metropolitana son demasiado elevadas para el correcto funcionamiento del sistema de distribución, por ello existe una válvula reductora de presión (VRP)³ en este punto de entrada que permite adecuar las presiones a las requeridas por la red.

³ En lo que sigue se designará a la válvula reductora de presión por sus siglas: VRP

No se dispone de información específica sobre las características de esta válvula, únicamente que su diámetro nominal es de 200 mm. Sin embargo sí que es conocida su forma de actuar en el sistema, variando su presión de consigna para los dos escenarios.

De esta manera el tarado de la VRP es de 39,5 mca durante el escenario diurno (06:00-24:00), produciendo una caída de presión de 12,5 mca, mientras que por la noche (00:00 – 06:00) el tarado es de 29,5 mca produciendo una caída de presión de 18,5 mca.

Según la Normativa de Suministro de Agua del municipio de Picanya, la presión mínima a garantizar en la vivienda más elevada tiene que ser de 15 mca. En los casos en que la presión de la red no permita garantizar en la vivienda más elevada un suministro con una presión de 15 mca, y en épocas de máximo consumo, será necesario instalar en el inmueble equipos de sobreelevación (Ajuntament de Picanya, 2011).

Teniendo en cuenta el artículo 6.39: Condiciones de volumen y de la forma de los edificios del PGOU de Picanya, la altura máxima de edificación del municipio es de 12 metros. Se puede interpretar, por tanto, que la presión mínima en los puntos de consumo en los momentos de máxima demanda, debe ser de **27 mca** (15 + 12).

Además, en dicha normativa viene establecida la presión mínima del agua en el calderín, para aquellas viviendas que dispongan de éste. Se indica que: “La presión mínima del agua en el calderín se obtendrá sumando 15 metros de columna de agua (mca) a la altura entre la base del recipiente y el techo de la planta más elevada que se haya de alimentar. La presión máxima del agua en el calderín será superior en 30 mca a la presión mínima”. Así, a modo de ejemplo:

Tabla 2-2: Presiones en el calderín

Número de alturas del edificio	Presión mínima (mca)	Presión máxima (mca)
2	21	51
3	24	54
4	27	57

Por lo que se puede confirmar esta presión mínima de servicio de 27 mca, respaldada a su vez por la Norma alemana W-403. En particular, esta norma establece una presión mínima de 15 mca más tres metros adicionales por cada planta construida (se define a través de la expresión 15+3N, con N el número de plantas altas construidas). Teniendo en cuenta que las ordenanzas municipales de Picanya establecen una altura máxima de edificación de 12 m, entendiendo

que esto corresponde con 4 plantas construidas de 3 m de altura cada una, la norma W-403 establecería una presión mínima de servicio de $15 + 3 \cdot 4 = 27$ mca, tal como se ha definido.

El conocimiento de las presiones de servicio en el municipio permite establecer las condiciones energéticas mínimas de calidad. El modelo de la red realizado a través del software EPANET, el cual se explica en el siguiente capítulo, permitirá por un lado realizar la auditoría energética de este sistema de distribución, y por otro estudiar posibles cambios y estrategias en el sistema para verificar la idoneidad del cambio, sin necesidad de acometerlo en la realidad.

3 MODELO MATEMÁTICO DE LA RED

En el capítulo anterior se ha reunido información tanto del municipio como de su red de distribución, obteniendo de esta manera datos de las tuberías (diámetros, materiales, longitudes...), del recorrido que realizan y de su perfil longitudinal, así como información sobre los consumos realizados por parte de los usuarios, y las presiones de cabecera de la red.

Con todo esto, en el presente capítulo se pretende realizar el modelo matemático de la red que permita en primera instancia revisar su comportamiento para tener conocimiento sobre cómo se reparten las presiones y caudales a lo largo del municipio. Este modelo permitirá realizar un análisis energético del sistema que ayudará a determinar qué medidas de mejora de la eficiencia energética serían las mejores para llevar a cabo.

Para ello, en primer lugar se realiza la construcción del modelo, partiendo de la esqueletización de la red principal hasta llegar a la asignación de demandas en nudos representativos del municipio, de forma que queden representadas todas las demandas de los usuarios, por último se realizará la modelación de fugas estimadas y se establecerá la fuente de entrada de agua al municipio, modelando tanto el escenario diurno como el nocturno. Una vez finalizado el modelo se comprobará su funcionamiento, y se analizarán sus variables más características, como son caudales y presiones a lo largo del día.

3.1 Construcción del modelo

Haciendo uso del plano de la red de distribución en AutoCAD facilitado por el Ayuntamiento de Picanya, y con los datos recogidos en el capítulo anterior se realiza el modelo matemático de la red haciendo uso del extendido software EPANET.

3.1.1 Esqueletización

En primer lugar se realiza una esqueletización de la red, que no es más que una simplificación del entramado de tuberías existente en la realidad. Los elementos que no se incluyen en el esquema final de la red no quedan descartados ya que su efecto es tenido en cuenta sobre los elementos que formarán parte del modelo

Dado que el objetivo de este modelo no es realizar un estudio pormenorizado del funcionamiento de la red, sino tener una idea aproximada de su comportamiento, el nivel de

esqueletización será considerable, simplificando la elaboración del modelo, ya que no se representarán elementos puntuales del mismo.

Como se ha dicho anteriormente, para la realización del esquema de tuberías y nudos del modelo, se ha utilizado el plano de la red de distribución detallada del municipio realizado en AutoCAD por la administración del municipio. A partir de este plano se ha ido realizando la esqueletización, dibujando las tuberías con el programa AutoCAD.

Como primer criterio para realizar la esqueletización, se han escogido todas aquellas tuberías con diámetro mayor a 125 mm y se han eliminado el resto, esto permite tener una primera visión general de la forma del modelo, y permite eliminar las tuberías de menor diámetro, pensando que su capacidad no afecta de forma significativa al sistema. En la Figura 3-1 (izquierda) puede verse esta primera esqueletización:



Figura 3-1: Primera esqueletización (izquierda); segunda esqueletización (derecha)

Debido a la clara falta de conexión hidráulica entre las tuberías de esta primera esqueletización, se decide añadir aquellas tuberías de diámetro menor a 125 mm que se consideran necesarias para que la esqueletización del modelo tenga sentido hidráulico, teniendo siempre prioridad aquellos tubos con mayor diámetro, debido a su mayor influencia en la capacidad hidráulica del sistema. De esta manera se consigue un segundo esquema, Figura 3-1 (derecha), más realista y con el que ya se podría trabajar.

Por último, una vez realizada la esqueletización a partir de los diámetros más grandes de la red, se hace una revisión de las demandas que existen en el municipio. De esta forma se pone de manifiesto que existen zonas de la esqueletización realizada que pueden concentrarse en

un único nudo debido a la baja demanda que existe, al igual que existen zonas a las que habrá que añadir tuberías debido a que tienen una mayor demanda de la esperada.

De esta manera la esqueletización final realizada mediante el programa AutoCAD es la que se muestra en la Figura 3-2:



Figura 3-2: Esqueletización final en AutoCAD

Una vez definido el recorrido de las tuberías en el modelo, se utiliza el software EpaCAD para pasar la red dibujada en AutoCAD a EPANET, ya que este programa permite convertir de forma sencilla un fichero que contenga una red de AutoCAD, en un fichero interpretable por EPANET. En este proceso, EpaCAD es capaz de reconocer de forma automática las principales propiedades de los elementos, facilitando en gran medida el trabajo necesario para generar una red en EPANET, ya que automáticamente quedan definidas las coordenadas de los nudos y el trazado y longitudes de las tuberías.

Con el paso de AutoCAD a EPANET, utilizando la herramienta EpaCAD, el modelo queda tal como muestra la Figura 3-3. En el Anejo 2 puede verse una tabla con los diámetros y longitudes de cada una de las tuberías que finalmente se utilizarán en el modelo.

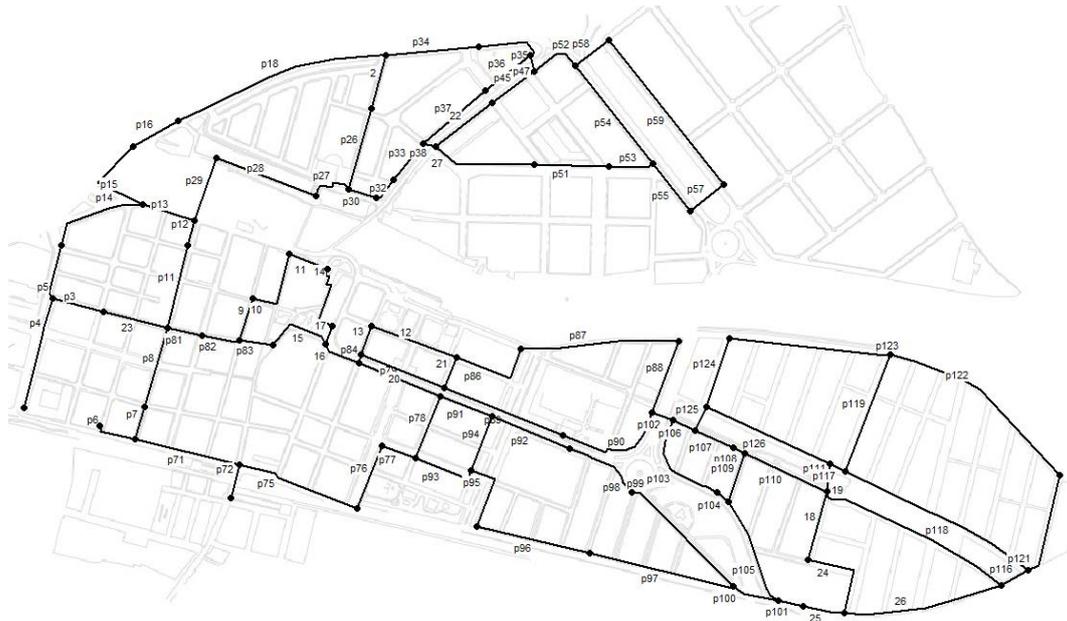


Figura 3-3: Esqueletización final en EPANET

3.1.2 Asignación de demandas

El modelo matemático de una red debe incluir un conocimiento lo más exhaustivo posible de los consumos realizados. Por ello, una vez dibujada la distribución de tuberías del modelo, se determina que nudos de los repartidos a lo largo de la red van a ser nudos de consumos y cuáles van a ser nudos auxiliares, de tal manera que cada nudo de consumo represente el consumo de agua de una determinada zona, quedando finalmente representados todos los consumos de la red.

En el punto 2.2 de este documento se ha realizado una identificación de los caudales anuales consumidos por los diferentes usos de la red. Posteriormente se ha realizado un tratamiento de estos datos de tal forma que los consumos anuales facilitados como volumen anual consumido en $m^3/año$, pasen a definirse como caudal consumido en l/s, estos datos nos permitirán definir la demanda de cada nudo de consumo en estas unidades.

Las simplificaciones que se realizan en el modelo pueden compensar determinados errores de partida, por ejemplo si se considera un sector como un único nudo, se elimina la incertidumbre sobre la distribución de consumos entre los diferentes abonados de la zona correspondiente (Cabrera Marcet, et al., 1996).

Una vez conocida la manera en que se reparten los consumos a lo largo de la red de distribución, se escogen como nudos de consumo del modelo aquellos que permitan realizar

una representación de todos los caudales consumidos en la red. En este modelo se han escogido 46 nudos de consumo repartidos a lo largo del modelo como puede verse en la Figura 3-4.

En este caso, cada nudo de consumo representa los consumos que se realizan en la mitad aproximadamente del trayecto de la tubería que une el siguiente nudo, o bien si son nudos terminales representa los consumos de una zona concreta. Los nudos situados en zonas de grandes consumos representan áreas más pequeñas, mientras que los nudos situados en zonas de consumos más limitados abarcan áreas más grandes. Para entender de manera intuitiva la asignación de demandas del modelo, en la Figura 3-4 puede verse las zonas de consumo que representa cada nudo. En esta imagen se observa como los nudos situados en la zona central del municipio, donde se concentra el mayor número de casas, representan menores áreas ya que los consumos son mayores.

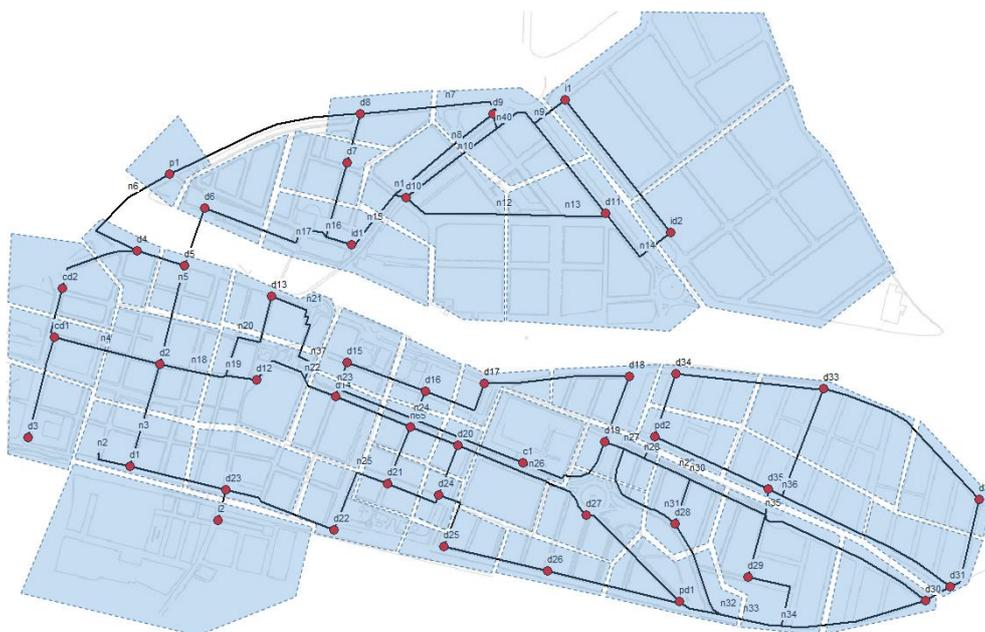


Figura 3-4: Zonas de consumo que agrupa cada uno de los 46 nudos de consumo del modelo

Una vez definidos los nudos de consumo, se le asigna a cada uno de ellos su correspondiente demanda base. La asignación de demandas de cada nudo de consumo, se realizará sumando los caudales consumidos por los usuarios de la zona que represente cada nudo y asignándolo como demanda base, este será el caudal promedio consumido por la zona que represente el nudo durante un día. En la Tabla A 1 del Anejo 2, se pueden ver las demandas base de todos los nudos del modelo.

Una vez conocida la demanda base de los nudos (consumo medio), resta asignar una determinada curva de modulación que represente la variabilidad de esta demanda base en función del tiempo.

3.1.3 Curvas de modulación

Definir la demanda en un nudo de consumo supone asignar al nudo de consumo asociado las características hidráulicas que reproducen su uso de agua, tanto la cantidad de agua como su evolución en el tiempo (Cabrera Marcet, et al., 1996). Así que para caracterizar el consumo en un nudo, además de introducir la demanda base, es necesario asignarle una curva de modulación que muestre la variabilidad de esa demanda base a lo largo del tiempo. Para ello estas curvas están formadas por un conjunto de coeficientes que multiplican la demanda base del nudo. En este caso, cada curva estará compuesta de 24 coeficientes multiplicadores que permitan representar el caudal consumido en cada hora del día.

Debido a que no se puede definir una curva de modulación particularizada para cada uno de los usuarios, se intenta modelar el consumo de la red asignando a las demandas base diferentes curvas de modulación según el tipo de usuario (doméstico, industrial...).

Por otro lado, al no disponer de información sobre la forma en que se distribuye el consumo de agua en los diferentes abonados a lo largo del día, se utilizarán curvas de modulación genéricas utilizadas extensamente en bibliografía, las cuales ayudarán a estimar la evolución de caudales en la red a lo largo de un día.

Se utilizará el Plan General de Ordenación Urbana del municipio, cuyo plano puede verse en el Anejo 1, para identificar el tipo de usuario que existe en cada zona y así poder asignarle su correspondiente curva de modulación. Además los caudales consumidos por cada abonado también servirán de ayuda para identificar el tipo de usuario, correspondiéndose normalmente los caudales más altos con abonados de características especiales (grandes consumidores municipales o industriales).

Una vez analizado tanto el mapa de usos del suelo del municipio como los caudales de los abonados, se observa que además de los consumos domésticos existen consumos importantes de agua que se sitúan en diferentes lugares del municipio. Este es el caso de las zonas industriales o los consumos producidos por colegios y centros deportivos. Por ello se decide crear cuatro curvas de modulación diferentes que se encargarán de representar la

evolución de este tipo de consumos. Estas curvas de modulación pueden verse en la Figura 3-5.

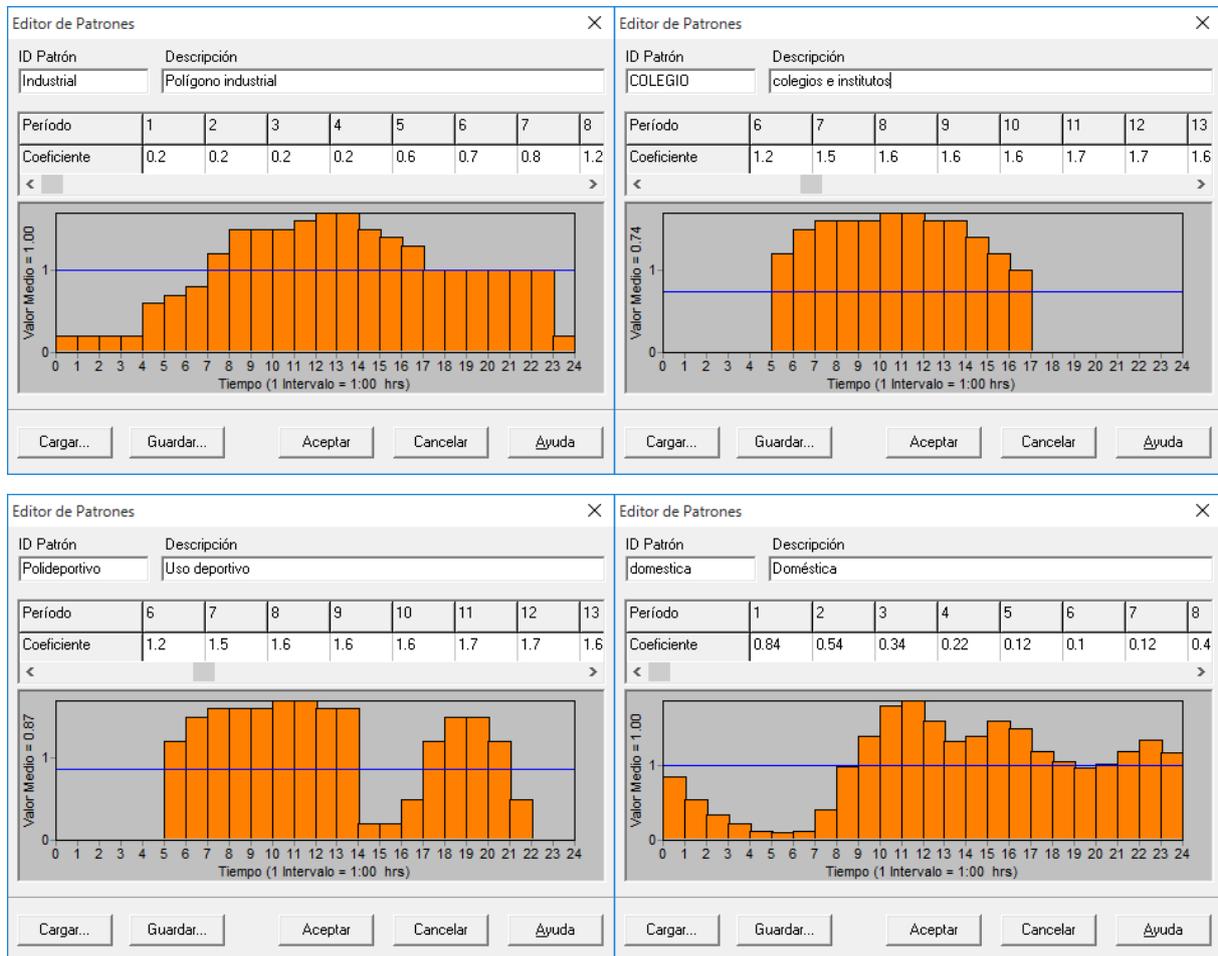


Figura 3-5: Curva de modulación para consumos industriales (arriba izquierda), docentes (arriba derecha), deportivos (abajo izquierda) y domésticos (abajo derecha)

Se observa como la curva de modulación industrial, la cual se aplica a 4 nudos de consumo del modelo, reparte sus mayores consumos en las horas centrales del día, entendiéndose que éstas son las horas de máxima producción de las industrias, dejando unos consumos mínimos nocturnos que pueden deberse a un mantenimiento mínimo de las mismas. Esta curva de modulación está asociada a la demanda de industrias de diferentes tamaños cuyos procesos varían, por lo tanto su patrón de comportamiento puede no ser representativo de algunos consumos.

En cambio se estima que la variabilidad de los consumos referidos a centros educativos será más representativa de la realidad, ya que únicamente existen consumos en las horas docentes, entendiéndose que fuera de este horario delimitado no se produce ningún uso. Este

tipo de demanda se reparte en tres nudos del modelo, destacando que la demanda base del nudo c1 se debe únicamente al consumo producido por uno de los colegios del municipio.

Los consumos debidos a centros deportivos se reparten en 3 nudos del modelo, a los cuales se les asigna una curva de modulación que permita aproximar el consumo de agua a lo largo del día. Esta curva representa consumos entre las 6:00 y las 22:00, rango estimado de apertura de los polideportivos, teniendo un consumo mínimo durante las horas de la comida.

Por último, los consumos domésticos son los que predominan a lo largo del municipio, representando más del 60% del consumo total. A estos consumos domésticos se les asigna una curva de modulación tipo con mayores consumos en las horas centrales del día y un consumo mínimo por la noche, seguido de un incremento durante las primeras horas de la mañana según la gente se levanta.

Al igual que los consumos domésticos, los jardines municipales y las instituciones públicas (ayuntamientos, juzgados...) se extienden a lo largo de todo el municipio, sin existir zonas especialmente afectadas por estos consumos, es por esta razón por la que se decide que la curva de modulación doméstica sea la encargada de representar dichos consumos. Además, teniendo en cuenta que la finalidad del modelo realizado es tantear el funcionamiento de la red en la realidad y que estos consumos no llegan a representar el 10% del consumo total, se estima que la inclusión de los riegos y consumos de instituciones públicas en la curva de modulación doméstica no supondrá un cambio considerable en la valoración de la evolución de caudales a lo largo del día.

Por último y para identificar rápidamente que tipo de usuario representa cada nudo, se renombran los identificativos de cada nudo bajo el siguiente criterio: los nudos que representen consumos industriales comenzarán por la letra "i" seguidos de un número que permita identificar la cantidad de nudos que tienen asignada la curva de modulación industrial, del mismo modo los consumos domésticos comenzarán por la letra "d", los de usos deportivos por la letra "p" y los colegios por la letra "c". En la Tabla A 1 del Anejo 2 pueden verse los identificativos utilizados en cada nudo de consumo del modelo.

Los nudos que representen el consumo de más de un tipo de abonado se identificarán con las letras de estos consumos seguidos de un número. Además el mismo nudo llevará incorporada ambas demandas, un ejemplo de esto es el nudo "id1" el cual representa por un lado

demandas industriales y por otro demandas domésticas. Como puede verse en la Figura 3-6, la demanda total de este nudo será de 0,576 l/s, repartiéndose 0,550 l/s como demanda doméstica y el resto, 0,126 l/s, como demanda industrial, ambas con sus correspondientes curvas de modulación.

	Demanda Base	Patrón de Tiempo	Categoría
1	0.550	domestica	
2	0.126	industrial	
3			
4			
5			
6			

Figura 3-6: Demandas del nudo “id1” introducidas en EPANET

3.1.4 Fuente de suministro

Una vez caracterizado el entramado de tuberías del modelo, y asignadas las diferentes demandas existentes a los nudos, únicamente falta por introducir la fuente de suministro del sistema. Como se ha explicado anteriormente, el municipio de Picanya se abastece directamente desde la red básica metropolitana, teniendo un único punto de entrada situado al sur de la localidad.

Este punto de entrada viene con las presiones impuestas por la red metropolitana, por lo que se representará en el modelo haciendo uso de dos embalses diferentes. El primero de ellos con una altura de 81 metros se encargará de representar el escenario nocturno, de 00:00 h a 06:00 h. Como el nudo de entrada tiene una cota de 33 m, este embalse impondrá una presión de entrada de 48 mca. Del mismo modo, el segundo embalse tendrá una altura de 85 metros imponiendo una presión de entrada de 52 mca, y representará el escenario diurno, de 06:00 h a 24:00 h.

Estas presiones impuestas en la realidad por la red básica metropolitana, y en el modelo por dos embalses cuyo funcionamiento se define a través de controles simples, se verán reducidas por una válvula reductora de presión encargada de adaptar las presiones en cabecera a las necesarias para el correcto funcionamiento de toda la red de distribución.

Se adapta el tarado de la VRP a cada uno de estos escenarios. De este modo, durante la noche la presión de tarado será de 30 mca introduciendo la válvula una pérdida de carga de 18 mca, ya que la presión de entrada en este escenario es de 48 mca. Mientras que en el escenario diurno la VRP tiene una consigna de 40 mca, siendo la presión de entrada de 52 mca, esto quiere decir que la pérdida de carga introducida por la válvula es de 12 mca.

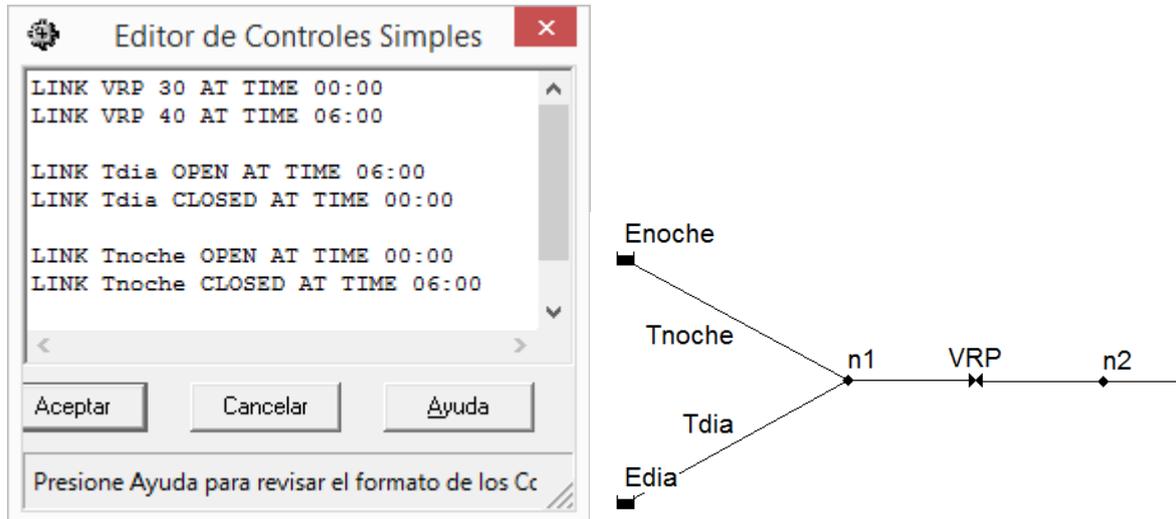


Figura 3-7: Leyes de control y esquema de la fuente de entrada de agua a la red.

Los dos embalses se conectan al nudo de entrada de la válvula reductora, n1, mediante dos tuberías auxiliares que únicamente sirven para dar conectividad hidráulica al modelo. Se controla la apertura y cierre de estas tuberías mediante leyes de control simples de EPANET, de tal forma que el estado inicial de las dos tuberías es cerrado, abriendo la tubería llamada “Tnoche” que une el embalse “Enoche” con la VRP entre las 00:00 y las 06:00 h, mientras que la tubería “Tdia” que une el embalse “Edia” con la VRP estará abierta entre las 06:00 y las 24:00 h. Por último el tarado de la válvula también se define desde las leyes de control según actúe la válvula durante el escenario diurno o nocturno. En la Figura 3-7 pueden verse definidas las leyes de control introducidas y el esquema del modelo que representa la fuente de entrada de agua a la red.

3.1.5 Modelación de fugas

Una vez editada la fuente de suministro, se podría dar por concluido el modelo ya que dispone de todos los elementos necesarios para realizar el cálculo matemático del mismo. Pero como ya se ha dicho anteriormente no todo el volumen inyectado en la red es volumen registrado.

A la diferencia entre el volumen inyectado y el registrado se le denomina volumen no registrado o incontrolado y puede tener diferentes orígenes como el volumen no contabilizado a los abonados por subcontaje de los contadores domiciliarios, el volumen no medido en conexiones a la red de agua potable sin contador (normalmente tomas ilegales o consumos institucionales), o las fugas en tuberías y acometidas (Arregui, 1998).

Un balance hídrico tiene como finalidad conocer los consumos incontrolados del sistema, es decir, diferenciar entre el agua consumida y el agua no consumida. El balance hídrico propuesto por la Internacional Water Association (IWA), extensamente reconocido, tiene un enfoque económico importante, expresándose en términos de agua facturada y no facturada, como puede verse en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Balance hídrico de la IWA

Volumen de entrada de agua al sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado facturado	Consumo medido facturado	Agua facturada	
			Consumo no medido facturado		
		Consumo autorizado no facturado	Consumo medido no facturado	Agua no facturada	
			Consumo no medido, no facturado		
	Pérdidas de agua	Pérdidas aparentes			Consumo no autorizado
					Imprecisiones de medida
		Pérdidas reales			Fugas en tuberías de distribución
					Fugas y derrames en tanques de almacenamiento
		Fugas en acometidas antes del medidor			

En esta ocasión se recurre a un balance hídrico de enfoque más técnico, en el que la base del mismo es la medición, estructurándose de manera ordenada y en diversos niveles los diferentes destinos del agua inyectada al sistema (Cabrera, et al., 1999). En la Figura 3-8 puede verse este balance hídrico técnico.

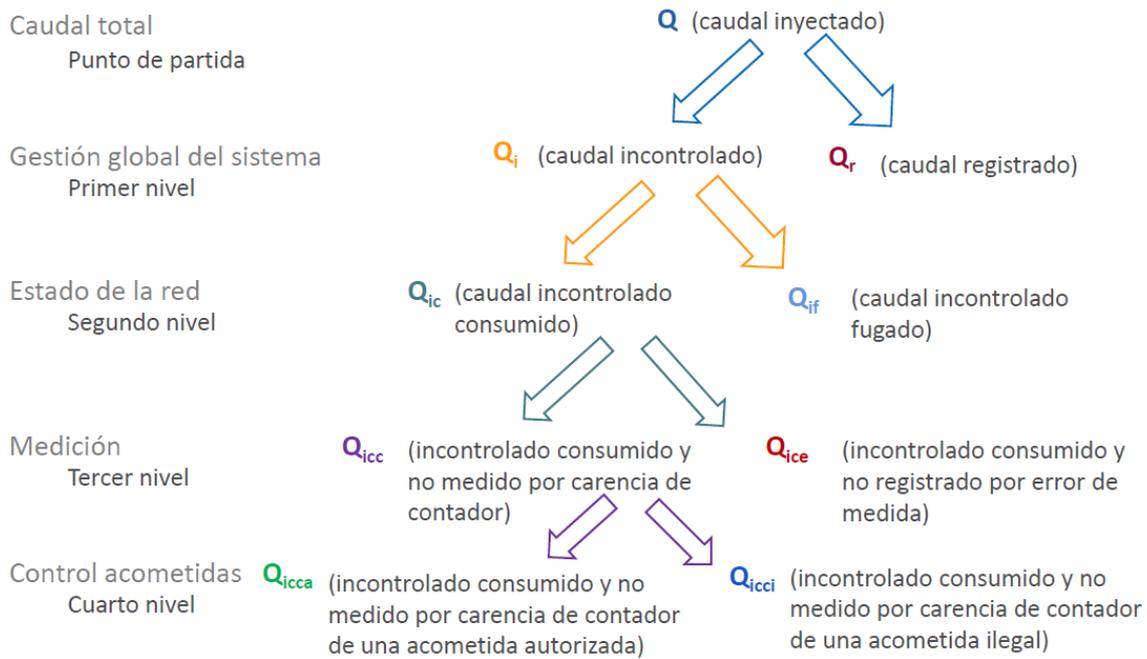


Figura 3-8: Balance hídrico técnico

Los valores asociados al caudal incontrolado de agua en el sistema también deben ser incluidos en la carga del modelo matemático, si se desea que éste refleje la realidad. Por lo tanto, una vez se han introducido los consumos registrados en el modelo, queda introducir el caudal incontrolado.

El primer paso para poder introducir el caudal incontrolado en el modelo es conocer sus dos componentes, es decir, desagrupar las pérdidas aparentes (caudal incontrolado consumido) de las pérdidas reales (caudal incontrolado fugado). El motivo principal de desacoplar ambos caudales es que su comportamiento a lo largo del día es distinto.

Mientras que el consumo incontrolado sigue la misma tendencia que el consumo registrado, ya que se debe a errores en los contadores, robos de agua o usos sin contador, el caudal fugado se comporta prácticamente de forma inversa, ya que es dependiente de la presión, y ésta es mayor cuando el consumo es menor y viceversa.

Por tanto, teniendo en cuenta que el caudal **incontrolado consumido** sigue la misma tendencia que las curvas de modulación, se puede introducir como un incremento de la demanda base del nudo. Por lo tanto, esta nueva demanda base, que estará multiplicada a cada hora por el factor de la curva de modulación contempla el volumen incontrolado consumido asociado a este nudo.

En cambio las **fugas reales** no deben introducirse como un incremento de la demanda base, pues como se ha dicho no tienen la misma evolución temporal sino que dependen de la presión.

Sin entrar en un estudio detallado de desagregación de pérdidas, hecho que podría llevar a realizar otro estudio paralelo, se toma la hipótesis de que el **30%** del caudal no registrado es debido a pérdidas aparentes y el **70%** restante a pérdidas reales, sabiendo que estos valores podrían ser considerablemente diferentes para la red de estudio. No obstante según el último estudio del Observatorio de la Sostenibilidad en España, el 25,9% del agua suministrada a las redes de abastecimiento públicas correspondieron al volumen de Agua No Registrada (ANR), de las cuales, el 17,5% fueron pérdidas reales (fugas, roturas y averías), mientras que el 8,4% lo compusieron errores de medida, fraudes u otras causas (Durán Molina & Moral Fernández, 2015). Es decir, del agua no registrada el 67,5% se refiere a pérdidas reales y el 32,4 a pérdidas aparentes, valores similares a los utilizados para la desagregación de pérdidas de la red de distribución de Picanya.

La desagregación del caudal no registrado en estos dos valores se realiza con la intención de incorporar y representar a través del modelo realizado en EPANET su comportamiento en la red.

Las fugas se pueden simular por medio de emisores en EPANET, siendo estos mecanismos asociados a los nudos que modelizan la descarga de caudal a la atmósfera a través de unos orificios. El caudal de salida varía en cada emisor en proporción a la presión dada en el nudo, siguiendo la ecuación (3-1):

$$Q_f = K \cdot (P)^\gamma \quad \text{con } 0,5 \leq \gamma \leq 2 \quad (3-1)$$

Donde K es el coeficiente del emisor, el cual dependerá del tamaño del orificio, y γ es el exponente del emisor el cual depende básicamente del material de la tubería. En el caso de

tuberías rígidas comúnmente se utiliza un exponente del emisor de 0,5. Sin embargo, en el caso de materiales plásticos, el aumento de la presión da lugar a un incremento de la sección de fuga y una variación del coeficiente de descarga, por lo que se utilizan exponentes próximos a 2.

En el caso a estudiar se tienen tanto tuberías rígidas como plásticas, tal y como se ha visto en el punto 2.3. Como en EPANET únicamente se puede definir desde sus opciones hidráulicas un único exponente del emisor, se ha decidido adoptar un valor de **1,1**.

El cálculo de la K asociado a cada nudo del modelo es un proceso iterativo y nada sencillo, ya que depende de la presión en cada nudo la cual varía a lo largo del día al variar el consumo y otras condiciones de funcionamiento, es por ello por lo que se utiliza el programa ITA fugas para realizar la incorporación al modelo del caudal incontrolado.

Para obtener la K de cada nudo a partir del γ definido y de la presión en el nudo, se realizan varias iteraciones hasta obtener un coeficiente K que cumpla con la expresión (3-1). Esta tarea de arduo trabajo, se realiza rápidamente haciendo uso del software ITAFugas, el cual permite a partir del modelo realizado en EPANET sin fugas cargadas, obtener para cada nudo de consumo el correspondiente K y realizar automáticamente la modelación de las fugas, generando un archivo de EPANET con los emisores cargados.

Las fugas se dan a lo largo de las tuberías, en cambio EPANET sólo permite simularlas como descargas a la atmósfera en los nudos, a través de los emisores. Se puede suponer que el caudal fugado será proporcional a la longitud de tuberías que confluyen en cada nudo, longitud ponderada. Aquí es donde reside la principal dificultad de implementar las fugas en el modelo, en la distribución espacial de éstas. ITAFugas permite repartir automáticamente el caudal fugado a través de los nudos en función de la longitud de tuberías que confluyan en el mismo.

El programa funciona cargando el fichero de EPANET y asignándole una serie de datos del sistema. Como datos de partida, es necesario introducir el volumen facturado y el inyectado mensual, a partir de los cuales se obtiene el volumen incontrolado mensual y el rendimiento volumétrico del sistema.

Por último introduciendo la presión media (en este caso 30 mca) y el exponente del emisor (1,1), el programa calcula un primer coeficiente K a partir del cual comenzará a realizar iteraciones hasta obtener una solución final. En la Figura pueden verse los datos de partida introducidos en el programa para poder realizar el cálculo.

Vol. facturado mensual (m ³ /mes)	64133.25
Vol. inyectado mensual (m ³ /mes)	85840.525
Rendimiento volumétrico	74.71 %
Vol. incontrolado mensual (m ³ /mes)	21707.275

Emitter exponent	1.1	Presión promedio	30
------------------	-----	------------------	----

Long. ponderada automática
 Long. ponderada usuario

Método nudos

% Vol. incontrolado asociado a fugas	70	15195.0925 m ³
% Vol. incontrolado asociado a consumo	30	6512.1825 m ³ /
Kf Inicial	0.14	

Figura 3-9: Datos de partida para la realización del modelo con las fugas incorporadas

La propia aplicación a partir de los datos introducidos creará un nuevo fichero con los nudos y sus correspondientes emisores calculados. De esta manera en cada nudo del modelo, la demanda se corresponde con la suma del caudal registrado, el caudal incontrolado consumido y el caudal fugado.

Con las fugas del sistema implementadas en el modelo se da por concluida la construcción del modelo matemático de la red de distribución de Picanya, únicamente faltará comprobar la bondad de este modelo a través de los resultados que se obtengan una vez se simule su comportamiento.

3.2 Funcionamiento del modelo

Una vez se dispone del modelo final de la red, la siguiente fase a realizar sería la de medición y calibración, destinadas a conseguir que el modelo realizado reproduzca fielmente el

comportamiento real del sistema de distribución. Para ello se debe comparar los resultados obtenidos en el modelo con medidas tomadas en campo y en caso de ser necesario se modificarían algunos de los parámetros para ajustar los resultados a la realidad.

Cuando la finalidad del modelo es operacional, es decir, el modelo se va a utilizar para tomar decisiones en la forma de operar la red es cuando se dedica mayor esfuerzo a esta etapa de calibración.

En esta ocasión únicamente se realizará una comprobación del modelo que sirva para conocer si los resultados que se obtienen son razonables. Esta fase consistirá en detectar los posibles errores y advertencias que muestra EPANET para subsanarlos, así como hacer un reconocimiento de presiones y caudales del modelo que permita identificar resultados anómalos del modelo.

Una vez simulado el sistema, no se tiene ningún mensaje de advertencia de EPANET, por tanto se estudian directamente los resultados aportados por el modelo. En primer lugar se va a comparar el caudal de entrada a la red en el modelo, con el dato de caudal inyectado real. Para ello se analizan los caudales circulantes en el modelo a través de la VRP, representativos del caudal inyectado desde la red básica metropolitana ya que desde el punto de inyección hasta la VRP no se produce ningún consumo.

De esta manera, el caudal que circula por la VRP en el modelo a lo largo del día es de 33 l/s, o lo que es lo mismo se inyecta un volumen en el modelo de **2850,6 m³/día**, mientras que el dato de volumen inyectado facilitado por la empresa suministradora es de 1.030.086 m³/año, es decir, **2822,2 m³/día** lo que representa un error próximo al 1% entre el volumen inyectado en el modelo y en la realidad. Se considera que este error es asumible y que la causa es debida a la carga hidráulica del modelo, donde es probable que no se haya introducido el consumo de algún usuario y por ello el caudal inyectado del modelo sea algo inferior al real.

Según la evolución temporal del caudal circulante a través de la VRP el consumo mínimo de la red se da a las 3:00 h con un caudal de 11,56 l/s, mientras que el pico máximo de consumo se produce a las 11:00 h siendo de 52,61 l/s. En la Figura 3-10 se puede ver la evolución del caudal en la válvula, cuya forma es similar al de la curva de modulación doméstica. Como se ha dicho antes los consumos domésticos representan más del 60% del consumo total del municipio,

por lo que es lógico que el caudal circulante por la red se distribuya siguiendo la forma de la curva de modulación doméstica.

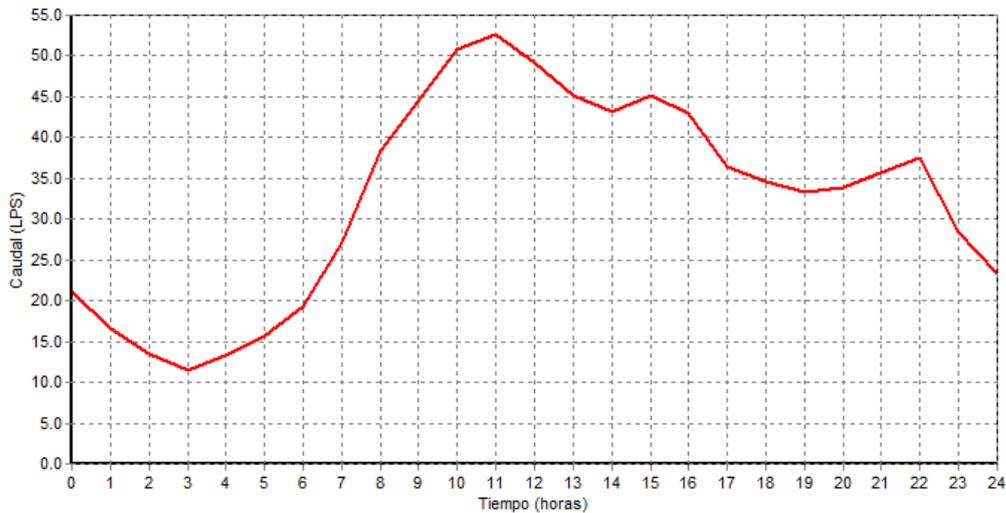


Figura 3-10: Curva de evolución de caudal a través de la VRP

En cuanto a las presiones del modelo, se observa que la presión mínima es de 27,63 mca, dada en el nudo cd2, nudo de mayor cota del modelo (34,02 msnm), a las 00:00 h, instante de máximo consumo del escenario nocturno. Mientras que la presión máxima se encuentra en el nudo d30, nudo de menor cota del modelo (25,27 msnm) con un valor de 46,47 mca en el instante 06:00 h, momento en el que comienza el escenario diurno y que se corresponde con su demanda mínima. Estas presiones parecen lógicas y coherentes, ya que la mínima presión se produce en el nudo de mayor cota de la red, en el momento de máximo consumo nocturno. Mientras que la máxima presión se da en el nudo de menor cota en el momento de mínimo consumo diurno.

Más allá del momento en el que se produzcan estas presiones, se puede extraer que la diferencia entre la presión mínima y máxima del modelo es inferior a 20 mca, un valor considerablemente pequeño y causa de lo plana que es la red. De hecho en el instante de máxima demanda del modelo (11:00 h), la diferencia de presiones entre estos nudos es de tan solo 7,32 mca, teniendo el nudo d30 una presión de 39,2 mca y el nudo cd2 una presión de 31,88 mca. En cambio en el momento de mínima demanda del modelo (03:00 h) la diferencia de presiones máximas son de 8,62 mca, siendo la presión mínima de 28,58 mca en el nudo cd2 y la máxima de 37,2 mca en el nudo d30. En la Figura 3-11 y puede verse la distribución de presiones en la red en el momento de mínima y máxima demanda respectivamente.

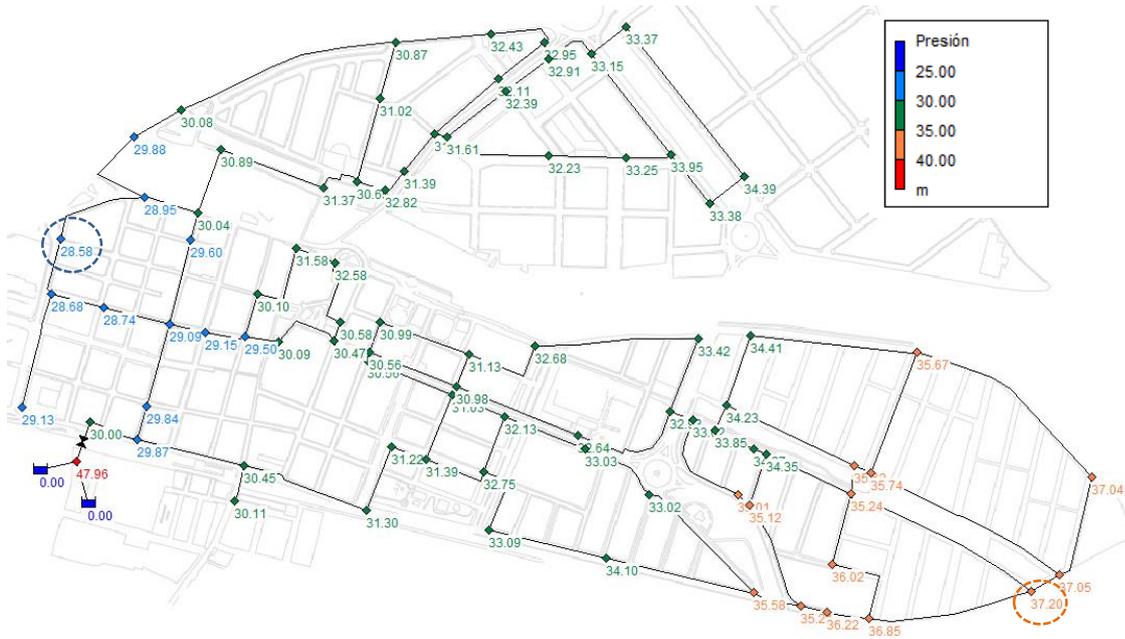


Figura 3-11: Distribución de presiones en el momento de mínimo consumo (3:00h)

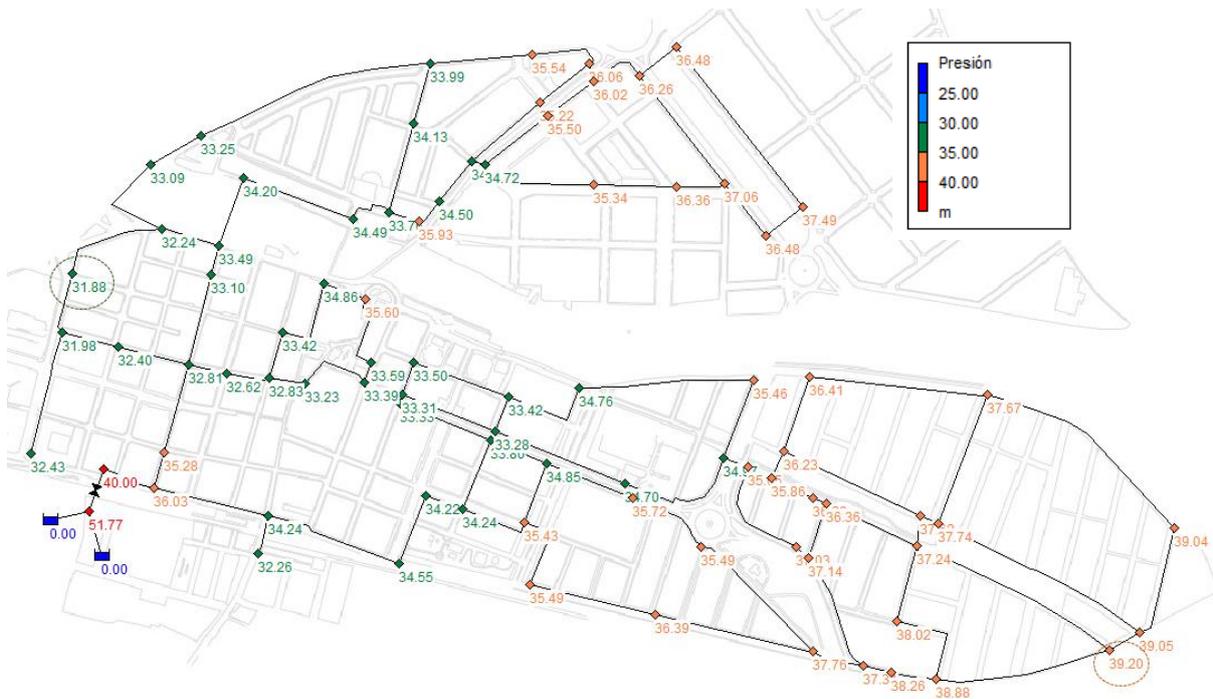


Figura 3-12: Distribución de presiones en el momento de máximo consumo de la red (11:00 h)

Una vez comprobado que el caudal inyectado real y el del modelo son prácticamente iguales, y que los valores de presión de los nudos son coherentes, sin existir ningún valor anómalo, se puede considerar que el modelo es correcto, y que es de utilidad para el objetivo que se ha creado. Por lo tanto, una vez analizado el comportamiento de la red, el siguiente paso será realizar un análisis energético del sistema que permita conocer la distribución de energías en el mismo.

4 ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA

La energía interviene de manera imprescindible en el funcionamiento de una red de distribución de agua. Para conocer de qué manera se aporta y se consume la energía en un sistema, es conveniente realizar la auditoría energética del mismo (Cabrera et al., 2010). Esto permitirá estimar su capacidad de mejora energética.

Para realizar la auditoría energética se aplica la ecuación de la energía a un volumen de control limitado por una superficie atravesada por flujos hídricos y energéticos conocidos, de tal forma que se cumpla el balance energético del sistema: toda la energía que entra en el volumen de control debe ser igual a la energía que sale de éste.

En este capítulo se presentará la herramienta ITAenergy como software para realizar la auditoría energética de la red a partir del modelo definido en el capítulo anterior, explicando cada paso realizado con el objetivo de conocer el destino final de la energía que se introduce en el sistema.

Una vez conocidos los consumos energéticos del sistema estudiado, se analizan diferentes medidas para mejorar la eficiencia del mismo, proponiendo una serie de estrategias que contribuyan a reducir o recuperar la energía que requiere el sistema para su correcto funcionamiento

4.1 El software ITAenergy

Para realizar el análisis energético de la red de distribución de Picanya, se hará uso de la herramienta ITAenergy (ITA, 2016). Esta herramienta permite realizar la auditoría energética de la red a partir del modelo matemático realizado en EPANET, mostrando de qué forma se distribuye la energía total consumida por el sistema.

De esta manera, una vez conocido cómo se consume la energía en la red, según sea:

- Energía entregada a los usuarios
- Energía disipada por fricción
- Energía disipada en las válvulas
- Energía perdida a través de las fugas

Se podrán obtener conclusiones del funcionamiento del sistemas desde el punto de vista energético, con el objetivo de servir de ayuda a la toma de decisiones sobre cuál es la mejor manera de actuar para mejorar la eficiencia energética.

Para comenzar con la auditoría energética de la red, debemos indicar la presión de referencia del sistema, que no es más que la presión que se debe garantizar en los puntos de consumo. Según se ha visto en el apartado 2.3, se puede extraer de la Normativa de Suministro de Agua del municipio que la presión mínima de suministro debe ser de 27 mca, estando este dato respaldado, tal cual se ha visto, por la norma alemana W-403, por lo tanto será dicho valor el que se escoja como presión de referencia del sistema (Figura 4-1).

Duración simulación

Horas

Dias

Intervalo de cálculo: Cada minuto

Presión de referencia: 27

Figura 4-1. Selección de los parámetros de cálculo para la realización de la auditoría.

Una vez definida la presión de referencia y cargado el modelo matemático de la red, el programa permite realizar el cálculo energético del sistema. Los primeros resultados que ofrece el cálculo son la presión mínima, media y máxima de la red (Figura 4-2). Además, si no se cumple la presión de referencia en todos los instantes aparece un aviso, en este caso esto no sucede ya que la presión mínima (27,6 mca) es superior a la presión de referencia (27 mca).

Presión mínima	27.6	mca	Energía por m3 inyectado	0.161	kWh/m3
Presión media	37.0	mca	Energía por m3 consumido	0.208	kWh/m3
Presión máxima	51.9	mca			

Figura 4-2: Primeros resultados del cálculo energético

Los valores de presión permiten obtener una idea de la distribución de presiones a lo largo del día en la red. De esta forma, con un simple vistazo, se puede observar cómo la presión media

es más cercana a la presión mínima que a la presión máxima, o que la diferencia entre la presión mínima y máxima, es únicamente de 25 mca.

Esta distribución de presiones, tan homogénea a lo largo del día y de la red, se debe principalmente a que no existen grandes desniveles, por lo que la variación únicamente es consecuencia de las variaciones temporales de la demanda.

Junto con los valores de presión, se ofrecen dos indicadores energéticos básicos (Figura 4-2), que permitirán, sin entrar en detalles, valorar energéticamente el sistema. Se trata de la energía por m³ inyectado, calculada dividiendo la energía total inyectada al sistema entre el volumen de agua inyectado ($460,368 \text{ kWh} / 2.850,639 \text{ m}^3 = 0,161 \text{ kWh/m}^3$); y de la energía por m³ consumido, calculada al dividir el total de energía consumida entre el volumen de agua consumido ($460,368 \text{ kWh} / 2.211,823 \text{ m}^3 = 0,208 \text{ kWh/m}^3$).

La energía necesaria para elevar 100 metros un volumen de agua de 1 m³ es exactamente 0,2725 kWh/m³. En el caso de abastecimientos que cuenten con sistemas de bombeo, éste es un indicador clave para conocer el estado del sistema desde un punto de vista energético. De hecho, suponiendo una ineficiencia global (principalmente de la bomba y el motor eléctrico) de 0,7, un valor razonable de energía consumida sería aproximadamente 0,4 kWh/m³ ($0,2725/0,7$). Por tanto este indicador global, sin entrar todavía en detalles de la procedencia o destino de la energía, permite hacer un primer diagnóstico del sistema.

4.2 Balance hídrico

Los siguientes resultados que ofrece el programa se muestran en tres tablas diferentes. La primera de ellas se corresponde con el balance hídrico realizado a partir de la simulación del modelo matemático. Este balance hídrico muestra los volúmenes de agua que entran y salen de la red, Tabla 4-1:

Tabla 4-1: Balance hídrico del sistema

VOLÚMENES m3/día	
Volúmenes del sistema	
Volumen inyectado total	2,850.639 m3
Volumen inyectado embalse 1	2,519.050 m3
Volumen inyectado embalse 2	331.589 m3
Volumen consumido	2,211.823 m3
Volumen fugado	638.815 m3

El **volumen inyectado total** es el volumen que se introduce en la red. En el caso estudiado, el software toma como fuente dos embalses diferentes, aunque únicamente existe una entrada de agua. Esto es debido a que el embalse 1 modela las condiciones de entrada en el escenario diurno, y el embalse 2 las del escenario nocturno. De esta manera se concluye que el volumen inyectado durante el día es de 2519,050 m³/día, mientras que por la noche es de 331,589 m³/día, existiendo un volumen inyectado total a lo largo del día de 2850,639 m³.

El **volumen consumido** hace referencia al volumen que se entrega a los nudos de consumo, es decir, este volumen incluye el volumen registrado y el volumen relacionado con las pérdidas aparentes, ya que el caudal incontrolado consumido se ha distribuido en el modelo entre los nudos, aumentando la demanda base de éstos. De esta manera el volumen consumido en el caso estudiado es de 2211,823 m³/día.

Por último, el **volumen fugado** es el volumen que escapa de la red a través de los emisores que se han definido en el modelo. Los emisores se incorporan al modelo con la intención de representar las pérdidas reales de la red, por lo tanto este volumen representa el volumen fugado real, siendo para este caso de 638,815 m³/día.

Se puede comprobar como todos estos volúmenes coinciden con los del modelo realizado en EPANET, que a su vez se aproximan con un error menor del 1% con los datos reales que se tienen del sistema y que han sido explicados en el punto 2.2.

La segunda tabla que arroja el programa muestra dos indicadores representativos del estado del sistema (Tabla 4-2).

Tabla 4-2: Indicadores representativos del estado del sistema

Indicadores del sistema	
Rendimiento volumétrico	77.59%
Fugas por unidad de longitud	2.123 m ³ /km h

El primero de ellos es el **rendimiento volumétrico**, η_s , el cual se calcula como el cociente entre el total del volumen consumido y el total del volumen inyectado, siendo para este caso de estudio del 77,59%, ecuación (4-1). Cuanto mayor sea este valor, mejor será el estado de la red desde el punto de vista de las fugas.

$$\eta_s = \frac{2211,823 \text{ m}^3}{2850,639 \text{ m}^3} = 77,59 \% \quad (4-1)$$

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

Tabla 4-3: Calificación de la gestión de un abastecimiento en función de η_s

Rango	Calificación
$\eta_s > 0,9$	Excelente
$0,8 < \eta_s < 0,9$	Muy bueno
$0,7 < \eta_s < 0,8$	Bueno
$0,6 < \eta_s < 0,7$	Regular
$0,5 < \eta_s < 0,6$	Malo
$0,5 < \eta_s$	Inaceptable

Según los valores mostrados en la Tabla 4-3 se puede considerar que el estado de la red de distribución de Picanya es bueno.

El segundo indicador mostrado son las **fugas por unidad de longitud**, este indicador se calcula a partir del volumen fugado, de las longitudes de las tuberías del modelo y del tiempo de simulación. Siendo para este caso de 2.123 m³/km·h calculado como muestra la ecuación (4-2).

$$\frac{638.815 \text{ m}^3}{12.535 \text{ km} \cdot \text{día}} \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 2123 \text{ m}^3/\text{kmh} \quad (4-2)$$

Por último, en la pestaña del balance hídrico se muestra el error cometido en el balance volumétrico (Tabla 4-4):

Tabla 4-4: Error en el balance volumétrico

Error	
Error en el balance volumétrico	0.00 %

Este error es un error porcentual obtenido del balance realizado entre el volumen de entrada al sistema y el de salida, es decir, si el error es diferente al 0% significa que el volumen inyectado es diferente a la suma del volumen consumido y fugado. En esta ocasión al coincidir el volumen de entrada al sistema con el de salida, el error es del 0%. Este error suele existir .cuando existen depósitos en la red, pues el paso hidráulico no necesariamente debe coincidir

con el intervalo de cálculo, es decir el instante en que el depósito se llena o se vacía no siempre va de la mano con el instante de cálculo. Cuando estos elementos no existen, como es este caso, el error debe ser cero.

4.3 Auditoría energética

Una vez analizada la primera pestaña de resultados correspondientes al balance hídrico realizado, el software muestra una segunda pestaña con los resultados de la auditoría energética, dividiendo las energías en dos apartados: energía total aportada y energía total consumida.

Siendo las energías aportadas aquellas energías entrantes al volumen de control definido para aplicar la ecuación de la energía, y las energías consumidas las salientes de dicho volumen de control.

En la Figura 4-3 puede verse un esquema de las energías entrantes y salientes en la red de distribución de Picanya, más adelante se explican cada una de las energías ilustradas.

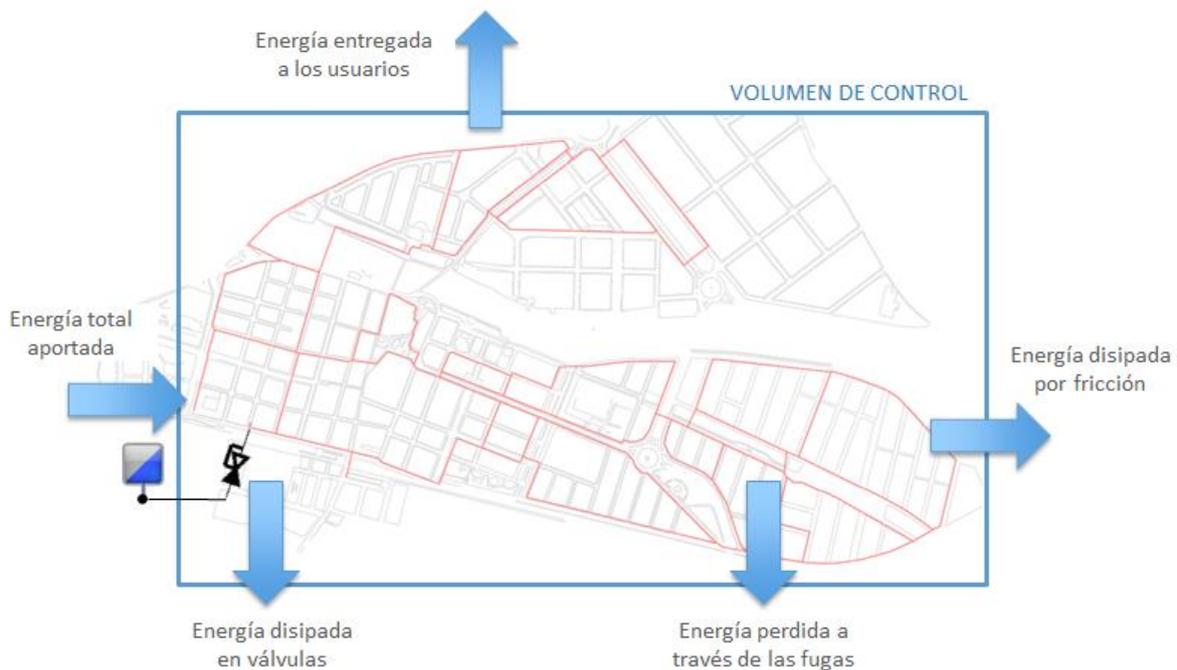


Figura 4-3: Esquema de las energías entrantes y salientes en la red

4.3.1 Energía total aportada

La energía total aportada hace referencia a la energía total que se inyecta en el sistema, siendo suma de la energía consumida por las bombas y la energía aportada de forma natural. En el caso que se está estudiando la energía inyectada viene impuesta por la red básica

metropolitana, estando representada en el modelo mediante dos embalses encargados de establecer las presiones de entrada para el escenario diurno y nocturno. Por lo tanto, no existe energía consumida por las bombas, siendo toda la energía suministrada en el modelo por los embalses, y en la realidad por la red básica metropolitana.

Si existe más de un embalse, la energía aportada se divide por cada uno de ellos. En este caso, al ser representados los escenarios diurno y nocturno por dos embalses, queda reflejada la energía aportada durante el día y durante la noche, siendo de 410,011 kWh y 50,356 kWh respectivamente, representando el 89,06% y el 10,94% de la energía total aportada, respectivamente (Tabla 4-5).

Tabla 4-5: Energías entrantes al sistema

ENERGÍAS kWh/día	
Energía total aportada	460.368 kWh
Energía natural	460.368 kWh (100.00%)
Energía del embalse 1	410.011 kWh (89.06%)
Energía del embalse 2	50.356 kWh (10.94%)

Aunque los resultados han sido realizados con la ayuda del software, en el Anejo 3 queda explicado cómo se realiza el cálculo de cada una de las energías, tanto de las aportadas como de las consumidas.

4.3.2 Energía total consumida

La energía total consumida, es aquella que engloba todas las energías salientes de la red. Esta energía se divide en cuatro energías diferentes que se explican a continuación, y cuyos valores para la red estudiada pueden verse en la Tabla 4-6:

Tabla 4-6: Energías salientes del sistema

ENERGÍAS kWh/día	
Energía total consumida	460.368 kWh
Energía entregada a los usuarios	254.284 kWh (55.23%)
Energía mínima requerida	198.629 kWh (78.11%)
Energía topográfica	16.844 kWh (6.62%)
Energía de exceso	38.811 kWh (15.26%)
Energía disipada por fricción	35.474 kWh (7.71%)
Energía disipada en las válvulas	97.284 kWh (21.13%)
Energía perdida a través de las fugas	73.326 kWh (15.93%)

Energía entregada a los usuarios: esta energía hace referencia a la energía que se entrega en los nudos de consumo del modelo, consecuencia del caudal que se entrega a los usuarios a la presión a la que se suministra.

Esta energía entregada a los usuarios (E_{sr}) es la suma de la energía mínima requerida (E_{uo}), la energía topográfica real (E_{tr}) y la energía de exceso real (E_{er}) (Cabrera, et al., 2015), conceptos que quedan explicados gráficamente en la Figura 4-4. De esta forma la energía útil entregada a los usuarios será la que muestra la ecuación (4-3):

$$E_{sr} = E_{uo} + E_{tr} + E_{er} \quad (4-3)$$

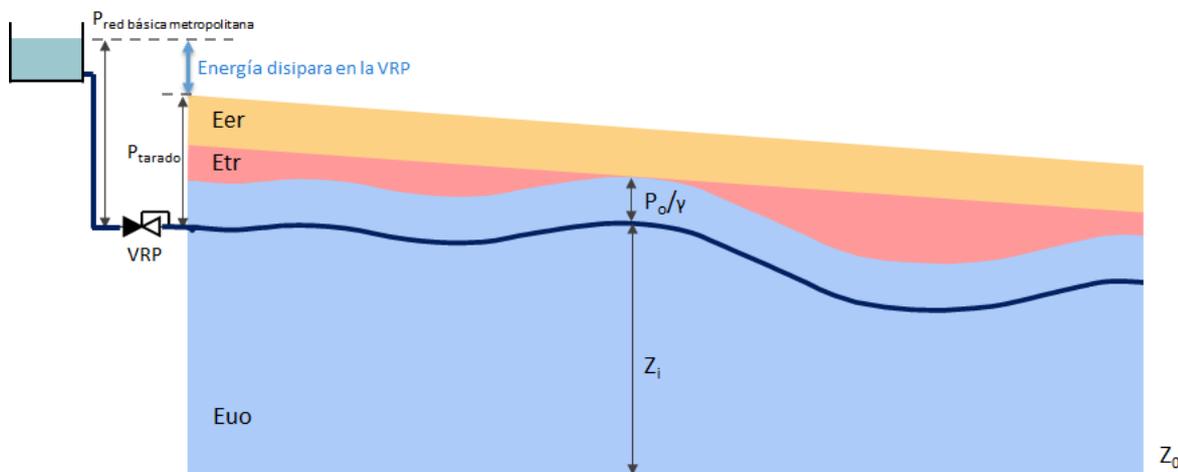


Figura 4-4: Esquema de energías entregadas a los usuarios

- La energía mínima requerida (E_{uo}) es aquella que debe suministrarse a los nudos de consumo para cumplir con la presión de referencia (P_o/γ) y el volumen demandado,
- La energía topográfica (E_{tr}) es un término energético que el sistema está obligado a entregar debido a las irregularidades del terreno. Representa la energía que se debe aportar para alcanzar la cota del nudo crítico, viéndose afectados el resto de nudos de consumo de menor cota, ya que para que el nudo más alto tenga presión el resto de nudos del sistema tendrán sobrepresión. En una red plana la energía topográfica sería 0.
- Por último, la energía de exceso (E_{er}) completa la energía suministrada a los usuarios, siendo aquella que se suministra por encima de la energía mínima requerida en el nudo crítico y por tanto en el resto de nudos. Este exceso de energía se debe a que se suministra más altura que la mínima necesaria para garantizar en el nudo crítico la presión mínima.

La suma de estos tres términos, se considera energía útil pues se entrega a los usuarios en forma de presión, y no es una pérdida, pero aquel caudal que se entrega a los usuarios por encima de la presión de referencia, es un exceso, pues no se requiere en cuanto a la garantía de suministro ese exceso de presión. La diferencia entre ambos términos reside en que el primero de ellos suele ser inevitable (la topografía de la red exige suministrar la altura piezométrica del nudo más desfavorable, más las pérdidas hasta llegar a él), pero el segundo de ellos es un exceso, pues implica que incluso en el nudo más crítico se está suministrando más presión de la necesaria.

En el caso estudiado el 78,11% de la energía entregada a los usuarios corresponde a la energía mínima requerida, mientras que la energía topográfica representa el 6,62% y el exceso de energía el 15,26%. Esto no quiere decir que la energía de exceso sea en todo momento del 15,26%, analizando los resultados de presiones del modelo, se observa como el nudo "cd2" es el nudo crítico de la red en todo momento, coincidiendo con el punto de mayor cota. Por lo tanto, la presión en este nudo debería ser en todo momento igual a la presión de referencia para que no existiera energía de exceso. En cambio se observa como en el momento de mínimo consumo de la red (3:00 h) la presión en este nudo es de 28,58 mca, mientras que la presión mínima requerida es de 27 mca, es decir, existe una presión de exceso de 1,58 mca que se traduce en una energía de exceso. Por otro lado en el momento de máximo consumo (11:00 h) la presión en el nudo "cd2" es de 31,88 mca, existiendo de esta manera una presión de exceso en este nudo de 4,88 mca. Esto quiere decir que en este instante existirá una mayor energía de exceso, como puede verse gráficamente en la Figura 4-5:

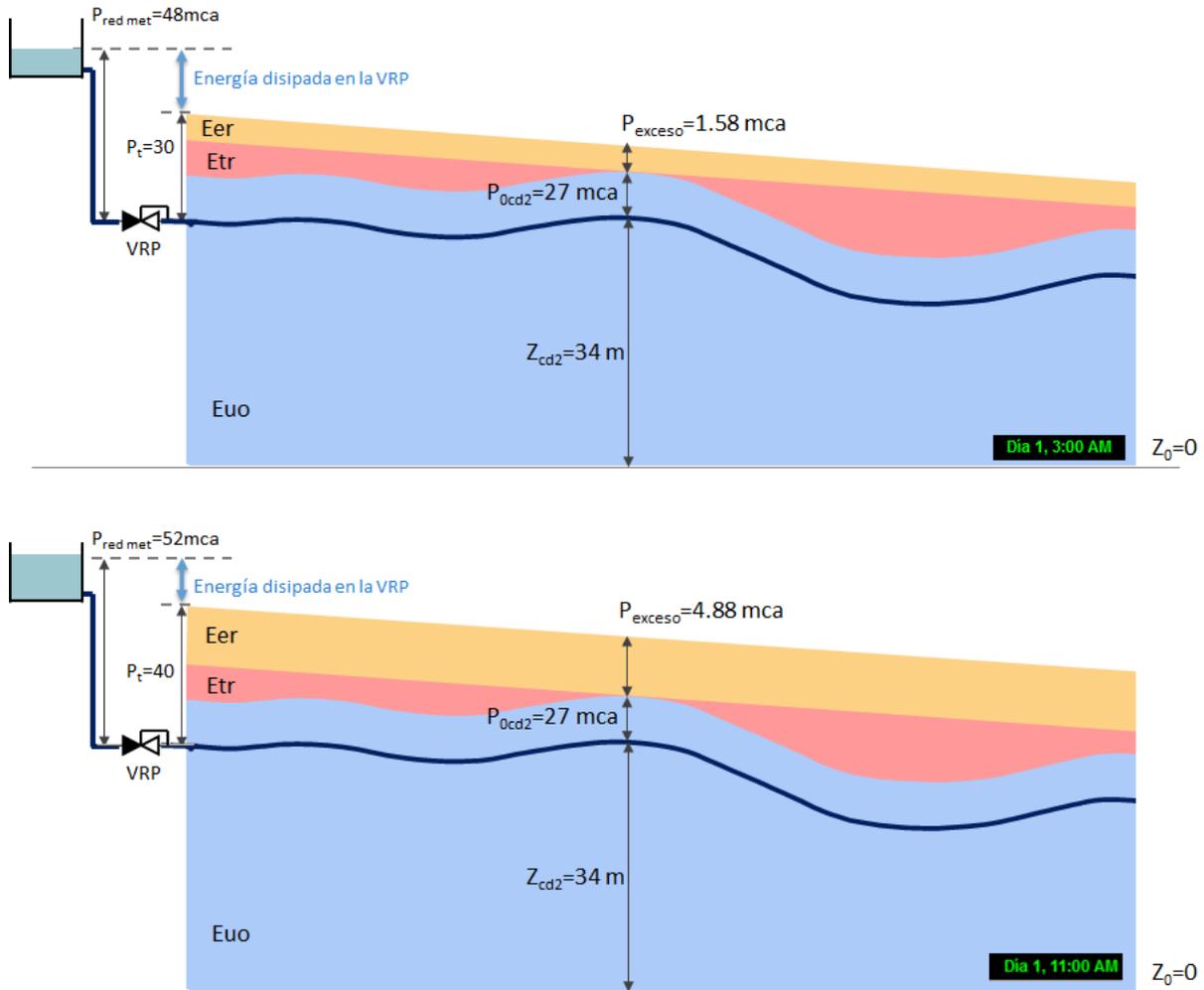


Figura 4-5: Energía entregada a los usuarios en el momento de mínimo y máximo consumo

Es lógico que la energía topográfica represente un porcentaje tan bajo debido a lo plana que resulta la red. En cuanto al exceso de energía, como se ha visto en la figura anterior, se debe a que el tarado de la válvula reductora de presión es superior al necesario para cumplir la presión mínima en el nudo crítico. Una de las posibilidades para mejorar este exceso de energía sería adaptar en cada instante el tarado de la válvula reductora de presión a los requerimientos de presión mínima en el nudo crítico, de hecho en el supuesto de poder dar una consigna a la válvula tal que permita que en el nudo crítico de la red se dé en todo momento la presión de referencia, este exceso de energía desaparecería.

Energía disipada por fricción: es la energía que se disipa por el rozamiento del agua con las tuberías del sistema. En este caso representa el 7,71% de la energía total consumida.

La energía perdida por fricción en las tuberías depende directamente de las pérdidas de carga que se den en ella, que son función del diámetro de la tubería, del material y del caudal que circula por la tubería.

Energía disipada en las válvulas: Ésta se debe a las pérdidas de carga que se da en los diferentes elementos que pueden aparecer en el sistema. En este caso representa las pérdidas que se dan en la válvula reductora de presión, siendo el 21,13% del total de la energía consumida.

Energía perdida a través de las fugas: Representa la energía que se pierde a través de las fugas, dependiendo su valor de la modelación matemática realizada de la red. De esta manera los modelos matemáticos que no tengan implementadas las fugas del sistema a través de emisores, obtendrán una energía perdida por fugas igual a cero, que no representará la realidad del sistema. En cambio al modelar las fugas de la red a través del coeficiente emisor introducido en el modelo, el software permite obtener la energía perdida a través de las fugas, las cuales se concentran en los nudos y cuyo valor dependerá de la presión. En esta ocasión las fugas representan una pérdida de energía del 15,93% del total de energía consumida.

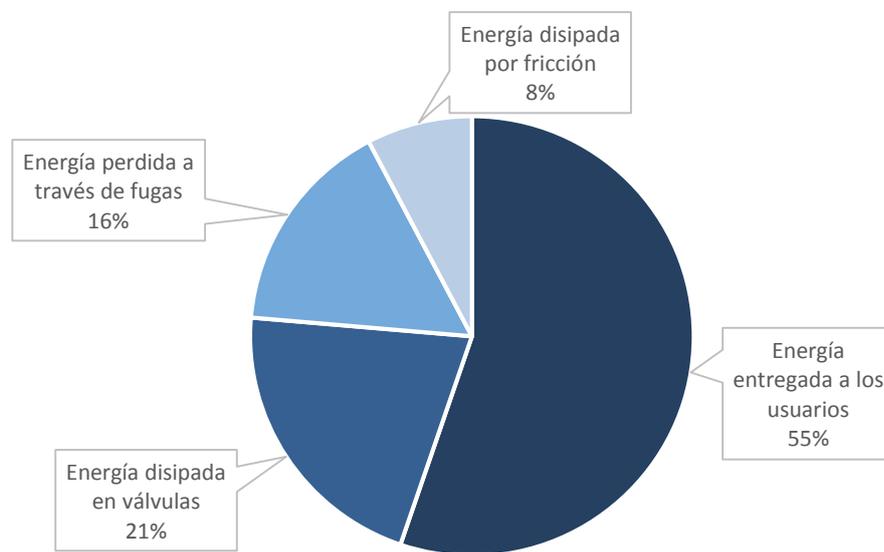


Figura 4-6: Energías consumidas en el sistema

4.4 Conclusiones de la auditoría energética

Tras el desglose de los términos que nos aporta la auditoría energética, se concluye que al sistema estudiado se le aporta una energía que viene establecida por la red básica metropolitana, esta energía será fija e igual a la suma de la energía entregada a los usuarios, la pérdida por fricción en las tuberías, la pérdida en fugas y la pérdida en la válvula reductora de presión. Esta igualdad es invariable debido al balance de energías que debe cumplirse, por lo tanto para mejorar la eficiencia energética del sistema deberemos intentar modificar los porcentajes que componen el término de energía total consumida, de manera que se aumente la energía entregada a los usuarios y se reduzca las energías perdidas por fricción, válvulas y fugas. A continuación se exponen diferentes medidas que pueden ayudar a mejorar la eficiencia energética, actuando directa e indirectamente sobre estas energías.

Para reducir las pérdidas por fricción, debe realizarse un adecuado mantenimiento de las tuberías, de forma que la rugosidad no aumente excesivamente con el tiempo. Las incrustaciones en las paredes internas del tubo, y el propio deterioro debido a la edad, harán aumentar las pérdidas de carga por fricción. Estas pérdidas representan tan solo el 7,71% de la energía total consumida, por lo que a priori no parece lógico centrar los esfuerzos de mejora en este aspecto.

En cambio, las fugas representan aproximadamente el 16% del total de energía consumida, este dato permite plantearse la posibilidad de actuar sobre esta variable a la hora de mejorar la eficiencia energética de la red.

Hay que pensar que una fuga conlleva que se detraiga más agua del medio natural que la necesaria y que se consuma una energía extra, ya que el agua fugada también debe ser tratada, y suministrada, es decir, cuando el agua se pierde por fugas se lleva consigo la energía necesaria para transportar dicha agua hasta el punto en que se ha perdido, e incluso, el tratamiento que se le ha aplicado. (Grupo Aguas de Valencia; ITA, 2016).

Además, cuanto mayor caudal circula por las tuberías, mayores son las pérdidas de carga que se producen por fricción, por tanto la reducción de las fugas contribuye indirectamente a la reducción de las pérdidas de energía por fricción.

La presión es un factor fundamental en las fugas, cuanto mayor es la presión en una tubería, mayor es el agua que escapa a través de sus fugas, por este motivo una de las estrategias más extendidas para la reducción de fugas es la gestión de la presión.

Las válvulas reductoras de presión tienen como objetivo limitar las presiones en la red, por lo tanto una opción para reducir las pérdidas por fugas es situar diferentes válvulas reductoras a lo largo de toda la red de distribución, de manera que permitan aproximar la presión de los nudos de consumo a la presión de servicio, de esta manera además de la energía perdida a través de fugas, también se verá reducida la energía topográfica, a costa de aumentar la energía perdida en válvulas.

Considerando que las presiones en la red no son demasiado elevadas, esta alternativa para aumentar la eficiencia energética no parece ser la adecuada.

Sin embargo siempre es interesante tener presente la importancia de realizar un control activo de fugas que permita minimizar el tiempo que la fuga está activa, localizándolas cuanto antes para repararlas en el menor tiempo posible, así como una correcta gestión de la infraestructura que permita la rehabilitación y/o renovación de las tuberías que más problemas pueden causar, según un análisis multicriterio. Estas actuaciones, además de mejorar la energía perdida por fugas, permitirán mejorar la energía perdida por fricción.

Como se ha dicho antes, la VRP es la encargada de reducir las presiones en la cabecera del municipio, representando el 21,13% de la energía total perdida en la red. Existe un margen de mejora en su actual tarado establecido que podría reducir este valor, pero es indudable que aunque se reduzca al mínimo las pérdidas introducidas por la VRP, en todo momento va a existir un cierto grado de disipación de energía, que va a ser inevitable.

Es por esta razón por la que se plantea la instalación de bombas trabajando como turbinas (PAT) que permitan recuperar parte de la energía disipada en la VRP, ya que la eliminación por completo de esta válvula haría aumentar la presión del sistema, aumentando las fugas y la energía perdida por fricción, y existiendo una gran incertidumbre sobre el correcto funcionamiento de la red de distribución del municipio.

En conclusión, de las diferentes opciones que se plantean para mejorar la eficiencia energética del sistema se apuesta por una revisión del tarado de la válvula reductora de presión que

permita disminuir la energía de exceso, así como las fugas e indirectamente la energía perdida por fricción.

Esta medida deberá complementarse con un control activo de fugas y con una correcta gestión de la infraestructura que permita conocer el verdadero estado de la red, con el objetivo de renovar o rehabilitar aquellos tubos que nos permitan una mayor mejora de la energía útil entregada a los usuarios, a costa de reducir las fugas y la energía perdida por fricción.

Por último, se plantea la posibilidad de instalar una PAT que permita recuperar parte de la energía disipada en la VRP. Conocido que más de la quinta parte de la energía perdida en la red de distribución de Picanya es causa de esta VRP, y entendiendo esta alternativa como una de las que mejor resultado puede dar a la hora de mejorar la eficiencia energética de este sistema, se dedicarán los próximos capítulos de este estudio a explicar y analizar el proceso llevado a cabo para seleccionar e instalar aquella bomba que permita recuperar la máxima cantidad de energía, sin comprometer la presión de servicio en los nudos de consumo aguas abajo de la instalación. Para ello se hará uso del software ALLIEVI, el cual permitirá simular la recuperación de energía que se puede llevar a cabo en la red con la PAT instalada.

5 MODELACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Una vez realizada la auditoría energética de la red, con la que se concluye que recuperar la energía disipada en la válvula reductora de presión mediante una bomba trabajando como turbina es una de las medidas más acertadas para mejorar la eficiencia energética del sistema, se utilizará el software ALLIEVI para simular dicha recuperación de energía.

Para ello, en este capítulo se hablará en primer lugar del modelo realizado con ALLIEVI, así como de las características particulares que se han tenido en cuenta en los principales elementos hidráulicos que constituyen la red de distribución, exponiendo las diferentes etapas que se han ido realizando hasta finalizar por completo el modelo.

Una vez definido el modelo, se realizan una serie de hipótesis que permiten definir un punto óptimo estimado de funcionamiento de la bomba, requerimiento indispensable del software para poder trabajar con las curvas universales de Suter y realizar simulaciones del sistema. Tras obtener este punto óptimo de funcionamiento que permite recuperar una cierta energía en el sistema, el esfuerzo de este capítulo se centra en mejorar dicho punto con el objetivo de recuperar la mayor energía posible. Una vez encontrado un punto óptimo de funcionamiento de la bomba que permite conseguir la máxima recuperación de energía teórica de la red de distribución, se buscan curvas características de bombas reales cuyo punto de funcionamiento óptimo sea similar al encontrado de manera teórica. De esta manera se pretende encontrar una bomba real que se pueda instalar en la red, proporcionando una recuperación de energía lo más alta posible.

5.1 Modelo de la red con ALLIEVI

El software ALLIEVI permite importar redes hidráulicas desde EPANET, de esta manera no es necesario volver a crear el modelo de la red desde cero sino que basta con importar el que se ha creado anteriormente con EPANET. Además ALLIEVI no solo importa el esquema de la red, sino también los datos de la misma. Sin embargo, existen elementos que son incompatibles entre ambos programas (ITA, 2015), por ello es necesario revisar los datos y elementos importados, de forma que se localicen posibles incompatibilidades para poder ser corregidas.

En este caso además del esquema de la red, los datos importados correctamente son las cotas de los nudos y los diámetros, longitudes y rugosidad de las tuberías. Además también se importa la válvula reductora de presión y los dos embalses encargados de simular la fuente

de suministro del sistema, pero sus datos no son correctos por lo que se decide eliminarlos para crearlos de nuevo. Tras importar el modelo de EPANET a ALLIEVI el aspecto primario del modelo es el que aparece en la Figura 5-1.

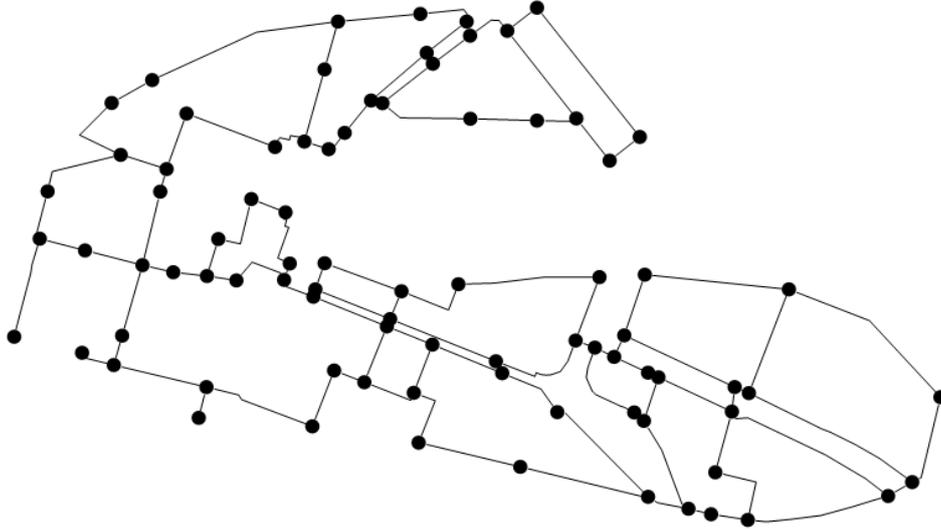


Figura 5-1: Esquema primario de la red con ALLIEVI

Una vez creado el esquema primario de trabajo con ALLIEVI, el siguiente paso será completar los datos de las tuberías requeridos por el programa y realizar la asignación de demandas de cada nudo. Como último paso antes de simular la red se modelará la fuente de suministro del sistema. Una vez completado el modelo se simula el régimen transitorio del mismo, para analizar su comportamiento y comparar algunos de los resultados obtenidos con los resultados del modelo realizado en EPANET.

5.1.1 Tuberías del modelo

Para completar las características de las tuberías del modelo, es necesario introducir la celeridad de onda en cada una de las conducciones. Esta celeridad depende del material del tubo, como se ha dicho en el punto 2.3 de este documento los materiales utilizados por estas tuberías son fibrocemento, polietileno de alta densidad y PVC. Se ha decidido utilizar un valor de 860 m/s como celeridad para las tuberías de fibrocemento, mientras que tanto para el polietileno como para el PVC se utiliza una celeridad de 400 m/s, extensamente utilizada en materiales plásticos como éstos.

Haciendo uso del plano de diámetros y materiales que puede consultarse en el Anejo 1 se asigna a cada tubería del modelo su correspondiente celeridad en función del material que utilice. Con esto quedan caracterizadas todas las tuberías del modelo.

5.1.2 Asignación de demandas

Para realizar la asignación de demandas de cada uno de los nudos de consumo del modelo, se utilizan las llamadas leyes de caudal de ALLIEVI, las cuales imponen una salida de caudal determinada por el nudo correspondiente (ITA, 2015). Los caudales del modelo en ALLIEVI no llevan incorporadas las fugas, es decir, se simulan solamente los caudales demandados por la población que son los que realmente interesan y se van a dar en todo momento, ya que tanto las pérdidas aparentes o reales se podrían ver modificadas ante la decisión de llevar a cabo políticas que permitan reducirlas.

En este caso se definen las leyes de caudal por tabla, esto permite imponer diferentes caudales de salida por el mismo nudo en función del tiempo. Por lo tanto para cada nudo de consumo se ha multiplicado su demanda base por el coeficiente multiplicador de la curva de modulación asociada en EPANET, de tal manera que se obtienen los consumos producidos por el nudo para cada hora.

Como se ha explicado en el punto 3.1 de este documento, existen nudos a los que se les ha asignado dos curvas de modulación diferentes, debido a que recogen consumos de diferentes usos. Esto quiere decir que en un mismo instante se pueden tener dos tipos de consumo diferentes. Como ALLIEVI tan solo permite aplicar un caudal consumido por cada tiempo definido en la ley de caudales, se agruparán los consumos de aquellos nudos en los que coincidan dos consumos diferentes. Para ello se multiplica la demanda base de cada uno de los consumos por su correspondiente curva de modulación, y después se suma el resultado obtenido en cada hora.

A modo de ejemplo se expone el cálculo del nudo “pd1”, el cual engloba el consumo debido a la demanda doméstica y el debido al uso deportivo como puede verse en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Demanda base del nudo “pd1”

	Demanda base (l/s)
Uso doméstico	0,166
Uso deportivo	0,042
Total	0,208

Multiplicando la demanda base de cada uso por los respectivos coeficientes de las curvas de modulación se obtiene el consumo de cada uso en cada hora del día. Por último para definir

la demanda a introducir en las leyes de caudal se suma la demanda referida al uso doméstico y la referida al uso deportivo, como puede verse en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Cálculo de las demandas a introducir en la ley de caudal del nudo "pd1"

Tiempo (s)	Coef. uso doméstico	Coef. uso deportivo	Demanda doméstica	Demanda deportiva	Demanda total
0	1,17	-	0,194	-	0,194
3600	0,84	-	0,139	-	0,139
7200	0,54	-	0,090	-	0,090
10800	0,34	-	0,056	-	0,056
14400	0,22	-	0,037	-	0,037
18000	0,12	1,20	0,020	0,05	0,020
21600	0,10	1,50	0,017	0,06	0,067
25200	0,12	1,60	0,020	0,07	0,083
28800	0,41	1,60	0,068	0,07	0,135
32400	0,98	1,60	0,163	0,07	0,230
36000	1,38	1,70	0,229	0,07	0,296
39600	1,79	1,70	0,297	0,07	0,369
43200	1,86	1,60	0,309	0,07	0,380
46800	1,59	1,60	0,264	0,07	0,331
50400	1,32	0,20	0,219	0,01	0,286
54000	1,39	0,20	0,231	0,01	0,239
57600	1,59	0,50	0,264	0,02	0,272
61200	1,48	1,20	0,246	0,05	0,267
64800	1,19	1,50	0,198	0,06	0,248
68400	1,05	1,50	0,174	0,06	0,237
72000	0,97	1,20	0,161	0,05	0,224
75600	1,02	0,50	0,169	0,02	0,220
79200	1,19	-	0,198	-	0,219
82800	1,34	-	0,222	-	0,222
86400	1,17	-	0,194	-	0,194

En la Figura 5-2 se puede ver gráficamente como la suma de ambas demandas genera el consumo total del nudo, que finalmente será el introducido en la correspondiente ley de caudal.

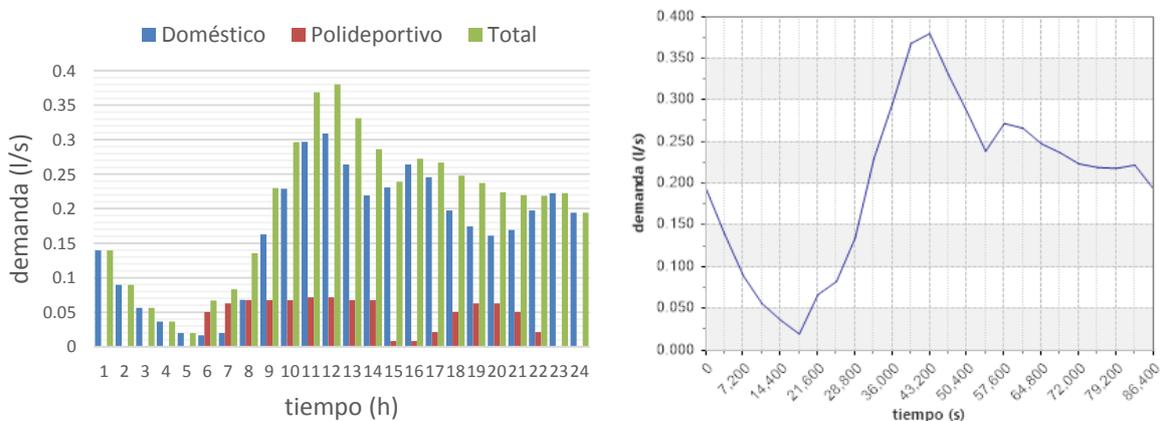


Figura 5-2: Ley de caudal asignada al nudo "pd1"

Una vez definidas y asignadas las diferentes leyes de caudal a cada nudo de consumo, se da por finalizada la edición de los nudos del modelo. Por lo que únicamente falta por modelar la fuente de suministro del sistema.

5.1.3 Fuente de suministro

Como se ha dicho en diferentes ocasiones, las presiones de la red vienen impuestas por la presión de entrada de la red de distribución metropolitana, existiendo dos escenarios en los que la altura en cabecera es diferente. Para simular esta situación con ALLIEVI se han utilizado leyes de altura, las cuales permiten imponer una altura piezométrica en el nudo de cabecera del sistema, según la función (5-1):

$$H(t) = A \cdot t^2 + B \cdot t + C + D \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t + E \right) \quad (5-1)$$

En este caso de estudio asignaremos un valor nulo a los parámetros A, B, D, T y E, introduciendo únicamente un valor de 85 en el parámetro C para el escenario diurno. Como la cota en este nudo de cabecera es de 33 msnm, este valor permite disponer de una presión constante de entrada a lo largo de toda la simulación de 52 mca. Del mismo modo para el escenario nocturno, se define un valor del parámetro C de 81, por lo tanto la presión en la cabecera de la red en esta ocasión será de 48 mca.

Una vez definidas las presiones de entrada, el siguiente paso será introducir y editar la válvula reductora de presión. Para ello ALLIEVI permite añadir el modelo de válvula con el que se trabaja y asignarle una curva de pérdidas que relaciona el grado de apertura de la válvula con el coeficiente de pérdidas k. Como se ha dicho en el apartado 2.3, no se dispone de información específica sobre las características técnicas de esta válvula, por lo que se selecciona una válvula, cuya curva de pérdidas se extrae de bibliografía, concretamente del libro "INGENIERÍA HIDRÁULICA Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua" y la cual puede verse en la Figura 5-3.

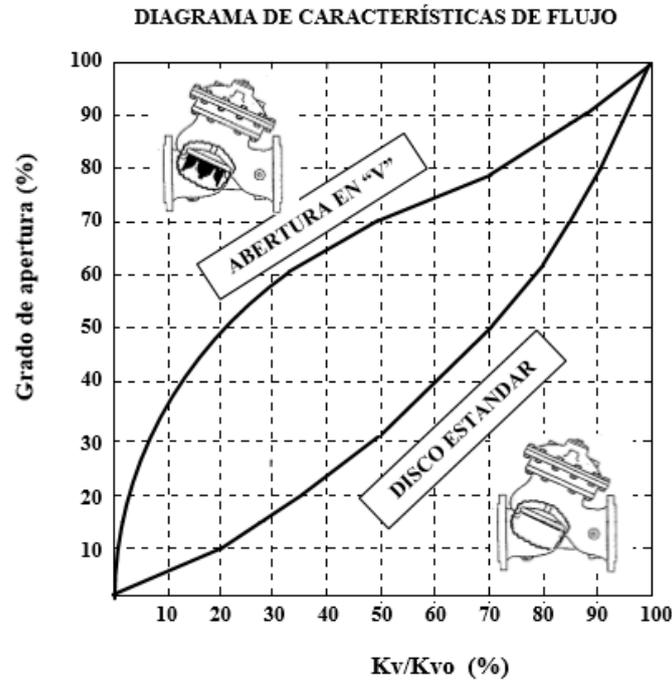


Figura 5-3: Curva de pérdidas seleccionada para la VRP

En esta curva de pérdidas aparece la relación K_v/K_{v0} para diferentes porcentajes de apertura en válvulas de asiento plano en Y, con y sin paso en V, siendo el K_{v0} el coeficiente de caudal a válvula abierta. (Cabrera Marcet, et al., 1996).

El fabricante de dicha válvula facilita la Tabla 5-3 que relaciona el diámetro nominal de la válvula con el K_{v0} para válvulas con disco estándar o con un dispositivo de apertura en "V" colocado en el asiento de cierre de la válvula reductora de presión. En este caso es conocido el diámetro nominal de la válvula siendo este de 200 mm, equivalente a 8", a partir del cual se sabe que el K_{v0} será de $546 \text{ (m}^3/\text{h)/((kp/cm}^2)^{0,5}}$ ya que el estudio se va a realizar tomando la hipótesis de que la válvula depone de un sistema apertura en "V" que permite una mejor regulación del caudal circulante.

Tabla 5-3: Coeficientes K_{v0} de la VRP

Diámetro nominal	K_{v0} Disco estándar ($\text{m}^3/\text{h)/((kp/cm}^2)^{0,5}$	K_{v0} Abertura en "V" ($\text{m}^3/\text{h)/((kp/cm}^2)^{0,5}$
2"	50	33
3"	120	78
4"	205	137
6"	505	312
8"	830	546
10"	1280	855
12"	1960	1229
16"	3425	2184

Una vez conocido el K_{v0} de la válvula, a partir de la Figura 5-3 se obtiene para cada grado de apertura el correspondiente K_v de la válvula obtenido a partir de la relación que corresponda de K_v/K_{v0} como puede verse en la Tabla 5-4. Por último, a partir de la expresión (5-2), la cual relaciona el coeficiente k con el K_v de la válvula, se obtienen los diferentes coeficientes k para los grados de apertura que aparecen en la Tabla 5-4. Estos coeficientes k junto con el grado de apertura correspondiente serán los datos a introducir en la VRP del modelo en ALLIEVI, teniendo la curva de pérdidas el aspecto de la figura derecha que aparece en la Tabla 5-4.

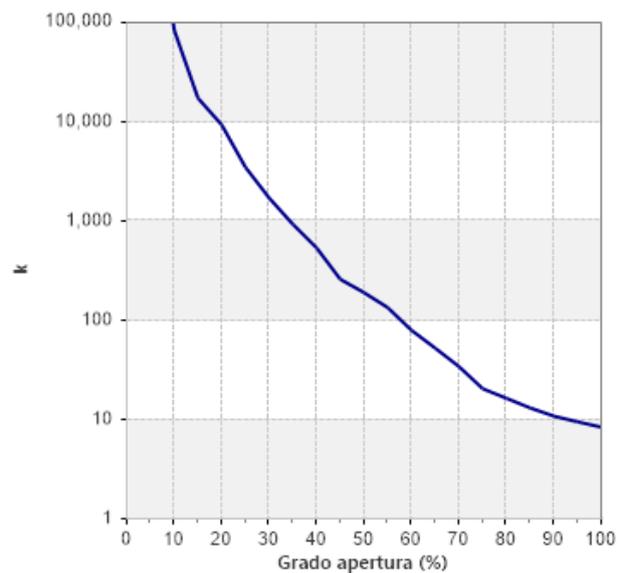
$$K = \frac{8 \cdot k}{\pi^2 \cdot g \cdot D^4}$$

$$K_v = 3600 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot \rho}{K}}$$

$$k = \frac{10 \cdot \pi^2 \cdot g \cdot D^4 \cdot 3600^2}{8 \cdot K_v^2} \quad (5-2)$$

Tabla 5-4: Relación entre el grado de apertura y el k de la VRP con apertura en "V"

G.A. (%)	K_v/K_{v0} (%)	K_v (m ³ /h)/(kp/cm ²) ^{0,5}	k
0	1E-11	5,46E-11	1,00E+26
5	0,15	0,819	3737623,03
10	1	5,46	84096,52
15	2,2	12,012	17375,31
20	3	16,38	9344,06
25	4,9	26,754	3502,56
30	7	38,22	1716,26
35	9,5	51,87	931,82
40	12,5	68,25	538,22
45	18	98,28	259,56
50	21	114,66	190,70
55	25	136,5	134,55
60	32,5	177,45	79,62
65	40	218,4	52,56
70	49,5	270,27	34,32
75	64	349,44	20,53
80	71,5	390,39	16,45
85	80	436,8	13,14
90	88	480,48	10,86
95	94	513,24	9,52
100	100	546	8,41



5.1.4 Comparación del modelo

Una vez creada y editada la fuente de suministro del modelo, éste se puede dar por concluido teniendo el aspecto que aparece en la Figura 5-4, donde las leyes de caudal representan los nudos con consumo.

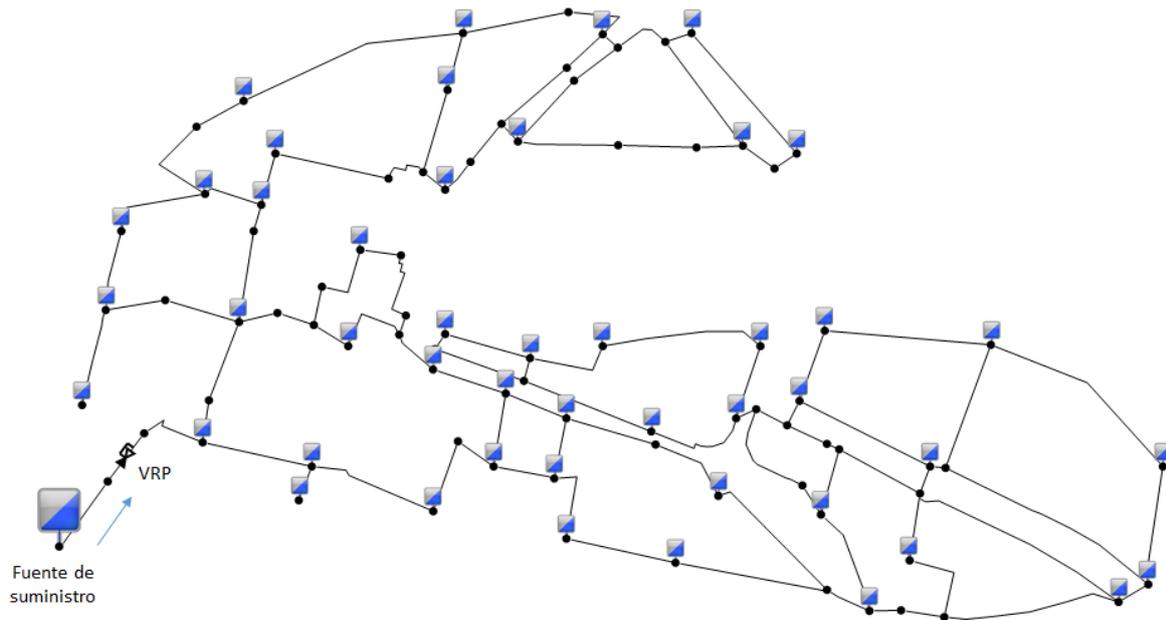


Figura 5-4: Modelo matemático realizado con ALLIEVI

Una vez finalizado el modelo con ALLIEVI se realiza la simulación del mismo con la intención de comparar los resultados obtenidos con los del modelo realizado en EPANET y comprobar así su bondad.

Tras analizar algunos resultados de ambos modelos como las presiones en cabecera, o caudales y presiones en determinados puntos de la red para los dos escenarios, se concluye que los resultados son similares en ambos modelos, existiendo ligeras diferencias debido a que en el modelo de ALLIEVI no se ha tenido en cuenta la incorporación de fugas. Además, hay que tener en cuenta que estos programas utilizan formulaciones diferentes, por lo que es lógico que los resultados no sean exactamente iguales. De todos modos, las diferencias de resultados son ínfimas, por lo que el modelo en ALLIEVI se da por válido.

Algunas de las variables estudiadas en diversos nudos del modelo son la presión y los caudales. Por ejemplo, se ha comparado la evolución de presiones en el nudo con mayor presión de la red, nudo "d30" en el escenario nocturno (Figura 5-5); así como la evolución de caudales circulante por la VRP durante el escenario diurno (Figura 5-6), comprobando que son similares para los dos modelos.

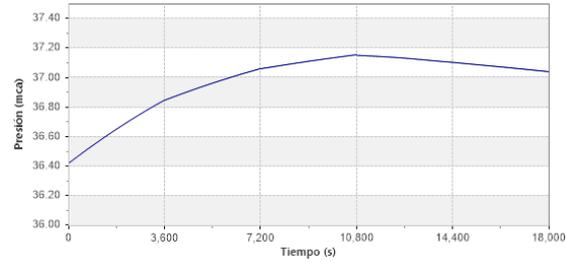
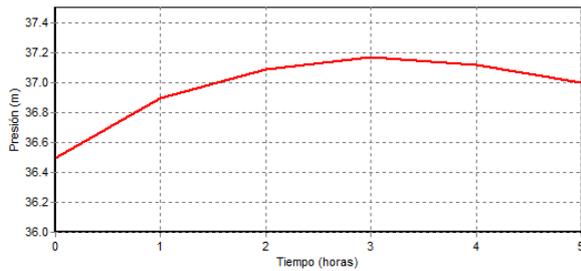


Figura 5-5: Presión en el nudo "d30". EPANET (izquierda); ALLIEVI (derecha)

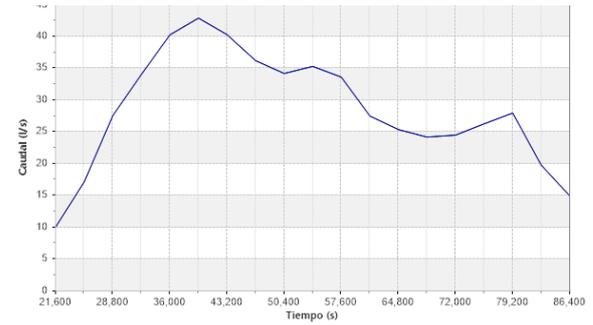
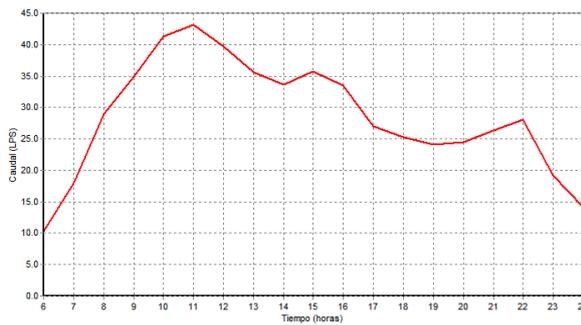


Figura 5-6: Caudal por la VRP. EPANET (izquierda); ALLIEVI (derecha)

5.2 Introducción de la PAT en el modelo

Con el funcionamiento del modelo realizado en ALLIEVI validado, únicamente falta por introducir la bomba funcionando como turbina (PAT), la cual se instalará en paralelo a la VRP, tal y como aparece en la Figura 5-7.

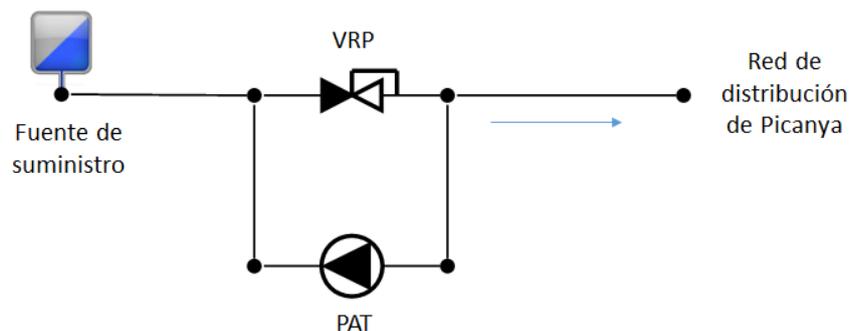


Figura 5-7: Instalación de la PAT en paralelo a la VRP

La decisión de instalar la PAT en paralelo a la VRP se ha tomado pensando en el correcto funcionamiento de la red, de tal forma que parte del caudal circulará por la PAT consiguiendo generar energía, mientras que el resto de caudal circulará por la VRP de forma que ésta siempre esté regulando y dando aguas abajo la presión de tarado establecida, asegurando el correcto funcionamiento del sistema. En el punto 6.1 de este documento se estudiará y

simulará el comportamiento de la PAT en serie con la VRP, observando las ventajas y desventajas respecto de la colocación en paralelo.

Para la instalación de la bomba en el modelo se deben definir una serie de características de la misma tal y como son el tipo de curva característica a utilizar, las válvulas de las que dispone el grupo, la velocidad de régimen y nominal de rotación, y la inercia del grupo de bombeo. Siendo los valores seleccionados los que aparecen en la Figura 5-8, siendo explicados a continuación.

Estación de bombeo - Datos básicos						Instalación			Rotación			
	Nombre	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	V Reg	V Ret	By-Pass	Nreg	Nnom	I
<input type="checkbox"/>	B1	nB2	nB1	33.03	1	Universale ▾	No ▾	No ▾	No ▾	-1550	1450	0.05 <input type="button" value="Calc."/>

Figura 5-8: Datos a introducir en la bomba funcionando como turbina

Curvas características: Como se ha dicho anteriormente, las curvas características proporcionadas por los fabricantes en sus catálogos, indican el funcionamiento de la bomba con velocidad de rotación positiva y en el primer cuadrante, es decir, valores positivos de caudal y de altura, con lo que se obtiene potencia de accionamiento positiva. En cambio, en esta ocasión la bomba trabaja en otro cuadrante, concretamente en la zona E de la Figura 5-9, donde la velocidad de rotación es negativa debido a que se produce un giro inverso en la bomba, cediendo energía al motor que trabaja como un generador. Es la zona de funcionamiento como turbina centrípeta convencional (Abreu, et al., 2012).

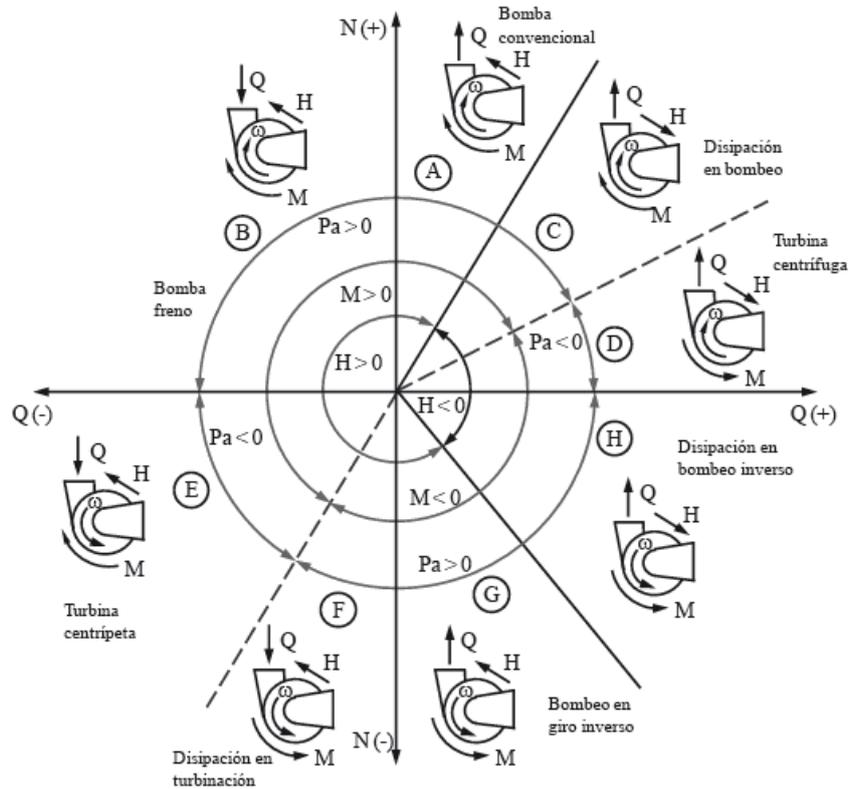


Figura 5-9: Diagrama de campos de trabajo de una bomba. (Abreu, et al., 2012)

En estos casos se utilizan las curvas universales, las cuales permiten conocer el comportamiento generalizado de las bombas funcionando en cualquiera de sus cuadrantes a partir de los valores del punto óptimo de funcionamiento seleccionado (caudal, altura, potencia y rendimiento de la bomba). En el Anejo 5 se puede encontrar mayor información sobre las curvas universales y su representación.

Válvulas del grupo: ALLIEVI permite indicar si existe o no algún tipo de válvula en el grupo de bombeo, tales como válvula de retención, de regulación a la salida, o by-pass entre la entrada y la salida de la bomba. En el caso estudiado no se dispone de ningún tipo de válvula en el grupo de bombeo.

Velocidad de rotación nominal (N_{nom}): Es la velocidad de rotación de las bombas a la que corresponde las curvas características utilizadas (ITA, 2015). En este caso se definirá una velocidad de rotación nominal inicial de 1450 rpm, que permitirá buscar fácilmente curvas características reales de fabricantes cuyo funcionamiento se corresponda con una frecuencia de 50 Hz, y motores de 2 pares de polos. Más adelante se estudiarán bombas con velocidad de rotación nominal de 2900 rpm.

Velocidad de rotación de régimen (N_{reg}): Esta velocidad hace referencia a la velocidad de rotación del grupo de bombeo cuando funciona en condiciones de régimen. Según el principio de reversibilidad cualquier máquina rotativa puede actuar como motor o generador. En el caso estudiado actuará como generador, estando la máquina rotativa conectada mecánicamente, mediante un eje, a la PAT de la que recibe potencia mecánica y la transforma en eléctrica. Concretamente mediante un par exterior como es el giro inverso de la bomba provocado por el paso del agua, se obliga al motor asíncrono a girar por encima de la velocidad de sincronismo (n_s)⁴. De esta manera la máquina asíncrona está transfiriendo a la red en forma de energía eléctrica la energía mecánica que le cede por el eje la bomba utilizada para hacerla girar por encima de la velocidad de sincronismo. En resumen, la máquina asíncrona conectada a la red funciona como generador siempre que su velocidad sea superior a la síncrona y por lo tanto el deslizamiento sea negativo, (Serrano Iribarnegaray & Martínez Román, 2014).

La velocidad de sincronismo (n_s) viene definida por la expresión (5-2), donde f es la frecuencia en Hz y p el número de pares de polos de la máquina:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (5-3)$$

Considerando una frecuencia de 50 Hz (frecuencia de la red de suministro eléctrico en Europa), y una máquina con 2 pares de polos, la velocidad de sincronismo será de 1500 rpm.

La diferencia entre la velocidad de rotación (n) y la velocidad de sincronismo (n_s) viene caracterizada por el deslizamiento (s), definido como su diferencia en tanto por uno de la velocidad de sincronismo, expresión (5-8):

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (5-4)$$

Cuando la bomba actúa en el modo bomba el deslizamiento será positivo, en este caso considerando la velocidad de rotación nominal de 1450 rpm y la velocidad de sincronismo de 1500 rpm, se tiene un deslizamiento de 1/30. Mientras que cuando actúa en el modo turbina el deslizamiento será negativo generando energía, de esta manera para conseguir un deslizamiento de -1/30, la velocidad de rotación de la bomba será de 1550 rpm.

⁴ Velocidad de rotación del campo magnético, función de la polaridad y de la frecuencia de la red de suministro eléctrico.

Por lo tanto la velocidad de rotación de régimen (N_{reg}) a introducir en el software ALLIEVI será de **-1550 rpm**, indicando el símbolo negativo que se produce una rotación inversa de la máquina.

Siguiendo el mismo procedimiento si trabajamos con máquinas cuya velocidad de rotación nominal es de 2900 rpm, y un par de polos, la velocidad de sincronismo será de 3000 rpm. Teniendo en el modo bomba un deslizamiento de 1/30, por lo tanto para conseguir un deslizamiento de -1/30 en el modo turbina la velocidad de rotación de régimen de la bomba deberá ser de 3100 rpm, introducida en ALLIEVI con signo negativo, **-3100 rpm**.

Inercia del grupo de bombeo: Es el momento de inercia de las masas rodantes de cada grupo, e incluye el rodete, el eje y el rotor del motor de accionamiento. En caso de no disponer de este dato, el programa proporciona una estimación del momento de inercia del grupo utilizando la fórmula de Thorley (5-7):

$$I = 0,03768 \left(\frac{P}{N^3} \right)^{0,9556} + 0,0043 \left(\frac{P}{N} \right)^{1,48} \quad (5-5)$$

Donde I es el momento de inercia del grupo en $kg \cdot m^2$, P la potencia nominal de la bomba en Kw, y N la velocidad de rotación nominal en miles de rpm. En la expresión (5-7), el primer término del segundo miembro representa el momento de inercia de rodete y eje, y el segundo término del segundo miembro el momento de inercia del rotor del motor eléctrico de accionamiento (ITA, 2015).

ALLIEVI da la opción de calcular este momento de inercia mediante un asistente como el que aparece en la Figura 5-10, el cual solicita los datos del punto óptimo de funcionamiento.

• Calcular inercia con los datos del punto óptimo de funcionamiento

Caudal (l/s)	<input type="text" value="20.00"/>		
Altura (m)	<input type="text" value="12.50"/>		
Rendimiento (%)	<input type="text" value="75.00"/>		
Velocidad rotación (rpm)	<input type="text" value="1,450.00"/>		
Inercia (Kg*m2)	<input type="text" value="0.05"/>	Potencia (Kw)	<input type="text" value="3.27"/>

Figura 5-10: Asistente para el cálculo del momento de inercia del grupo de bombeo

Como todavía no se ha estimado ningún punto óptimo de funcionamiento se trabajará con una inercia de 0,05 kg·m², definida para un caudal representativo del sistema como son 20 l/s, una altura de 12,50 m correspondiente a la pérdida de carga que se produce en la VRP durante el escenario diurno, un rendimiento estimado del 75% y una velocidad de rotación de 1450 rpm.

Una vez definido el momento de inercia del grupo de bombeo, la velocidad de rotación nominal y de régimen de la bomba y las curvas universales con las que se va a trabajar, únicamente falta por definir un punto óptimo de funcionamiento de la bomba con el que comenzar a trabajar.

5.2.1 Obtención del punto óptimo de funcionamiento de la bomba

Como se ha dicho anteriormente las curvas universales permiten caracterizar el comportamiento de las bombas en cualquier condición de funcionamiento. Los datos necesarios para caracterizar la bomba corresponden al punto óptimo de funcionamiento (o punto de rendimiento máximo) a la velocidad de rotación nominal. Esto es caudal impulsado por la bomba en el punto óptimo de funcionamiento, altura creada por la bomba en el punto óptimo de funcionamiento y potencia de accionamiento de la bomba en el punto óptimo de funcionamiento. Una vez introducidos los valores de caudal, altura y potencia, el programa muestra el rendimiento de la bomba en el punto óptimo de funcionamiento, con el formato que aparece en la Tabla 5-5:

Tabla 5-5: Introducción del punto óptimo de funcionamiento en ALLIEVI

Rendimiento óptimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)
			0

El método utilizado para la selección del punto óptimo de funcionamiento de la bomba a introducir en ALLIEVI parte de la utilización de una serie de ecuaciones publicadas en los últimos años, ya que diferentes autores indican que las condiciones de caudal, altura y rendimiento, están relacionadas a través de coeficientes según se trabaje en el modo bomba o turbina:

$$Q_T = K_Q \cdot Q_B \rightarrow Q_B = Q_T / K_Q \quad (5-6)$$

$$H_T = K_H \cdot H_B \rightarrow H_B = H_T / K_H \quad (5-7)$$

$$\eta_T = K_\eta \cdot \eta_B \rightarrow \eta_B = \eta_T / K_\eta \quad (5-8)$$

Siendo Q, H y η los caudales, alturas y rendimientos respectivamente en el punto óptimo de funcionamiento, designando el subíndice T el trabajo en modo turbina y el subíndice B el modo bomba. Los coeficientes de caudal, altura y rendimiento que relacionan los modos turbina y bomba son K_Q , K_H y K_η respectivamente.

La obtención de estos coeficientes varía según autores. En la Tabla 5-6 se puede ver la expresión que utilizan algunos de ellos, las cuales serán utilizadas para la estimación del punto óptimo de funcionamiento necesario para simular una primera recuperación de energía del sistema:

Tabla 5-6: Coeficientes que relacionan el funcionamiento en modo bomba y turbina

Autor	K_Q	K_H	K_η
Stephanoff	$\frac{1}{\sqrt{\eta_B}}$	$\frac{1}{\eta_B}$	1
Mc. Claskey	$\frac{1}{\eta_B}$	$\frac{1}{\eta_B}$	1
BUTU	$\frac{0,85 \cdot \eta_B^5 + 0,385}{2 \cdot \eta_B^{9,5} + 0,205}$	$\frac{1}{0,85 \cdot \eta_B^5 + 0,385}$	$1 - \frac{0,03}{\eta_B}$
Sharma-Williams	$\frac{1}{\eta_B^{0,8}}$	$\frac{1}{\eta_B^{1,2}}$	1
MICI	0,9 – 1,0	1,56 – 1,78	0,75 – 0,80

Se simula cada punto de funcionamiento obtenido a partir de los diferentes coeficientes que aportan los anteriores autores. Para ello se estima que la altura de bombeo en el modo turbina será igual a la caída de presión que introduce la VRP, es decir, **12,5 m** durante el día y **18,5 m** durante la noche. Mientras que se definirán tres caudales para el modo turbina: el caudal mínimo, medio y máximo de consumo de la red en unidades de l/s, Tabla 5-7:

Tabla 5-7: Caudales estimados en l/s para el modo turbina

	Escenario diurno	Escenario nocturno
Q mínimo	14,22	4,89
Q medio	29,62	7,82
Q máximo	43,12	10,31

A partir del caudal y la altura estimadas en el modo turbina, se obtienen los caudales y alturas en el modo bomba haciendo uso de las expresiones (5-6) y (5-7), y de los coeficientes que aparecen en la Tabla 5-6.

Por último es necesario introducir la potencia consumida en el eje de la bomba en su punto de rendimiento óptimo, esto se calculará estimando un rendimiento óptimo de la bomba del **75%** y aplicando la expresión de la potencia, (5-9):

$$P(kW) = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta_B} \quad (5-9)$$

De este modo tanto para el escenario diurno como nocturno se obtienen 15 puntos de funcionamiento diferentes que se resumen en la Tabla 5-8 y en la Tabla 5-9 respectivamente:

Tabla 5-8: Puntos óptimos de funcionamiento a simular en el escenario diurno

	Puntos de funcionamiento		
	Q (l/s)	H (m)	P (Kw)
Stephanoff	12,31	9,38	1,51
	25,65	9,38	3,15
	37,34	9,38	4,58
Mc. Claskey	10,67	9,38	1,31
	22,21	9,38	2,72
	32,34	9,38	3,97
BUTU	8,12	7,33	0,78
	16,91	7,33	1,62
	24,62	7,33	2,36
Sharma-Williams	11,30	8,85	1,31
	23,53	8,85	2,72
	34,26	8,85	3,97
MICI	14,22	8,01	1,49
	29,62	8,01	3,10
	43,12	8,01	4,52

Tabla 5-9: Puntos óptimos de funcionamiento a simular en el escenario nocturno

	Puntos de funcionamiento		
	Q (l/s)	H (m)	P (Kw)
Stephanoff	4,23	13,88	0,77
	6,78	13,88	1,23
	8,93	13,88	1,62
Mc. Claskey	3,67	13,88	0,67
	5,87	13,88	1,06
	7,73	13,88	1,40
BUTU	2,79	10,85	0,40
	4,47	10,85	0,63
	5,89	10,85	0,84
Sharma-Williams	3,88	13,10	0,67
	6,21	13,10	1,06
	8,19	13,10	1,40
MICI	4,89	10,39	0,66
	7,82	10,39	1,06
	10,31	10,39	1,40

5.3 Recuperación de energía

Una vez definidos los puntos de funcionamiento óptimos a estudiar, se realiza en primer lugar el cálculo del régimen permanente de cada uno de ellos, obteniendo tal y como se esperaba, un caudal de bombeo negativo debido a que el agua circula a través de la bomba en sentido contrario al habitual, una altura de bombeo positiva y una potencia de accionamiento

negativa, coincidiendo con las características de la zona de funcionamiento E definida en la Figura 5-9.

Tras comprobar que los resultados del régimen permanente obtenidos en la bomba coinciden con los esperados para la zona de funcionamiento E, se realiza el cálculo del régimen transitorio definiendo un intervalo de tiempo de cálculo de 0,5 s y un tiempo máximo de simulación de 21.600 s para el escenario nocturno (correspondiente a las 6 primeras horas de duración) y de 86.4000 s para el escenario diurno (correspondiente a las 24 horas del día, de las cuales se desestimarán los resultados correspondientes a los primeros 21.600 s debido a que se corresponden con las características del escenario nocturno).

Para obtener la energía que se recupera con cada punto óptimo de funcionamiento, se consulta en el asistente de resultados del programa los resultados de la potencia en el eje de la bomba dados cada 50 s.

Por lo tanto teniendo en cuenta que la energía se calcula según la expresión (5-10), multiplicando la potencia en el eje de la bomba de cada instante por los 50 s (1/72 h) que representa y sumando todos los valores se obtiene la energía recuperada en el eje de la bomba para el escenario diurno y nocturno, la cual será negativa debido a que la potencia calculada es negativa.

$$E(kWh) = P(kW) \cdot t(h) \quad (5-10)$$

En esta energía recuperada se tienen en cuenta el rendimiento de la bomba y por lo tanto las pérdidas que esta introduce, ya que se trabaja con la potencia en el eje de la bomba. En cambio no se tienen en cuenta las pérdidas que se producen en el motor, éstas serán consideradas únicamente en el punto óptimo de funcionamiento real que proporcione la mayor energía posible, y se aplicarán considerando un rendimiento eléctrico del motor del 90%.

Una vez hechas las consideraciones anteriores y simulando los puntos óptimos de funcionamiento de la Tabla 5-8 y la Tabla 5-9, se concluye que considerando un rendimiento óptimo de la bomba del 75% y una altura de la bomba en modo turbina de 12,5 m (correspondiente a la caída de presión producida en la VRP), es la expresión aportada por BUTU, con el caudal mínimo demandado por la red, el que mayor recuperación de energía diaria proporciona, siendo de **-8,10 kWh**, como se puede ver en la Tabla 5-10:

Tabla 5-10: Energía obtenida diurna con los puntos de funcionamiento teóricos

	Puntos de funcionamiento			
	Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	E (kWh)
Stephanoff	12,31	9,38	1,51	-5,73
	25,65	9,38	3,15	13,46
	37,34	9,38	4,58	33,67
Mc. Claskey	10,67	9,38	1,31	-7,91
	22,21	9,38	2,72	-
	32,34	9,38	3,97	-
BUTU	8,12	7,33	0,78	-8,10
	16,91	7,33	1,62	6,35
	24,62	7,33	2,36	-
Sharma-Williams	11,30	8,85	1,31	-6,97
	23,53	8,85	2,72	-
	34,26	8,85	3,97	-
MICI	14,22	8,01	1,49	-4,88
	29,62	8,01	3,10	-6,17
	43,12	8,01	4,52	-

Comparando la recuperación de energía que se obtendría circulando el caudal mínimo, medio y máximo, se observa que con el caudal mínimo es como mayor energía se recupera en todas las expresiones, incluso se puede ver como con los caudales medios y máximos en ocasiones los valores de energía son positivos, lo que quiere decir que habría que suministrar energía a la bomba para que funcione según el punto óptimo definido.

Aquellos puntos de funcionamiento que no disponen de energía calculada, se debe a que la propia experiencia de los puntos previos analizados hace pensar que hay que aportar energía a la bomba para que ésta gire a la velocidad de rotación definida, por lo tanto no se lleva a cabo su simulación.

La metodología explicada anteriormente también se ha utilizado para estudiar la recuperación de energía en el escenario nocturno, siendo los 15 puntos de funcionamiento estudiados junto a la energía recuperada, los que aparecen en la Tabla 5-11:

Tabla 5-11: Energía obtenida nocturna con los puntos de funcionamiento teóricos

	Puntos de funcionamiento			
	Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	E (kWh)
Stephanoff	4,23	13,88	0,77	-2,81
	6,78	13,88	1,23	-3,54
	8,93	13,88	1,62	-2,67
Mc. Claskey	3,67	13,88	0,67	-3,06
	5,87	13,88	1,07	-
	7,73	13,88	1,40	-
BUTU	2,79	10,85	0,40	-3,08
	4,47	10,85	0,63	-2,56
	5,89	10,85	0,84	-
Sharma-Williams	3,88	13,10	0,67	-3,29
	6,21	13,10	1,07	-
	8,19	13,10	1,40	-
MICI	4,89	10,39	0,67	-4,52*
	7,82	10,39	1,06	-4,51*
	10,31	10,39	1,40	-

A priori la mayor recuperación de energía es aportada por los coeficientes de MICI. No obstante, se descartan debido a que son incompatibles con un correcto funcionamiento de la red, ya que la presión a la salida de la VRP no se corresponde con la presión de tarado de la válvula, incumpléndose la presión de servicio en algunos nudos del sistema. Por ello aparecen marcados con un asterisco en la Tabla 5-11.

Por lo tanto, son los coeficientes facilitados por Sharma-Williams, cuando circula el caudal mínimo nocturno, los que proporcionan una mayor recuperación de energía, siendo esta de **-3,29 kWh**.

5.3.1 Mejora del punto óptimo de funcionamiento

Tal y como indica la diversa bibliografía consultada, los resultados varían considerablemente de un autor a otro, generando una incertidumbre considerable a la hora de decidir la bondad del punto de funcionamiento escogido.

Por ello, una vez encontrado el punto óptimo de funcionamiento que nos ofrecen los métodos teóricos utilizados anteriormente, se van a estudiar diferentes puntos de funcionamiento óptimos con la intención de mejorar la energía recuperada.

La estrategia a seguir para estimar aquel punto de funcionamiento óptimo que proporcione la mayor energía recuperada en la instalación, será acotar las zonas de estudio del cuadrante

alturas-caudales positivos en el que se enmarcan las curvas características de las bombas, hasta conseguir un único punto que proporcione la máxima recuperación de energía.

La primera zona de estudio vendrá definida por cuatro puntos extremos, representados por los caudales y alturas mínimos y máximos estudiados hasta ahora. De esta forma se selecciona como altura y caudal mínimos los extraídos de las ecuaciones teóricas anteriores (7,33 m y 8,12 l/s respectivamente). Mientras que como caudal máximo se escoge el correspondiente al caudal máximo demandado por la red (43,12 l/s), y como altura máxima la pérdida de carga introducida por la VRP (12,5 m).

Por lo tanto se parte de cuatro puntos de funcionamiento extremos que delimitan la primera zona de estudio, tal como aparece en la Figura 5-11.

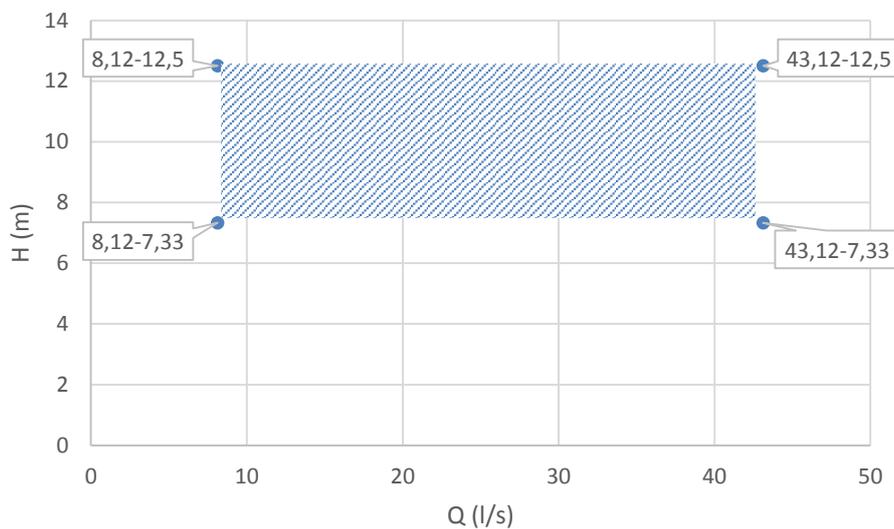


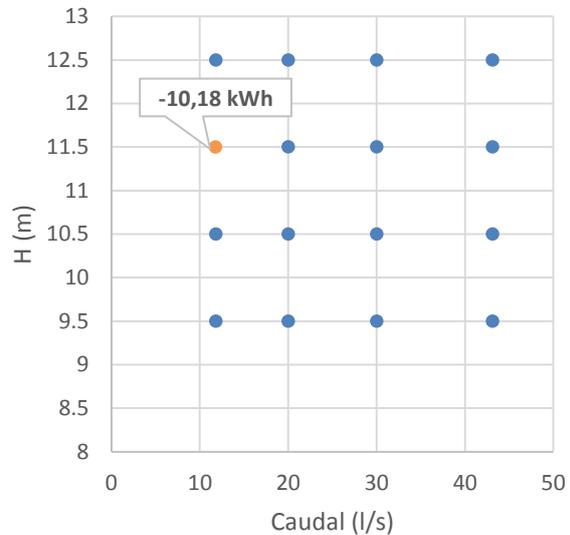
Figura 5-11: Rango de puntos óptimos de funcionamiento a estudiar

Una vez acotada esta zona, se seleccionan una serie de puntos representativos de la misma y se simula la recuperación de energía en cada uno de ellos, en este caso se ha decidido probar con los puntos que aparecen en la Figura 5-12, recuperando para cada uno de ellos la energía que aparece en la Tabla 5-12:

Tabla 5-12: Energía recuperada con la primera acotación

Q (l/s)	H (m)	P (kW)	Rend.	Energía (kWh)
11,8	9,5	1,466	0,75	-9,16
20	9,5	2,485	0,75	1,48
30	9,5	3,728	0,75	14,3
43,12	9,5	5,358	0,75	29,21
11,8	10,5	1,621	0,75	-9,59
20	10,5	2,747	0,75	4
30	10,5	4,12	0,75	19,08
43,12	10,5	5,922	0,75	-
11,8	11,5	1,775	0,75	-10,18
20	11,5	3,008	0,75	7,35
30	11,5	4,513	0,75	-
43,12	11,5	6,486	0,75	-
11,8	12,5	1,929	0,75	-8,19
20	12,5	3,27	0,75	10,93
30	12,5	4,905	0,75	-
43,12	12,5	7,05	0,75	-

Figura 5-12: Puntos óptimos de funcionamiento estudiados en la primera acotación



Se observa como el punto de funcionamiento óptimo de entre los estudiados es el de caudal 11,8 l/s y altura 11,5 m, recuperando una energía de **-10,18 kWh**, mayor que la obtenida con las ecuaciones proporcionadas por los autores indicados en el apartado anterior.

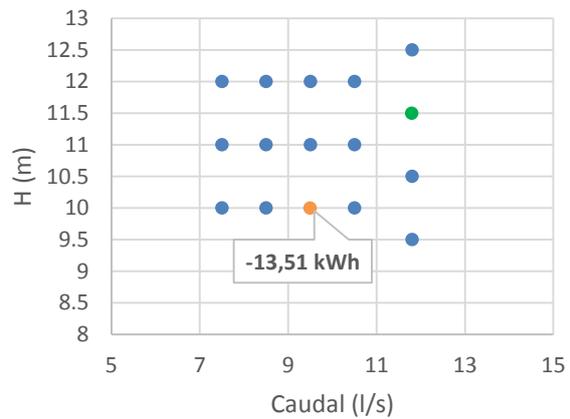
Tal y como se ha indicado en los puntos óptimos teóricos simulados anteriormente, los valores de energía positivos representan que hay que suministrar energía a la bomba para que funcione en su punto óptimo definido, por lo tanto estos valores se descartan automáticamente. Mientras que aquellos puntos de funcionamiento en los que no existe una energía calculada es debido a que se prevé que hay que aportar energía a la bomba para que ésta gire a su velocidad de rotación establecida, siendo por lo tanto puntos de funcionamiento no válidos.

De los resultados obtenidos en la Tabla 5-12 se concluye que con caudales menores se obtienen mayores recuperaciones de energía, por lo que a continuación se estudiarán una serie de puntos de menor caudal y alturas cercanas a 11,5 m, como los que aparecen en la Figura 5-13.

Tabla 5-13: Energía recuperada con la segunda acotación

Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend.	Energía (kWh)
7,5	10	0,981	0,75	-11,82
8,5	10	1,112	0,75	-13,4
9,5	10	1,243	0,75	-13,51
10,5	10	1,373	0,75	-11,93
7,5	11	1,079	0,75	-9,48
8,5	11	1,223	0,75	-10,74
9,5	11	1,367	0,75	-12
10,5	11	1,511	0,75	-12,61
7,5	12	1,177	0,75	-6,88
8,5	12	1,334	0,75	-7,79
9,5	12	1,491	0,75	-8,71
10,5	12	1,648	0,75	-9,62

Figura 5-13: Puntos óptimos de funcionamiento estudiados en la segunda acotación



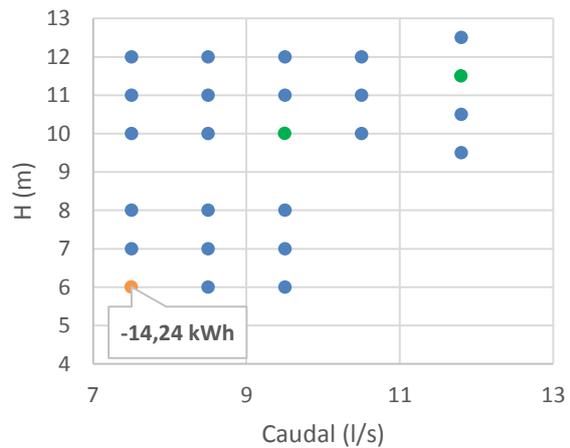
En esta ocasión el punto de funcionamiento con caudal 9,5 l/s y altura 10 m, permite recuperar una energía de **-13,51 kWh** tal como puede verse en la Tabla 5-13, mayor que las estudiadas con los puntos anteriores. Cabe destacar que en esta segunda acotación de puntos, ya no existe ningún punto de funcionamiento a descartar, proporcionando cada uno de ellos una energía recuperada válida.

Siguiendo la misma metodología se decide probar puntos de funcionamiento con alturas de bombeo menores y caudales similares a 9,5 l/s, simulando finalmente los puntos que aparecen en la Figura 5-14.

Tabla 5-14: Energía recuperada con la tercera acotación

Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend.	Energía (kWh)
7,5	8	0,785	0,75	-13,93
8,5	8	0,889	0,75	-13,52
9,5	8	0,994	0,75	-12,53
7,5	7	0,687	0,75	-13,92
8,5	7	0,778	0,75	-13,58
9,5	7	0,87	0,75	-
7,5	6	0,589	0,75	-14,24
8,5	6	0,667	0,75	-13,99
9,5	6	0,746	0,75	-

Figura 5-14: Puntos óptimos de funcionamiento estudiados en la tercera acotación

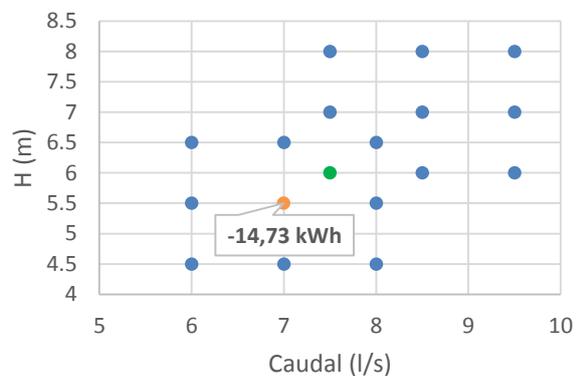


Se observa que la recuperación de energía continúa aumentando, en esta ocasión con el punto de funcionamiento definido por un caudal de 7,5 l/s y una altura de 6 m, el cual consigue una recuperación de energía de **-14,24 kWh** (Tabla 5-14). Por lo tanto, se continúa acotando el punto de funcionamiento, estudiando en esta ocasión diferentes puntos de funcionamiento alrededor del punto obtenido anteriormente como se puede ver en la Figura 5-15:

Tabla 5-15: Energía recuperada con la cuarta y última acotación

Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend.	Energía (kWh)
6	6,5	0,51	0,75	-13,41
7	6,5	0,595	0,75	-13,96
8	6,5	0,68	0,75	-13,95
6	5,5	0,432	0,75	-13,54
7	5,5	0,504	0,75	-14,73
8	5,5	0,576	0,75	-14,44
6	4,5	0,353	0,75	-11,58
7	4,5	0,412	0,75	-13,52
8	4,5	0,471	0,75	-14,02

Figura 5-15: Puntos óptimos de funcionamiento estudiados en la cuarta y última acotación



Con esta serie de puntos estudiados, se llega al punto de funcionamiento óptimo estimado de la instalación que permite recuperar una mayor energía, siendo éste el de caudal 7 l/s y altura 5,5 m, y proporcionando una energía de **-14,73 kWh**, ligeramente superior a la obtenida anteriormente. Se observa en la Tabla 5-15 como puntos de funcionamiento alrededor del obtenido proporcionan menores recuperaciones de energía. Mientras que en la Figura 5-16 se puede ver un resumen de todos los puntos óptimos estudiados hasta ahora y de la energía

recuperada en cada uno de ellos, siendo el punto verde el seleccionado como mejor punto óptimo estimado para el escenario diurno, ya que es el que mayor energía recupera.

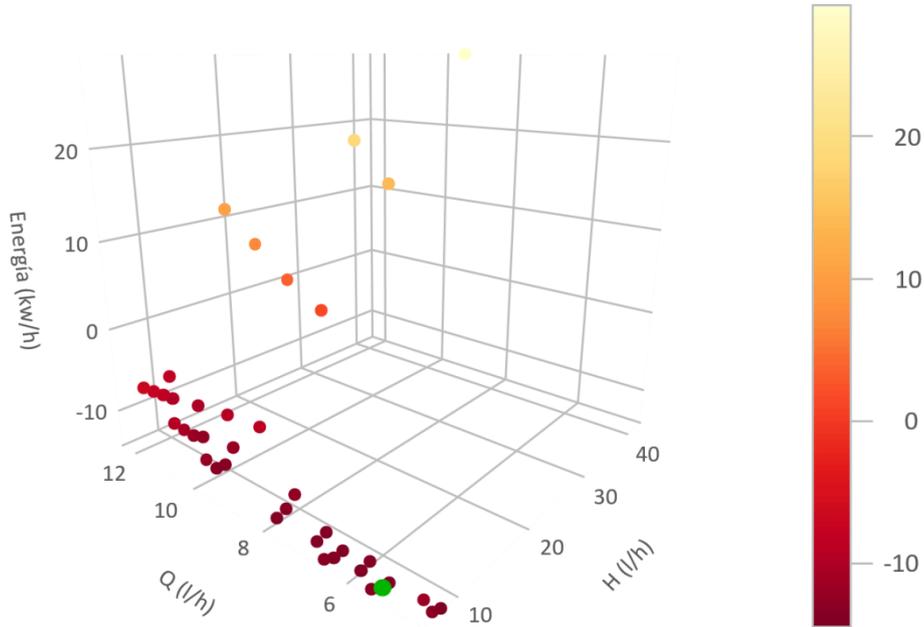


Figura 5-16: puntos de funcionamiento óptimos analizados y energía recuperada para el escenario diurno

Esta misma metodología es utilizada para analizar la recuperación de energía en el escenario nocturno. Sin entrar en mayores detalles, se muestra en la Figura 5-17 y en la Tabla 5-16 a modo de resumen los puntos de funcionamiento estudiados y la energía recuperada en cada uno de ellos. En esta ocasión, las energías marcadas con un asterisco (*) se descartan debido a que no son compatibles con un correcto funcionamiento de la red, siendo su principal problema que no permiten establecer la presión de consigna aguas abajo de la VRP, viéndose comprometidas de esta manera las presiones mínimas de servicio a lo largo de la red.

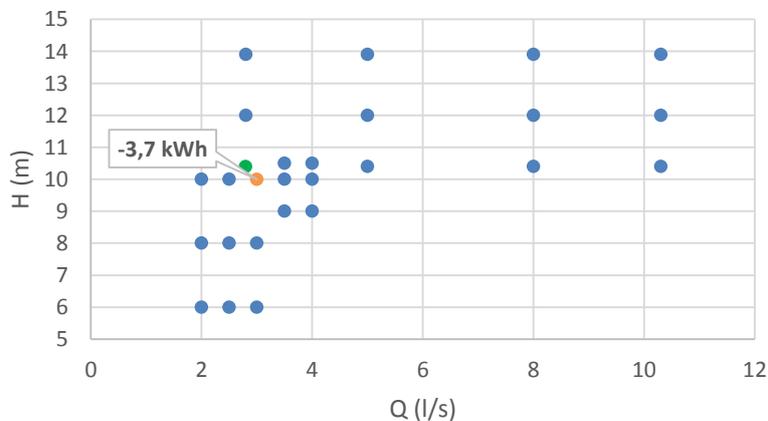


Figura 5-17: puntos óptimos de funcionamiento analizados para el escenario nocturno,

Tabla 5-16: Puntos óptimos de funcionamiento estudiados y energía recuperada en el escenario nocturno

	Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend.	Energía (kWh)
Primera acotación	2,8	10,4	0,381	0,75	-3,35
	5	10,4	0,68	0,75	-5,06*
	8	10,4	1,088	0,75	-3,72*
	10,3	10,4	1,401	0,75	-2,15*
	2,8	12	0,439	0,75	-2,95
	5	12	0,785	0,75	-4,82*
	8	12	1,256	0,75	-3,93*
	10,3	12	1,617	0,75	-2,38*
	2,8	13,9	0,509	0,75	-2,47
	5	13,9	0,909	0,75	-4,28
	8	13,9	1,454	0,75	-1,93*
	10,3	13,9	1,873	0,75	-1,32*
	Segunda acotación	2	10	0,262	0,75
2,5		10	0,327	0,75	-3,09
3		10	0,392	0,75	-3,7
2		8	0,209	0,75	-2,86
2,5		8	0,262	0,75	-3,58
3		8	0,314	0,75	-4,29*
2		6	0,157	0,75	-3,24
2,5		6	0,196	0,75	-4,03*
Tercera y última acotación	3	6	0,235	0,75	-4,6*
	3,5	9	0,412	0,75	-4,59*
	3,5	10	0,458	0,75	-4,31*
	3,5	10,5	0,481	0,75	-4,16*
	4	9	0,471	0,75	-4,97*
	4	10	0,523	0,75	-4,76*
	4	10,5	0,549	0,75	-4,64*

Finalmente el punto de funcionamiento con caudal 3 l/s y altura 10 m es el que mayor recuperación de energía proporciona en el escenario nocturno, **-3,7 kWh**, junto a un correcto funcionamiento de la red. Se puede ver en la Tabla 5-16 como existen puntos con los que se consigue una mayor recuperación de energía, no siendo compatibles con el correcto funcionamiento de la red debido a que causan que todo el caudal circule por la bomba, permaneciendo la VRP cerrada en los momentos de menor demanda e incrementando las presiones en la cabecera de la red por encima de la presión de consigna definida, siendo por lo tanto descartados.

Como la máxima recuperación de energía en el escenario diurno y nocturno, viene dada por puntos de funcionamiento diferentes, se deberían instalar dos bombas en paralelo, cada una con su correspondiente punto óptimo de funcionamiento. Una de ellas trabajaría por la noche y la otra durante el día. Con esto se puede conseguir una recuperación de energía mayor, pero hay que tener en cuenta que la recuperación de energía por la noche es muy pequeña debida al bajo consumo que existe, por lo que se pone en duda si la inversión de una segunda bomba en paralelo quedaría rentabilizada, se debería realizar un estudio económico en profundidad que queda fuera del alcance de este trabajo.

Para evitar este problema, se decide analizar el escenario nocturno con el mismo punto de funcionamiento que durante el día, observando que la recuperación de energía es de -2,86 kWh pero la presión a la salida de la bomba aumenta por encima de los 40 mca en los momentos de mínimo consumo. Estas presiones se podrían considerar asumibles para el funcionamiento de la red, pero como se ha dicho anteriormente la finalidad de la VRP quedaría anulada, además habría que tener en cuenta que aumentaría el caudal fugado, por lo que la ínfima recuperación de energía conseguida no quedaría justificada.

Una última situación a considerar, sería dejar desconectada la bomba en aquellos momentos en los que la VRP cierra y por tanto aumenta la presión en cabecera. De todos modos no hay que olvidar que estos puntos de funcionamiento obtenidos son estimados, no correspondiéndose con curvas características reales de las bombas proporcionadas por fabricantes. Por lo tanto en el siguiente apartado se buscarán curvas reales cuyo punto de funcionamiento óptimo sea similar a los estimados anteriormente, para después analizar de manera profunda cómo se comporta la red y que posibilidades de mejora existen.

Por último se ha estudiado el comportamiento de la red y la recuperación de energía con bombas cuya velocidad de rotación de régimen es de **-3100 rpm**, y una velocidad de rotación nominal de **2900 rpm**, comprobando que la recuperación de energía es prácticamente similar, se puede comparar los resultados en la Tabla 5-17:

Tabla 5-17: Energía recuperada cambiando la velocidad de rotación nominal de la bomba

Velocidad de rotación nominal	Escenario diurno (06:00-24:00)	Escenario nocturno (00:00-06:00)
1450 rpm	-14,46 kWh	-3,70 kWh
2900 rpm	-14,73 kWh	-3,11 kWh

Se ha intentado encontrar curvas reales con velocidad de rotación nominal de 2900 rpm cuyo punto de funcionamiento óptimo sea similar a los estimados hasta ahora, no encontrando fabricante que nos proporcione bombas con estas características. Por ello y teniendo en cuenta la similitud en la energía recuperada con velocidades de rotación nominal de la bomba de 1450 rpm, se desestima la opción de trabajar con bombas cuya velocidades de rotación nominal sea de 2900 rpm.

5.3.2 Curvas características reales

El siguiente paso es seleccionar una bomba de catálogo que nos proporcione un punto óptimo de funcionamiento real de características similares al que se ha estimado en el apartado anterior, es decir, para el escenario diurno un caudal de 7 l/s y una altura 5,5 m con una potencia de 0,504 kW que nos proporciona un rendimiento próximo al 75% (Tabla 5-18), y para el escenario nocturno un caudal de 3 l/s y una altura de 10 m con una potencia de 0,504 kW que nos proporciona un rendimiento próximo al 75%, (Tabla 5-19).

Tabla 5-18: Punto óptimo de funcionamiento estimado para el escenario diurno

Rendimiento óptimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)
7	5.5	0.504	74.94

Tabla 5-19: Punto óptimo de funcionamiento estimado para el escenario nocturno

Rendimiento óptimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)
3	10	0.392	75.08

En definitiva, el siguiente objetivo es buscar curvas características reales cuyo punto de funcionamiento óptimo sea similar a los estimados anteriormente. Tras consultar diferentes catálogos de fabricantes y diferentes curvas proporcionados por éstos, como se puede ver en el Anejo 4, se encuentra para el escenario diurno la curva 50-16/φ135 que aparece en la Figura 5-18, en la que las líneas continuas representan el punto óptimo de funcionamiento estimado en el apartado anterior y las líneas discontinuas el punto de funcionamiento óptimo real de la curva.

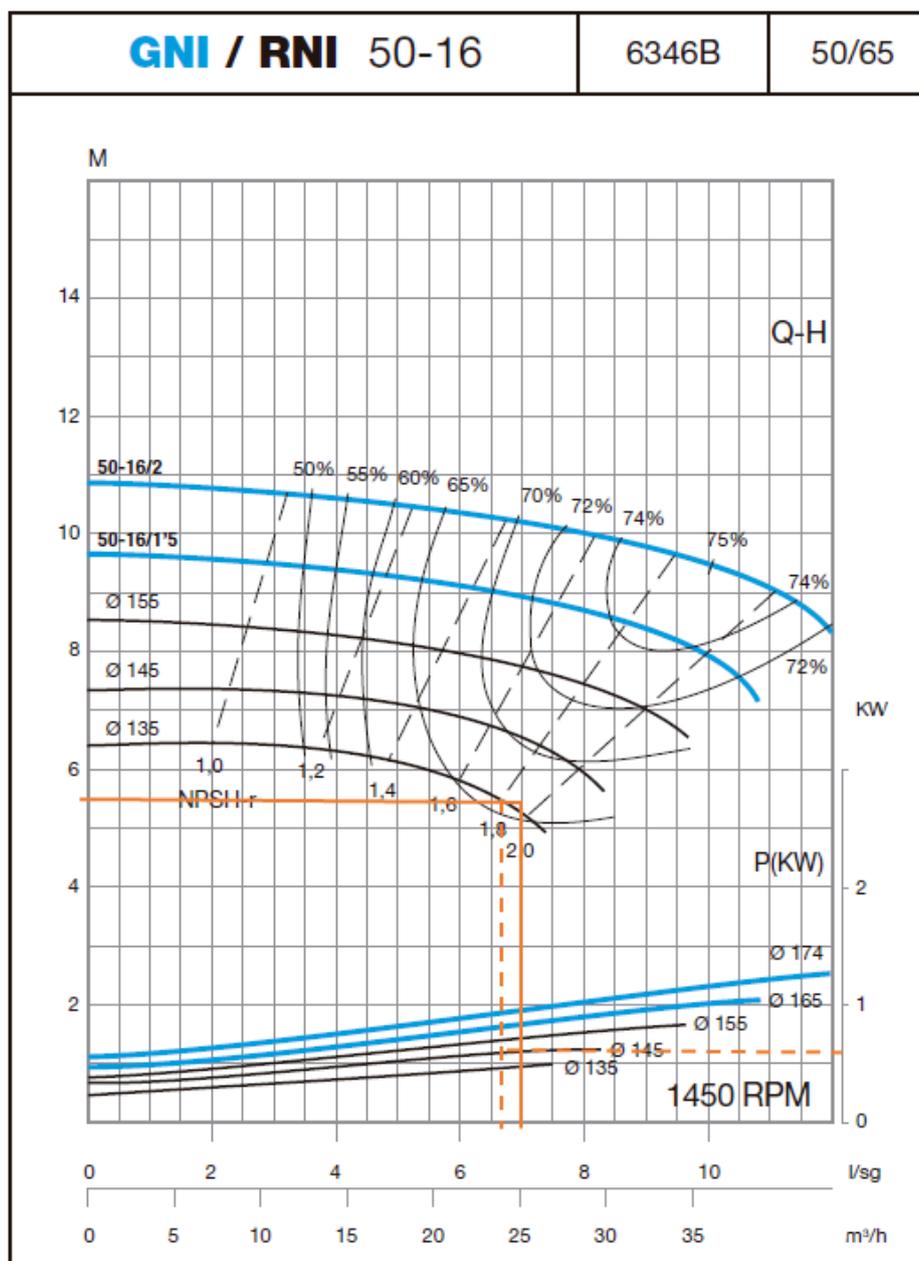


Figura 5-18: Curva 50-16/ ϕ 135 seleccionada para el escenario diurno

El punto óptimo de funcionamiento para esta curva viene definido por un caudal de 6,7 l/s, una altura de 5,5 m y una potencia de 0,55 Kw, con un rendimiento del 65,73% (Tabla 5-20):

Tabla 5-20: Punto óptimo de funcionamiento de la curva 50-16/ ϕ 135

Rendimiento óptimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)
6.7	5.5	0.55	65.73

Analizando la recuperación de energía y comportamiento de la red bajo sus características, se obtiene una recuperación de energía de **-16,38 KWh**, mayor que con el punto óptimo de

funcionamiento teórico, donde se había estimado una recuperación de energía de **-14,73 kWh**.

Además se comprueba la validez de las presiones aguas abajo de la VRP, observando que se mantiene constante e igual a la presión de tarado, 39,5 mca, como puede verse en la Figura 5-19:

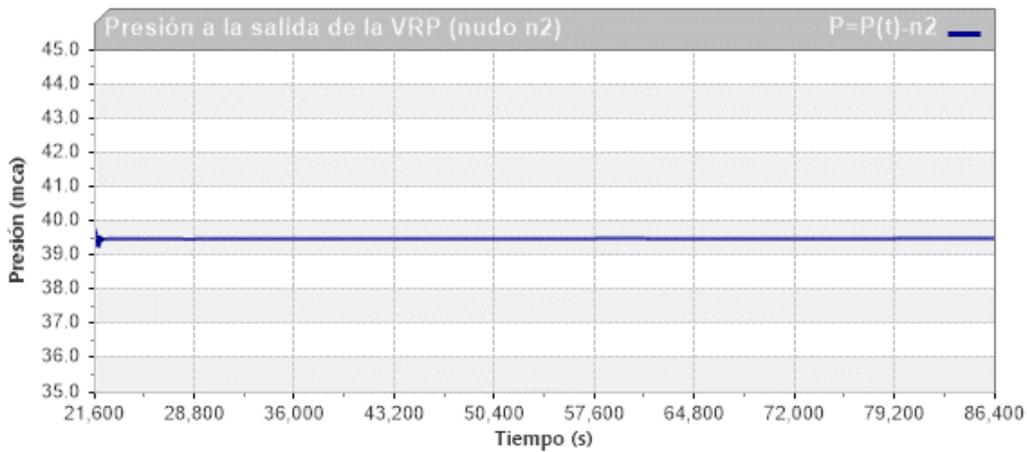


Figura 5-19: Presión a la salida de la VRP con la curva real de la bomba (escenario diurno)

Si finalmente se decidiese instalar una segunda bomba en paralelo que permitiese recuperar energía en el escenario nocturno, la bomba comercial encontrada cuyo punto de funcionamiento óptimo es similar al estimado, se corresponde con la curva 32-26/φ205 como puede verse en la Figura 5-20, siendo su punto óptimo de funcionamiento el que aparece en la Tabla 5-21:

Tabla 5-21: Punto óptimo de funcionamiento de la curva 32-26/φ205

Rendimiento óptimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)
3.5	12.5	1.2	35.77

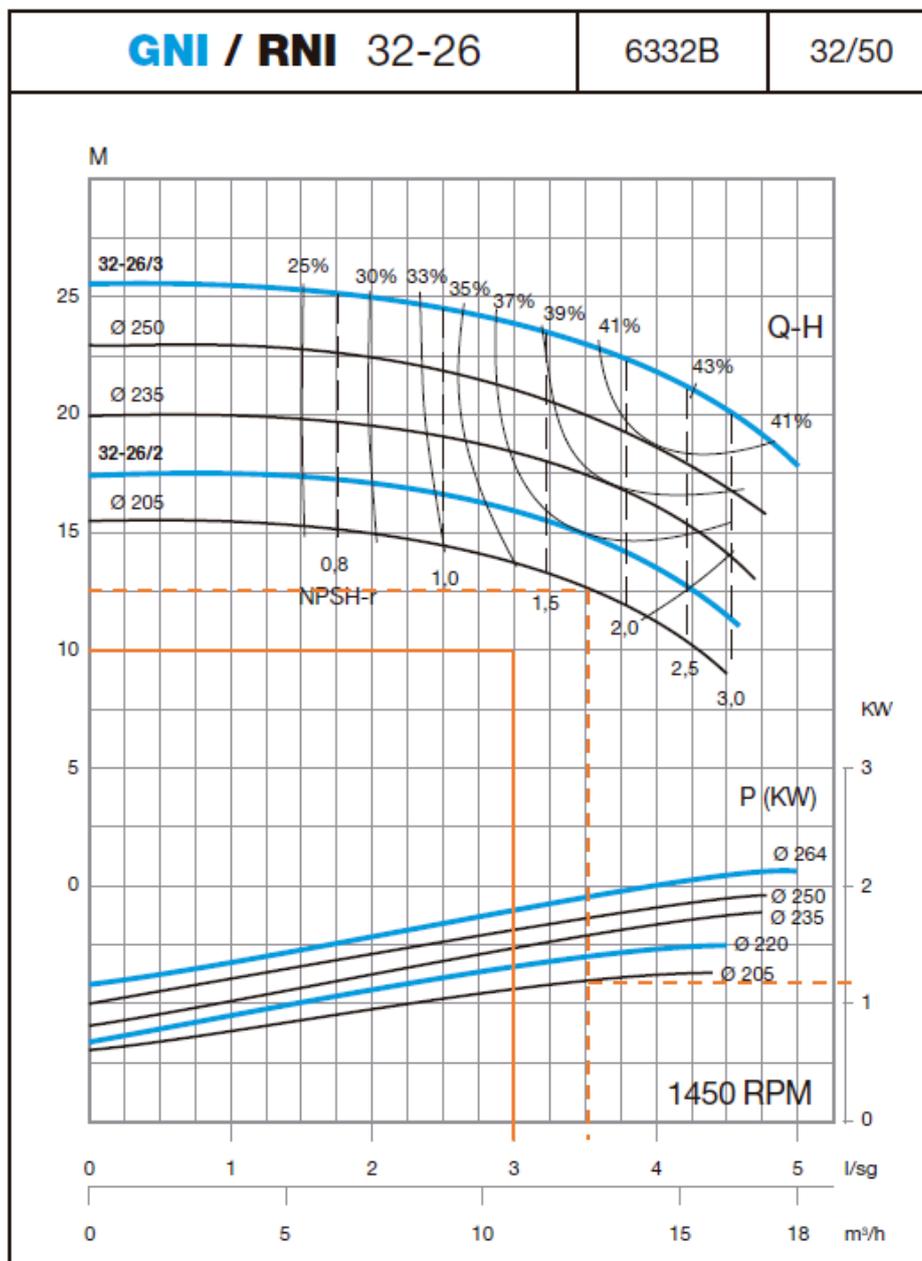


Figura 5-20: Curva 32-26/ ϕ 205 seleccionada para el escenario diurno

Tal y como se ha realizado con la bomba seleccionada para trabajar en el escenario diurno, se procede a realizar la recuperación de energía y comportamiento de la red en el escenario nocturno con la bomba 32-26/ ϕ 205, obteniéndose una recuperación de energía de **-7,41 kWh**, el doble que con el punto óptimo de funcionamiento teórico, con el cual se había estimado una recuperación de energía de **-3,70 kWh**. Esta gran diferencia se debe al rendimiento y potencia con el que se trabaja, muy diferentes entre el punto óptimo estimado y el de la bomba real seleccionada, la cual trabaja con un rendimiento considerablemente bajo, teniendo como consecuencia directa un aumento de la potencia en el eje de la bomba.

Se comprueba la validez de las presiones a la salida de la válvula reductora de presión, observando que se mantiene constante e igual a la presión de tarado, 29,5 mca, como puede verse en la Figura 5-21:

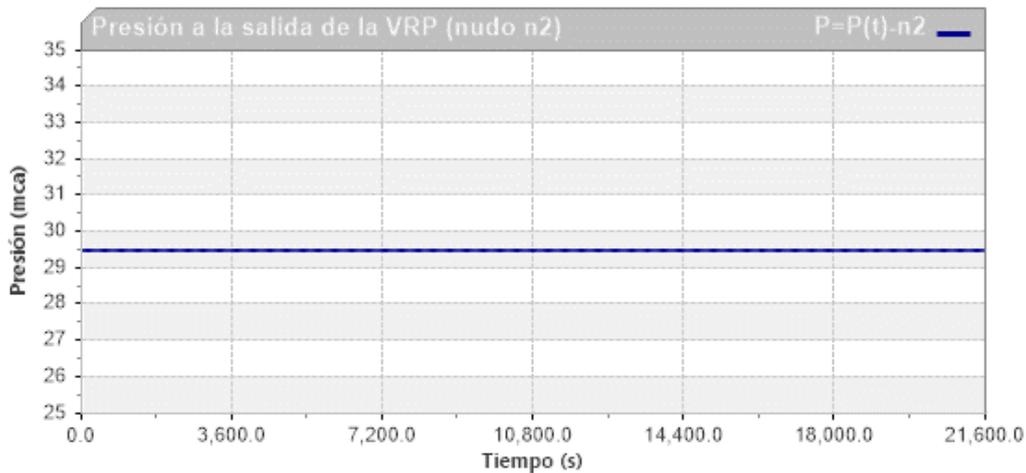


Figura 5-21: Presión a la salida de la VRP con la curva real de la bomba (escenario nocturno)

Con el análisis de las bombas realizado hasta ahora, se obtiene una recuperación de energía total diaria de **-23,79 kWh**, correspondiéndose al escenario diurno una energía de -16,38 kWh y al escenario nocturno una energía de -7,41 kWh.

5.3.3 Funcionamiento de la bomba en el modo turbina

Una vez se han encontrado dos bombas reales capaces de recuperar energía y preservar el correcto funcionamiento de la red, se realiza el estudio del funcionamiento de estas bombas en el modo turbina, recordando que su simulación se ha realizado haciendo uso de las curvas universales del programa ALLIEVI.

Para ello en primer lugar se analizan los resultados de la bomba en el escenario diurno, obteniendo un caudal circulante a través de la misma constante e igual a **-10,2 l/s**, siendo la altura de bombeo de unos **12,4 m**, tal y como se puede ver en la Figura 5-22:

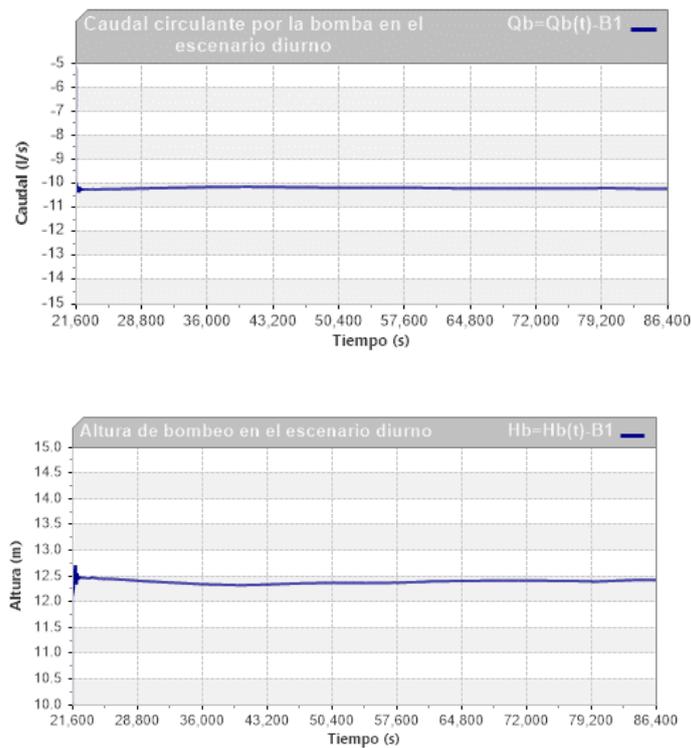


Figura 5-22: Caudal y altura de la bomba en el escenario diurno

Una vez conocido que la PAT trabaja en un punto de funcionamiento prácticamente constante (-10,2 l/s - 12,4 m), se representa la curva de alturas-caudales de la bomba trabajando como turbina, para visualizar gráficamente en qué punto estaría trabajando, Figura 5-23. Esta curva se grafica siguiendo el método utilizado por las curvas universales el cual queda explicado en el Anejo 5.

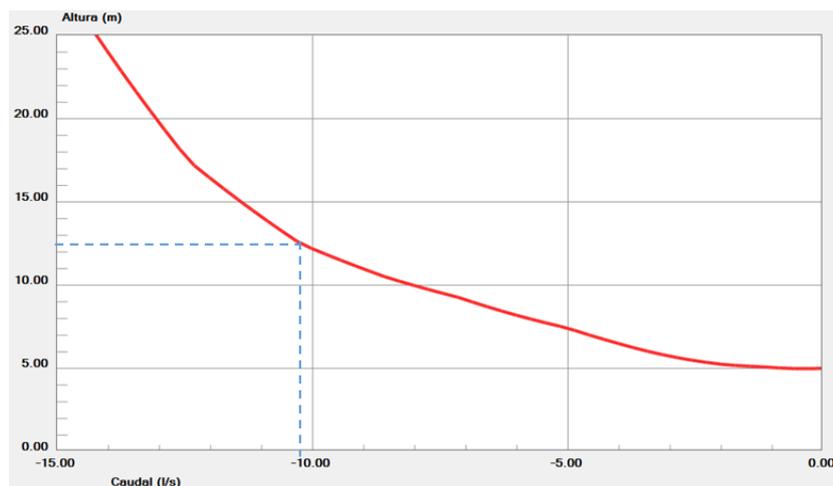


Figura 5-23: Curva característica de la bomba 50-16/φ135 funcionando como turbina

Del mismo modo se presenta la curva de rendimiento de la PAT, con la intención de estimar el rendimiento con el que se trabaja en el modo turbina. En la Figura 5-24 puede verse como el rendimiento estimado de la bomba en el modo turbina para el escenario diurno según las curvas universales es del **73 %**, considerándolo aceptable.

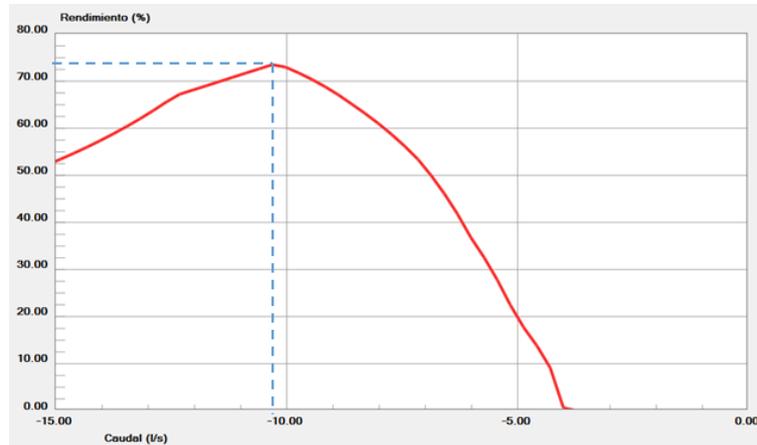


Figura 5-24: curva de rendimiento de la bomba 50-16/φ135 funcionando como turbina

Realizando los mismos pasos para analizar los resultados de la bomba en el escenario nocturno, se obtiene un caudal de bombeo constante e igual a **-4,56 l/s**, siendo la altura de bombeo de **18,5 m** como puede verse en la Figura 5-25:

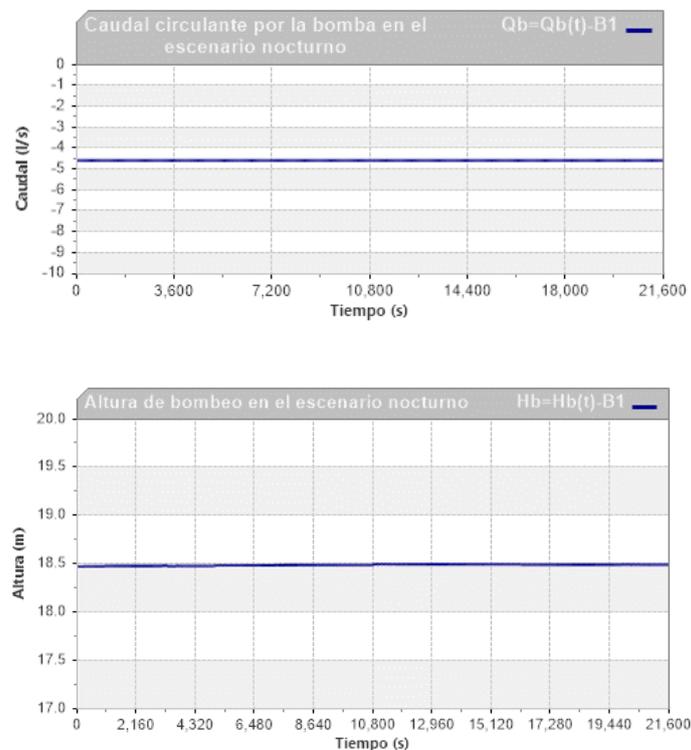


Figura 5-25: Caudal y altura de la bomba en el escenario nocturno

De la misma manera que para el escenario diurno se representa la curva de alturas-caudales de la bomba trabajando como turbina en el escenario nocturno para saber en qué punto se encuentra trabajando, Figura 5-26.

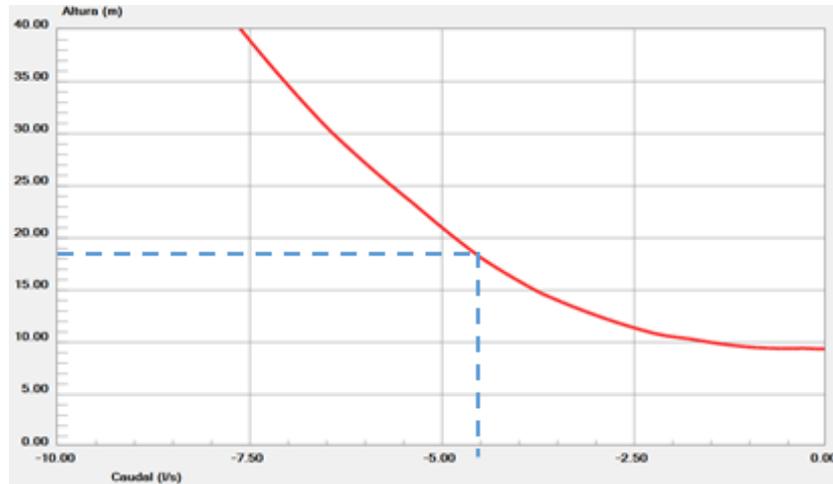


Figura 5-26: Curva característica de la bomba 32-26/φ205 funcionando como turbina

Del mismo modo se representa la curva de rendimiento para estimar el rendimiento con el que se trabaja en el modo turbina según las curvas universales, obteniendo un rendimiento del **144%**. Lógicamente este resultado es inalcanzable y hace pensar que esta bomba, cuyo rendimiento óptimo en el modo bomba es bastante bajo, no sería una buena elección para la instalación.

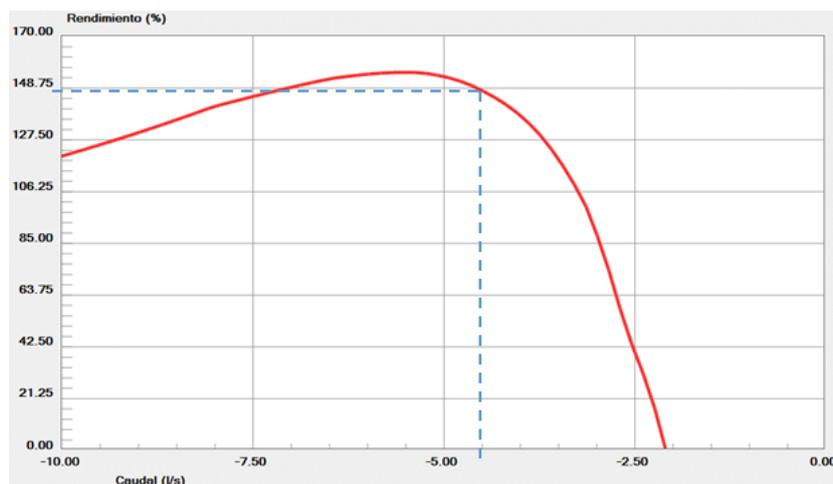


Figura 5-27: curva de rendimiento de la bomba 32-26/φ205 funcionando como turbina

Tras obtener los incoherentes resultados anteriores, se procede a la búsqueda de otra bomba a instalar en el escenario nocturno, de características similares al punto óptimo de funcionamiento estimado.

Tras la consulta de varios catálogos de fabricantes, se encuentra una bomba con puntos de funcionamiento óptimos similares al estimado, como puede verse en la Figura 5-28. Se decide simular los puntos óptimos de todos los recortes de rodete de esta bomba, resultando que tan solo uno de ellos es compatible con el correcto funcionamiento de la instalación. Éste es el perteneciente al recorte de 200 mm, cuyo punto de funcionamiento óptimo se corresponde con un caudal de 3,9 l/s, una altura de 11,9 m y una potencia de 0,79 kW que permite trabajar a la bomba con un rendimiento del 57,63% en su máxima eficiencia, tal como aparece en la Tabla 5-22. Este punto óptimo de trabajo permite recuperar una energía de **-5,39 kWh**, superior a la ofrecida por el punto de funcionamiento óptimo estimado.

Tabla 5-22: Punto óptimo de funcionamiento de la curva NE 620/φ200

Rendimiento óptimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)
3.9	11.9	0.79	57.63

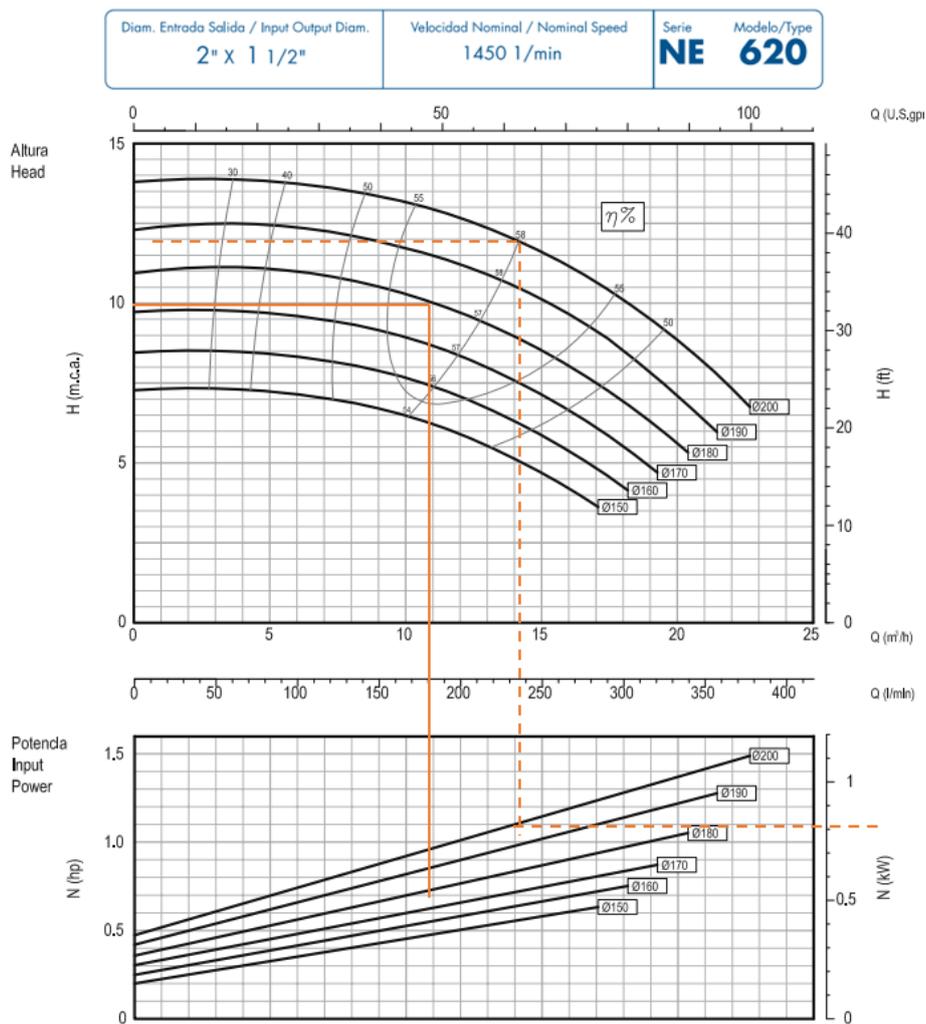


Figura 5-28: Curva NE 620/φ200 seleccionada para el escenario diurno

En esta ocasión el caudal circulante a través de la bomba también es constante e igual a **-5,3 l/s**, con una altura de bombeo de **18,5 m**. De nuevo se representa la curva de alturas-caudales de esta bomba trabajando como turbina para saber en qué punto trabaja, Figura 5-29:

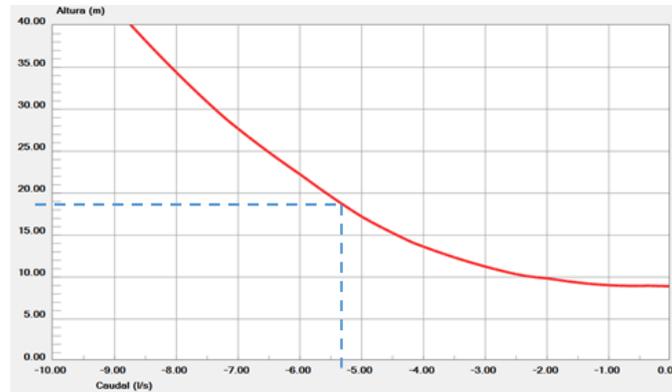


Figura 5-29: Curva característica de la bomba NE 620/φ200 funcionando como turbina

En la Figura 5-30 puede verse como en esta ocasión el rendimiento estimado de la bomba en el modo turbina según las curvas universales es del **93,5%**. Se pone en duda este resultado por el elevado porcentaje que representa, y por el precedente del caso anterior, de todos modos considerando que el punto de mayor rendimiento no supera el 100% se considera válida la elección de esta bomba, estimando que trabajará con un buen rendimiento.

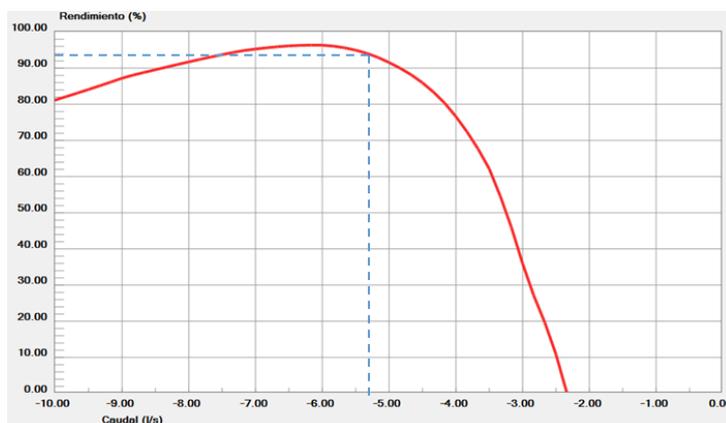


Figura 5-30: curva de rendimiento de la bomba NE 620/φ200 funcionando como turbina

Con este análisis se concluye que instalando dos bombas en paralelo a la VRP como son la bomba 50-16/φ135 trabajando en el escenario diurno y la bomba NE 620/φ200 trabajando en el escenario nocturno, se recupera una energía en el eje de la bomba de **-21,77 kWh** al día, correspondiendo una energía del -16,38 kWh al escenario diurno y una energía de -5,39 kWh al escenario nocturno.

Como se ha dicho al comienzo de este punto, esta energía recuperada tiene en cuenta el rendimiento de la bomba, pero no el del motor. Por lo tanto se debe estimar la energía total recuperada al día teniendo en cuenta las pérdidas que se producen en el motor de la bomba, el cual actuará como generador eléctrico en esta ocasión. De esta manera estimando un rendimiento eléctrico del motor del 90%, la energía recuperada será próxima a **-19,6 kWh** al día.

5.4 Análisis de la VRP

Una vez seleccionadas las PATs a instalar, se realiza un análisis del comportamiento de la VRP, y se estudia un posible cambio de la misma para observar la afección que puede tener el sistema.

5.4.1 Cavitación en la válvula

Se analiza el comportamiento de la VRP para tener en cuenta que no se produzca cavitación en ella. La cavitación dependerá de la presión aguas arriba y aguas abajo de la VRP, este dato es conocido ya que la presión de entrada viene marcada por el abastecimiento de la red de agua metropolitana, siendo durante el día de 52 mca. Mientras que la presión aguas abajo marcada por el tarado de la VRP, es de 39,5 mca. La otra variable a tener en cuenta en la cavitación de las válvulas es la velocidad de circulación del agua a través de ella. Cuando la válvula trabaja con un porcentaje de apertura muy pequeño, la velocidad en el interior de la válvula se incrementa notablemente como consecuencia de la disminución de la sección de paso, esto conlleva a una brusca disminución de la presión, que puede llevar al agua a alcanzar valores de la presión de vapor, apareciendo el fenómeno de la cavitación.

Para estimar que la válvula no trabaja en una zona de cavitación, se hace uso de dos diagramas encontrados en la bibliografía consultada. El primero de ellos (Figura 5-32) estima la existencia de cavitación a partir de la presión aguas arriba y aguas abajo de la VRP y de la velocidad nominal en la válvula, mientras que el segundo diagrama (Figura 5-33), divide dicho diagrama en 5 zonas: la zona 1 hace referencia a una situación imposible en la que la presión aguas arriba es inferior a la presión aguas abajo, mientras que en la zona 2 no existiría cavitación, y en las zonas 3, 4 y 5 sí.

El primer diagrama requiere el dato de la velocidad nominal en la válvula, la cual se calcula a partir del caudal máximo que circula por la VRP durante el día, siendo éste de 32,8 l/s como

puede verse en la Figura 5-31. Por lo tanto conocido el diámetro de la válvula (200 mm) y estimando que su sección de paso será circular, la velocidad nominal en la válvula para un caudal de 32,8 l/s será máxima e igual a 1,04 m/s.

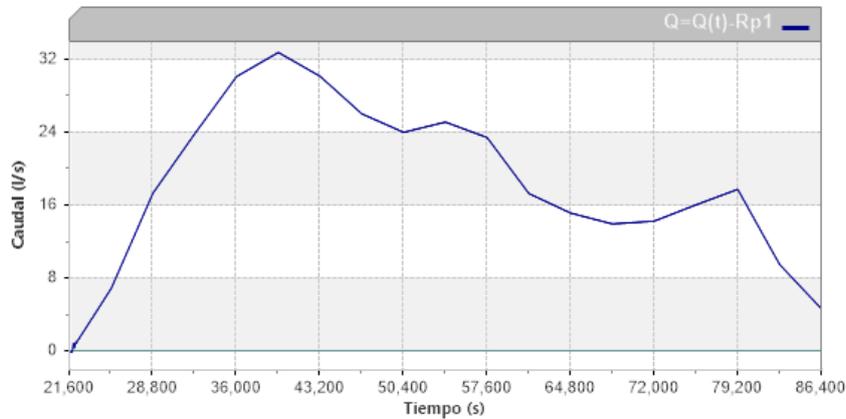


Figura 5-31: Caudal circulante por la VRP en el escenario diurno

Conocidas las presiones aguas arriba y aguas abajo de la VRP y la velocidad nominal en la válvula, se llega a la conclusión de que no existirá cavitación en la VRP tal como puede comprobarse en la Figura 5-32.

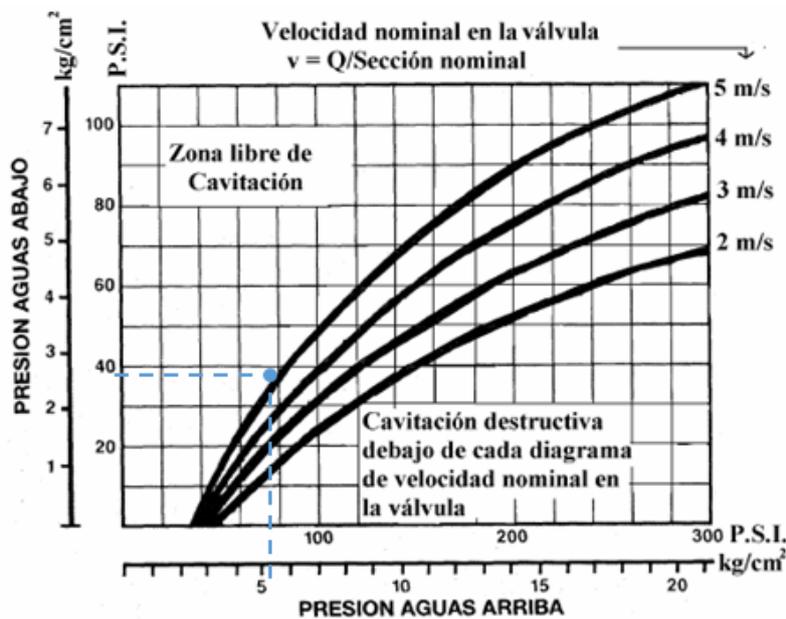


Figura 5-32: Diagrama 1 de cavitación de la VRP

El segundo diagrama que permite corroborar la no existencia de cavitación en la válvula, es el que aparece en la Figura 5-33. Se puede observar cómo tanto el escenario diurno (línea azul), como el nocturno (línea naranja) se encuentran en la zona 2, concluyendo por lo tanto que la VRP no trabajaría en condiciones de cavitación en ningún momento.

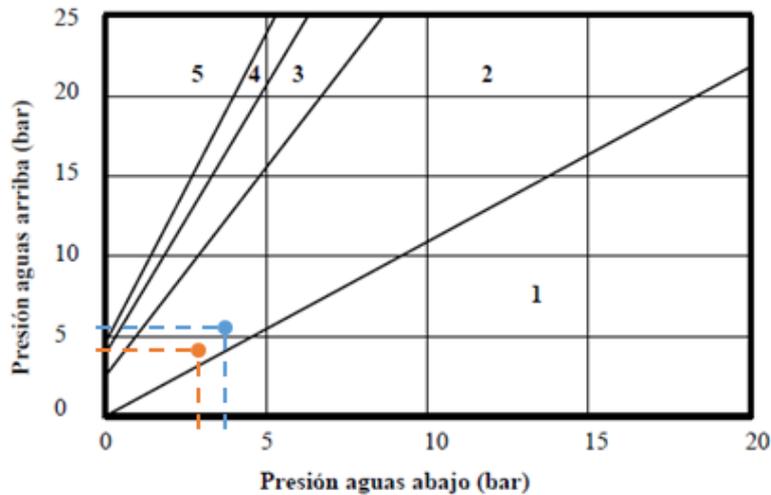


Figura 5-33: Diagrama 2 de cavitación de la VRP

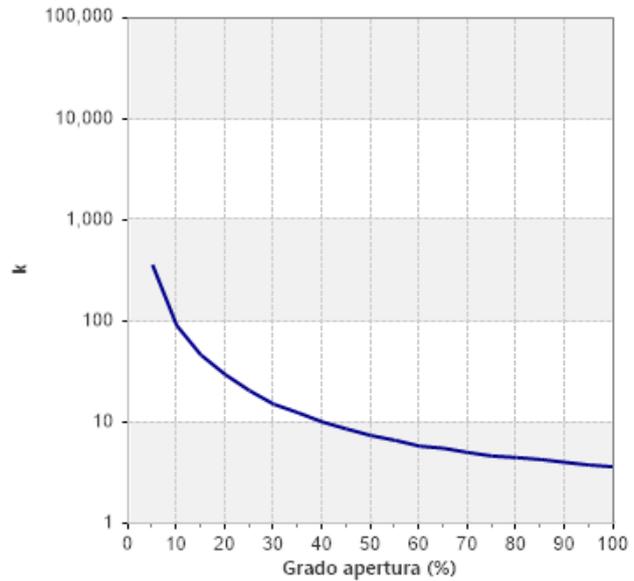
5.4.2 Cambio de la VRP

Por último se estudia la trascendencia que puede tener un cambio de VRP en la recuperación de energía en el sistema. Para ello con la bomba 50-16/φ135 finalmente seleccionada e instalada para el escenario diurno, se van a modificar las características de la VRP que se definieron en un principio, instalando la misma VRP pero en esta ocasión con el disco estándar, es decir, sin incorporar ningún tipo de dispositivo en el asiento de cierre, ya que el estudio realizado hasta ahora, se ha hecho con un dispositivo de abertura en “V” colocado en el asiento de cierre de la válvula reductora de presión. En un principio estos dispositivos permiten un mejor funcionamiento de la válvula como elemento regulador, de hecho en la Figura 5-3 se puede ver como para el mismo grado de apertura, la relación K_v/K_{v0} de la válvula sin ningún elemento en el asiento de cierre es mayor, es decir, incorpora menores pérdidas de carga, por lo que la válvula deberá permanecer más cerrada. En esta ocasión se ha decidido comprobar el funcionamiento del sistema eliminando el dispositivo en “V” de la VRP.

Siguiendo el procedimiento descrito en el punto 5.1, se obtiene a partir del K_{v0} y de la relación K_v/K_{v0} de la Figura 5-3 el coeficiente k de la válvula de disco estándar para diferentes grados de apertura, utilizando para ello la expresión (5-7). Así, la curva de pérdidas de la válvula de disco estándar con la que se simulará el sistema será la que aparece en la Tabla 5-23:

Tabla 5-23: Relación entre el grado de apertura y el k de la VRP con disco estándar

G.A. (%)	Kv/Kvo (%)	Kv (m ³ /h)/((kp/cm ²) ^{0,5})	k
0	1E-11	0,0	3,64E+26
5	10	83,0	363,92
10	20	166,0	90,98
15	28	232,4	46,42
20	35	290,5	29,71
25	42	348,6	20,63
30	49	406,7	15,16
35	54	448,2	12,48
40	60	498,0	10,11
45	65	539,5	8,61
50	70	581,0	7,43
55	74	614,2	6,65
60	79	655,7	5,83
65	81	672,3	5,55
70	85	705,5	5,04
75	88,5	734,6	4,65
80	90	747,0	4,49
85	92	763,6	4,30
90	95	788,5	4,03
95	98	813,4	3,79
100	100	830,0	3,64



Tras simular la red de distribución con esta VRP instalada, se observa que la recuperación de energía conseguida en el escenario diurno es la misma que con la VRP con obturador en “V”, es decir, no existe afección al funcionamiento de la bomba, manteniendo el mismo caudal y altura de trabajo.

Por lo tanto cabe pensar que se están produciendo cambios en el funcionamiento de la válvula. Por ello se analiza su apertura a lo largo del tiempo, comprobando como esta VRP permite establecer la presión de consigna con porcentajes de apertura más bajos. En la Figura 5-34 se puede ver la diferencia entre la apertura de la válvula con apertura en “V” y la de disco estándar. Mientras que la primera regula el caudal circulante con aperturas de entre el 0 y el 45%, la válvula de disco estándar se mueve en rangos de apertura menores al 5%.

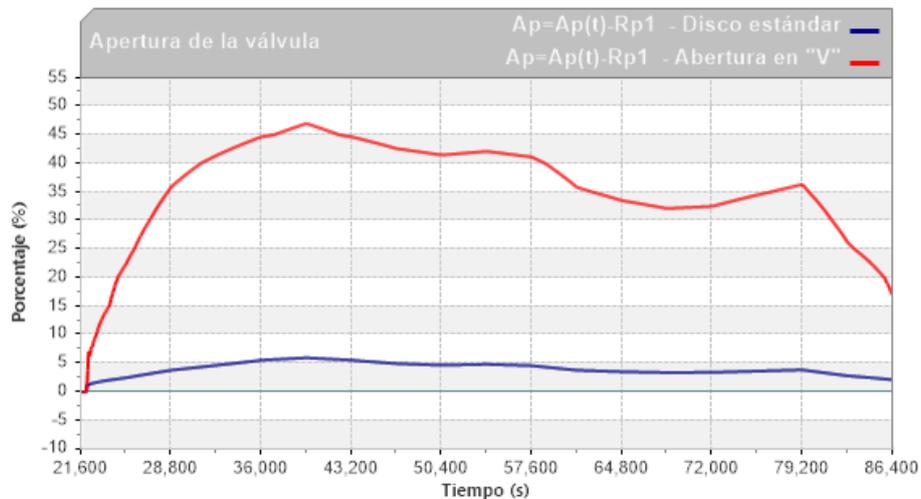


Figura 5-34: Comparación de la apertura de la válvula en "V" y en disco estándar

En conclusión, hay que darle la importancia que se merece a la válvula reductora de presión, ya que si se instala una válvula con pequeños coeficientes de pérdidas k , aunque ésta no afecte a la recuperación de energía del sistema, su grado de apertura será muy pequeño para poder dar la presión de tarado aguas abajo, siendo esta una situación indeseable.

Las válvulas al tener que trabajar con escasa apertura y caudales considerables corren el riesgo de no actuar correctamente. Además, si la velocidad en el interior de la válvula aumenta debido a la reducción de la sección de paso al trabajar con escasa apertura del obturador, puede llegarse hasta la presión de vapor, apareciendo el indeseable fenómeno de la cavitación, tal y como se ha estudiado en el apartado anterior.

En cambio con coeficientes de pérdida k mayores la válvula no tendrá que permanecer tan cerrada, alejándose de la posible situación de cavitación, y trabajando en condiciones más aceptables para su correcto funcionamiento.

De todos modos hay que tener en cuenta que el análisis sobre la cavitación tanto de la válvula con el obturador en "V" como de la válvula con disco estándar, debe realizarse utilizando sus correspondientes curvas de cavitación, siendo el estudio realizado en este trabajo una estimación debido a la falta de información específica sobre la válvula.

6 ALTERNATIVAS DE INSTALACIÓN DE LA PAT

Se estudian otras posibles alternativas de instalación de la bomba trabajando como turbina. En un principio se decidió colocar la PAT en paralelo a la VRP debido a que de este modo la red funcionará correctamente siempre y cuando circule agua a través de la VRP de forma que ésta pueda imponer la presión de tarado aguas abajo.

En este capítulo se estudiará la posibilidad de colocar en serie la PAT aguas arriba de la VRP, describiendo las ventajas y desventajas que tiene este tipo de instalación y analizando su afección al sistema. Por último se modela la eliminación de la VRP de tal forma que únicamente exista instalada la PAT circulando todo el caudal demandado por la red a través de ella.

6.1 Colocación en serie de la PAT

Siguiendo la misma metodología que en el caso de situar la bomba en paralelo a la VRP, se estudia la posibilidad de situarla en serie, aguas arriba de la misma, existiendo un by-pass por el que circulará el agua en caso de tener que aislar la PAT por mantenimiento como aparece en el esquema de la Figura 6-1:

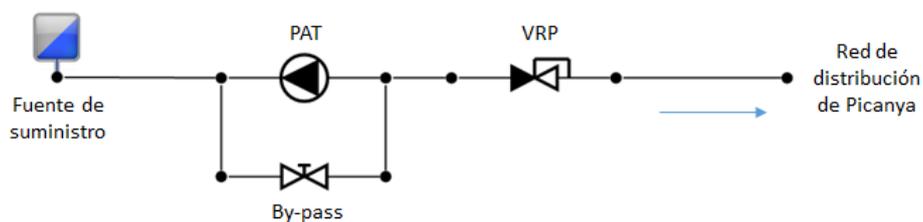


Figura 6-1: Esquema de la PAT en serie con la VRP

En esta situación si la pérdida de carga introducida por la bomba tiene como consecuencia una presión en la entrada de la VRP menor que la presión de tarado, esta permanecerá completamente abierta y las presiones a la salida serán menores que la de consigna. Por lo tanto, la presión en la cabecera de la red disminuirá corriendo el riesgo de no satisfacer las presiones de servicio a los usuarios.

Se estudia los puntos de funcionamiento extremos del rango de puntos de funcionamiento estudiados en el apartado anterior (Figura 5-11), siendo los resultados desfavorables, ya que con ninguno de ellos se consigue una recuperación de energía compatible con un correcto funcionamiento de la red, obteniendo presiones negativas a la salida de la VRP con los puntos

de funcionamiento 11,8 l/s - 9,5 m; 11,8 l/s - 11,5 m y 43,12 l/s - 12,5 m, (Tabla 6-1). Mientras que con el punto óptimo de funcionamiento 43,12 l/s – 9,5 m, se consigue mantener la presión de tarado aguas abajo de la VRP, pero la energía obtenida es positiva, es decir, habría que aportar energía a la bomba para que esta funcione bajo las condiciones definidas, por lo que el resultado no sería válido:

Tabla 6-1: Energía obtenida en los puntos de funcionamiento estimados extremos con la PAT en línea

Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend.	Energía (kWh)
11,8	9,5	1,466	0,75	-144,13
43,12	9,5	5,358	0,75	3,53
11,8	11,5	1,775	0,75	-184,7
43,12	12,5	7,050	0,75	-6,67

Tras los resultados desfavorables anteriores, se decide probar con una serie de puntos de funcionamiento óptimo teniendo presente que en esta ocasión, al situarse la bomba aguas arriba de la VRP, todo el caudal circulará a través de ella, por lo que se analizan caudales representativos de la red como son el caudal mínimo, medio y máximo para una altura de bombeo pequeña como son 5 m (Tabla 6-2), observando que la energía recuperada únicamente es válida en el punto de funcionamiento 29,6 l/s – 5 m siendo de **-11,32 kWh**. En el punto 43,1 l/s - 5 m la energía obtenida es positiva, siendo necesaria la aportación de energía a la bomba, mientras que con el punto 14,2 l/s - 5 m la presión a la salida de la VRP es negativa, y por lo tanto no es válida.

Tabla 6-2: Primeros puntos óptimos de funcionamiento simulados con la PAT en línea

Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend.	Energía (kWh)
29,6	5	1,937	0,75	-11,32
43,1	5	2,820	0,75	5,37
14,2	5	0,930	0,75	-49,3

Observando que el único caudal con el que se obtiene una energía aceptable es el caudal medio, se decide probar con caudales de 20, 25 y 30 l/s. En cuanto a la altura de bombeo, como la pérdida de carga que debe introducir la bomba debe ser la menor posible, de forma que la VRP siga regulando para dar la presión de tarado en la cabecera de la red, se prueba con alturas de bombeo alrededor de los 5 m, como son 4, 5, 6 y 7 m. Con esto, finalmente se estudian los puntos que aparecen en la Tabla 6-3, donde también se puede ver la energía recuperada. Del mismo modo que en ocasiones anteriores las energías marcadas con un asterisco indican que son incompatibles con el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla 6-3: Segundos puntos óptimos de funcionamiento simulados con la PAT en línea

Q (l/s)	H (m)	P (kW)	Rend.	Energía (kWh)
25	4	1,308	0,75	-21,09
25	5	1,635	0,75	-22,4
25	6	1,962	0,75	-20,41*
25	7	2,289	0,75	-27,34*
30	4	1,570	0,75	-10,39
30	5	1,962	0,75	-10,12
30	6	2,354	0,75	-14,15
30	7	2,747	0,75	-16,05*
20	4	1,046	0,75	-29,1
20	5	1,308	0,75	-25,67*
20	6	1,570	0,75	-33,96*

Una vez estudiados estos puntos se extrae que las mayores recuperaciones de energía compatibles con el correcto funcionamiento de la red se dan para alturas de bombeo de 4 m, dándose la máxima recuperación para un caudal de 20 l/s, con un valor de **-29,1 kWh**. Con estas premisas, se decide probar puntos de funcionamiento con altura de 4 m y caudales menores de 20 l/s, como los que aparecen en la Tabla 6-4, siendo la máxima energía recuperada de **-30,45 kWh** obtenida con el punto de funcionamiento óptimo Q=19,5 l/s, H=4 m, P=1,02 Kw y $\eta=75\%$. El resto de energías que aparecen marcadas con un asterisco, aunque superiores, se descartan por establecer presiones menores a la de tarado a la salida de la VRP.

Tabla 6-4: Terceros y últimos puntos óptimos de funcionamiento simulados con la PAT en línea

Q (l/s)	H (m)	P (kW)	Rend.	Energía (kWh)
15	4	0,785	0,75	-33,67*
17,5	4	0,916	0,75	-32,29*
19	4	0,994	0,75	-31,29*
19,5	4	1,020	0,75	-30,45

Este punto servirá de referencia para encontrar una curva del fabricante de condiciones similares a las estudiadas, por lo que tampoco es necesario aproximar más el estudio de dicho punto.

Se han buscado bombas que proporcionen puntos óptimos de funcionamiento próximos al estudiado, no encontrando ninguna curva que proporcione recuperación de energía al sistema, junto a un correcto funcionamiento de éste.

Dada la dificultad de encontrar fabricantes que aporten alturas tan pequeñas para caudales de un orden de magnitud considerable, y teniendo en cuenta las consecuencias que puede

tener para el sistema de distribución una excesiva pérdida de carga de la PAT que haga que la VRP no pueda mantener la presión de consigna aguas abajo, esta es una opción que se descarta, pese a estimar que se puede obtener una mayor recuperación de energía con el punto de funcionamiento óptimo estimado que aparece en la Tabla 6-4.

6.2 Eliminación de la VRP

Por último se estudia la eliminación de la VRP, es decir, todo el caudal circulante circulará por la bomba en todo momento, existiendo un by-pass por el que circulará el agua en caso de tener que aislar la PAT por mantenimiento, (Figura 6-2):

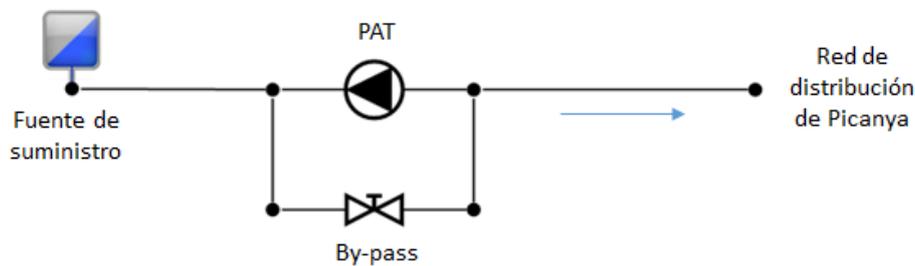


Figura 6-2: Esquema de la PAT sin VRP

De esta manera la presión aguas abajo de la bomba será la misma que la presión de entrada establecida por la red básica metropolitana menos las pérdidas de carga introducidas por la bomba funcionando como turbina.

Por lo tanto el objetivo será encontrar un punto óptimo de funcionamiento tal que permita una presión aguas abajo de la PAT que se considere aceptable para la red, junto a la mayor recuperación de energía posible. En este caso, al eliminar la VRP, las presiones de entrada a la red no serán constantes, variando según la demanda de los usuarios.

Se estudia en primer lugar la recuperación de energía obtenida con la bomba 50-16/φ135 seleccionada para el escenario diurno del capítulo 5.3, obteniendo una energía de -150,89 kWh incompatible con el correcto funcionamiento de la red, ya que en gran parte del día las presiones a la salida de la PAT son negativas.

Tras la experiencia que aportan los puntos de funcionamiento estudiados hasta ahora para las diferentes situaciones planteadas, y con la intención de mejorar la energía recuperada cabe pensar que para cumplir el objetivo de trabajar únicamente con la bomba trabajando como turbina se deberá utilizar un punto de funcionamiento óptimo con una baja altura de bombeo

y un caudal considerable. Por ello se analiza el sistema con un punto óptimo de funcionamiento cuya altura de bombeo es de 5 metros y un caudal próximo al caudal medio consumido por la red, 30 l/s, con una potencia de 2 kW que permite trabajar a la bomba con un rendimiento del 73,58%, recuperando así una energía de **-10,31 kWh**.

Con esta bomba las presiones a la salida en los momentos de mínima demanda superan los 50 mca, siendo las presiones mínimas superiores a 45 mca, tal como puede verse en la Figura 6-3. Esto quiere decir que no existe una gran oscilación de presiones en cabecera, no obstante no se consigue una mayor recuperación de energía que en el caso de instalar la PAT en paralelo a la VRP, cuestionando además la mejora de la eficiencia energética del sistema puesto que al existir un aumento de las presiones en cabecera existirá un mayor volumen de agua fugado, así como una mayor pérdida por fricción.

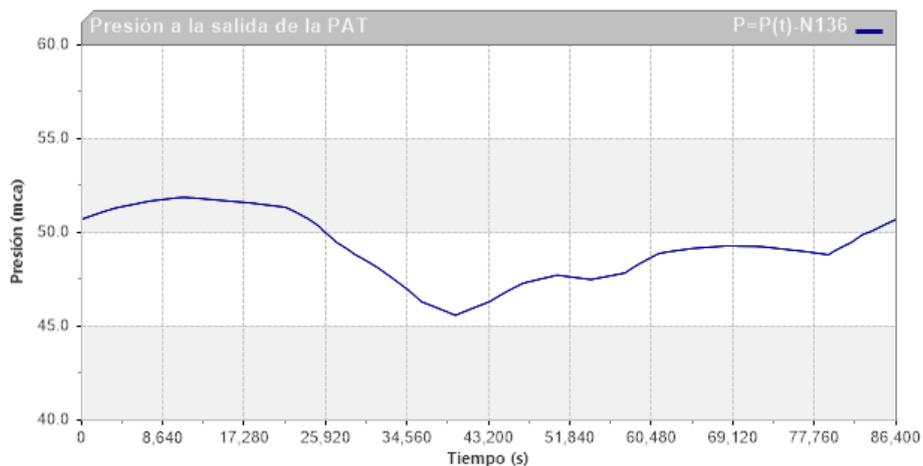


Figura 6-3: Presión a la salida de la PAT (Q=30 l/s; H=5m; P=2kW)

Se intenta mejorar la energía recuperada por la PAT, obteniendo diversos puntos óptimos de funcionamiento que comprometen la presión de servicio de los usuarios, 27 mca. Finalmente se llega al punto óptimo de funcionamiento que aparece en la Tabla 6-5, el cual permite recuperar una energía de **-25,78 kWh** a costa de ofrecer unas presiones a la salida de la PAT en el momento de máxima demanda de alrededor de 36 mca, tal y como puede verse en la Figura 6-4.

Tabla 6-5: punto óptimo de funcionamiento estudiado sin VRP

Rendimiento óptimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)
20	2	0.55	71.35

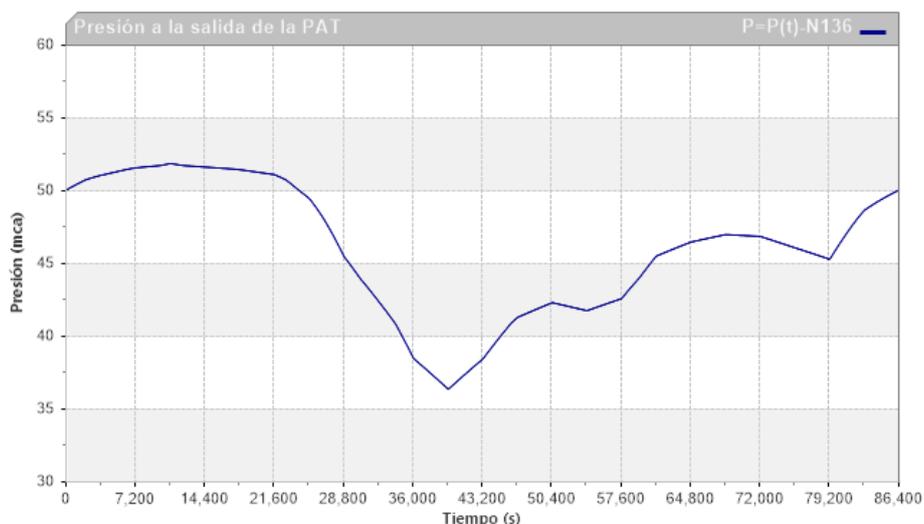


Figura 6-4: Presión a la salida de la PAT ($Q=20$ l/s; $H=2$ m; $P=0,55$ kW)

Estas presiones de salida permiten dotar de una presión superior a 30 mca al nudo más desfavorable del sistema (cd2) como puede verse en la Figura 6-5, satisfaciendo por lo tanto la presión de servicio requerida (27 mca).

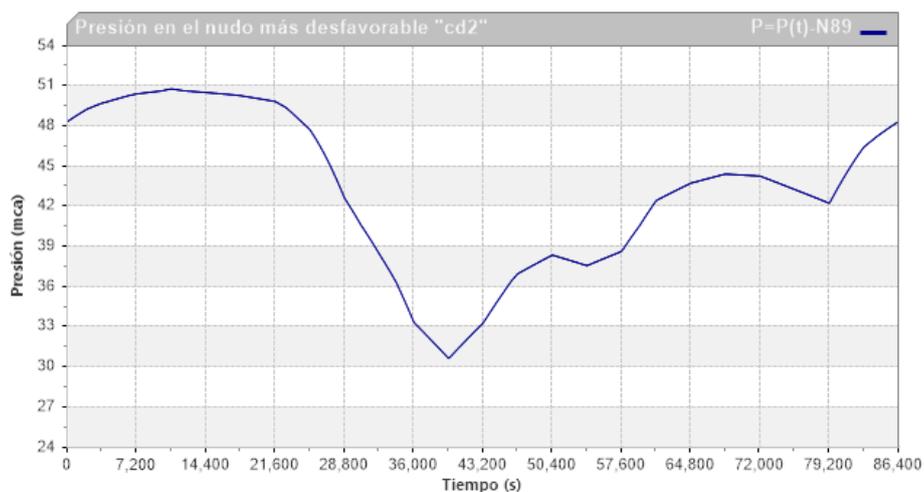


Figura 6-5: Presión en el nudo más desfavorable de la red "cd2"

No obstante se descarta instalar una bomba similar a esta, en primer lugar por la dificultad de encontrar un fabricante que ofrezca un punto óptimo de funcionamiento similar a éste, y en segundo lugar debido a que la red está preparada para trabajar con unas presiones de cabecera constantes e iguales a 39,5mca durante el día y de 29,5 mca durante la noche, cuestionando el correcto funcionamiento de la red, y la mejora de la eficiencia energética del sistema aun recuperando una mayor energía con la PAT.

7 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Con todos los análisis y simulaciones del modelo realizadas hasta ahora, se concluye que la mejor opción para instalar una bomba funcionando como turbina en la red de distribución de Picanya, es instalar dos PATs en paralelo a la válvula reductora de presión, la cual dispone de un obturador con apertura en "V".

Se ha comprobado que al instalar la PAT en línea con la VRP, o incluso con la eliminación de la VRP, se puede conseguir recuperar una mayor energía, pero estas actuaciones ponen en riesgo el cumplimiento de la presión de referencia en los nudos de consumo, ya que las presiones aguas abajo de la VRP serán diferentes a las del tarado actual. Por ello se decide instalar la PAT en paralelo a la VRP preservando de esta forma las condiciones actuales de funcionamiento. No obstante, la posibilidad de instalar la PAT en línea, e incluso eliminar la VRP, es una posibilidad a tener en cuenta siempre que se estudie en profundidad si el sistema es capaz de trabajar correctamente con las presiones dadas en cabecera.

Una de las bombas utilizadas para funcionar como turbina será la bomba NE620/φ200, (Figura 5-28), funcionando en el escenario nocturno (00:00 – 06:00) y encargada de recuperar 4,85 Kwh/día, teniendo en cuenta el rendimiento de la bomba y del motor. La otra PAT a instalar será la bomba 50-16/φ135, (Figura 5-18), encargada de recuperar una energía de 14,74 kWh/día en el escenario diurno (06:00 – 24:00). Por lo tanto se puede concluir que la recuperación de energía producida en un día por las PATs instaladas será próxima a 19,6 kWh/día.

De la auditoría energética realizada en el capítulo 4, se extrae que antes de instalar las PATs, la energía disipada en la VRP era de 97,28 kWh/día representando un 21,13 % de la energía total consumida. Tras estimar una recuperación de energía de 19,6 kWh/día se puede concluir que esta energía disipada en las válvulas se verá reducida hasta los 77,68 kWh pasando a representar el 16,87 %. Por lo tanto la energía recuperada por las PATs será del 4,26 % respecto de la energía total consumida. El resto de energías consumidas no se verán afectadas, puesto que la presión aguas abajo de la VRP se mantiene constante e igual a la presión de tarado, por lo tanto no existe afección a pérdidas por fricción (7,71 % de la energía total consumida) ni a las pérdidas debidas a fugas (15,93 % de la energía total consumida). De esta manera la nueva auditoría energética del sistema quedaría tal y como aparece en la Tabla 7-1:

Tabla 7-1: Auditoría energética tras la instalación de las PATs

Energía entregada a los usuarios	254,284 kWh/día	(55,23 %)
Energía disipada por fricción	35,474 kWh/día	(7,71%)
Energía disipada en las válvulas	77,694 kWh/día	(17,87%)
Energía recuperada en las PAT	19,59 kWh/día	(4,26 %)
Energía perdida a través de las fugas	73,326 kWh/día	(15,93%)
Energía total consumida 460,368 kWh/día		

Tras realizar el estudio de la red de distribución de Picanya con la incorporación de estas dos bombas funcionando como turbina como medio de mejora de la eficiencia energética del sistema, se concluye que existen diferentes factores a tener en cuenta para obtener la mayor recuperación de energía posible a través de las PATs instaladas en cabecera.

Algunos de estos factores se han estudiado en profundidad en este trabajo, principalmente los factores técnicos, tales como la elección del mejor punto óptimo de funcionamiento de la bomba, las diferentes posibilidades de instalación de las PATs o el estudio a realizar de la VRP en el sistema.

En cambio existen otros factores de suma importancia que deberían tenerse en cuenta, y en los que no se ha entrado en profundidad debido a que bien podría servir como línea de trabajo paralela al estudio realizado. Se trata de factores económicos, ya que es necesario realizar un estudio económico que permita establecer la viabilidad de la instalación de las PATs, ya que no hay que olvidar que la energía final total recuperada en el sistema es de 19,60 kWh, una energía no muy elevada, y por lo tanto difícil de servir como argumento para su instalación si el coste que conlleva es elevado, más aun teniendo en cuenta que de los 19,60 kWh, 4,85 kWh se obtienen con la instalación de una segunda PAT que trabaje en el escenario nocturno, con el consecuente coste de instalación de la misma. De hecho según el informe final realizado por IDAE⁵ en 2011 sobre el análisis del consumo energético del sector residencial en España, el consumo medio de un hogar situado en la zona Mediterránea es de 8.959 kWh al año, es decir, unos 24,5 kWh/día, por lo tanto la energía recuperada mediante las PATs instaladas no llegaría a cubrir las necesidades energéticas de un hogar.

⁵ Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía: www.idae.es

Además es necesario definir cuál va a ser el uso de esta energía recuperada, existiendo dos principales posibilidades, la primera de ellas y la que parece más lógica por la cantidad de energía recuperada, es almacenar esta energía en baterías para autoconsumirla en la propia instalación (iluminación de casetas, sistema de telemando...), sin ser necesaria la contratación de un nuevo punto de suministro eléctrico. Otra posibilidad es inyectar la energía recuperada directamente en la red. En tal caso se evitaría una emisión de 7,3 kg CO₂/día correspondiente a la generación de la energía recuperada (19,60 kWh/día), considerando un factor de emisión de CO₂ sobre el consumo final de electricidad de 0,357 kgCO₂/KWh, dato publicado en 2014 de manera conjunta por el Ministerios de Industria, Energía y Turismo, y Ministerio de Fomento en el documento Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria.

Tal como se ha dicho en el capítulo 2, actualmente el riego de jardines municipales se realiza con agua potable, existiendo un proyecto para realizar una red de riego que parta desde el antiguo pozo y permita regar los jardines municipales con agua de un acuífero que tiene un elevado contenido en nitratos. Por lo tanto otra de las posibilidades de uso de la energía recuperada por las PATs, sería alimentar la bomba encargada de extraer el agua del acuífero, permitiendo con este proyecto ahorrar el agua potable con la que actualmente se riegan los jardines municipales y la energía necesaria para ello. Además la distancia entre las PATs y el pozo es de unos 250 m, por lo que parece un proyecto viable que podría estudiarse en un futuro, aunque habría que tener en cuenta que el volumen de agua inyectado al municipio sería menor, afectando a la recuperación de energía que se ha estimado en el proyecto, por lo que habría que analizar si bajo estas nuevas condiciones se recuperará energía suficiente para alimentar la bomba.

Pese a no haber entrado en profundidad en estos aspectos, no hay que olvidar que la principal ventaja que introduce el estudio realizado radica en la posibilidad de seleccionar una bomba para operar en el modo turbina y estimar su comportamiento sin necesidad de realizar pruebas en laboratorio, tan solo simulando la instalación de la PAT con el modelo matemático de la red, pudiendo llegar a estimar la energía recuperada y la afección que introduce al sistema. Siendo esta información desconocida en multitud de ocasiones que se desea instalar una PAT en un sistema debido a que no existe información en los catálogos de los fabricantes del funcionamiento de la bomba fuera del primer cuadrante.

Una de las principales ventajas que proporciona el estudio realizado, es que con la simulación mediante las curvas universales de la bomba escogida, se puede predecir el comportamiento de la bomba funcionando como turbina.

A partir de este trabajo se puede extraer una clara metodología a seguir que permite calcular la energía recuperable por una PAT, y los pasos a llevar a cabo para seleccionar la bomba que mayor recuperación de energía proporcione. Las conclusiones obtenidas mediante este proceso son el paso inicial, que acompañadas del correspondiente estudio económico y de viabilidad, permitirá decidir la idoneidad de instalar elementos que permitan recuperar energía en cualquier sistema de distribución. Esta metodología parte de realizar un primer análisis de la red que permita conocer los datos más importantes de la misma, dicho análisis facilita la realización del modelo matemático del sistema. Una vez realizado el modelo y comprobada su bondad, con la herramienta ITAenergy se puede realizar rápidamente la auditoría energética del sistema, extrayendo de la misma qué medidas a llevar a cabo pueden ser mejores para aumentar la eficiencia energética del sistema.

Si una de estas medidas es la instalación de una PAT, el software ALLIEVI sirve de ayuda para poder simularla haciendo uso de las curvas universales, siendo el principal problema la elección del punto óptimo de funcionamiento requerido. No obstante se ha definido una metodología a utilizar que permite llegar a la estimación del mejor punto óptimo de funcionamiento de la PAT. Esta metodología queda explicada extensamente en el capítulo 5.3, consistiendo en establecer una zona acotada de estudio que puede definirse a partir de las condiciones del abastecimiento de altura y caudal y de las ecuaciones teóricas estudiadas por algunos autores, para después ir acotando cada vez más los puntos de estudio hasta llegar a la estimación de aquel punto óptimo de funcionamiento que proporcione la mayor recuperación de energía, y que servirá de guía para encontrar una bomba real cuyo punto óptimo de funcionamiento sea similar al estimado.

A modo de resumen puede verse en la Tabla 7-2 la mejora de la energía simulada siguiendo la metodología explicada, para el caso concreto del estudio:

Tabla 7-2: Resumen de las energías recuperadas con la metodología establecida

	Energía recuperada (kWh/día)		
	Escenario diurno (06:00-24:00)	Escenario nocturno (00:00-06:00)	Total
Ecuaciones teóricas	7,29	2,96	10,25
Acotación de puntos óptimos	13,01	3,33	16,34
Curvas reales de fabricante	14,74	4,85	19,59

En el caso de la red de distribución de Picanya se partió de una recuperación de energía de 10,25 kWh obtenida con puntos óptimos de funcionamiento teóricos estimados a partir de las condiciones de abastecimiento y de ecuaciones teóricas, llegando a una recuperación de energía final del sistema de 19,59 kWh, obtenida con la instalación de dos bombas reales.

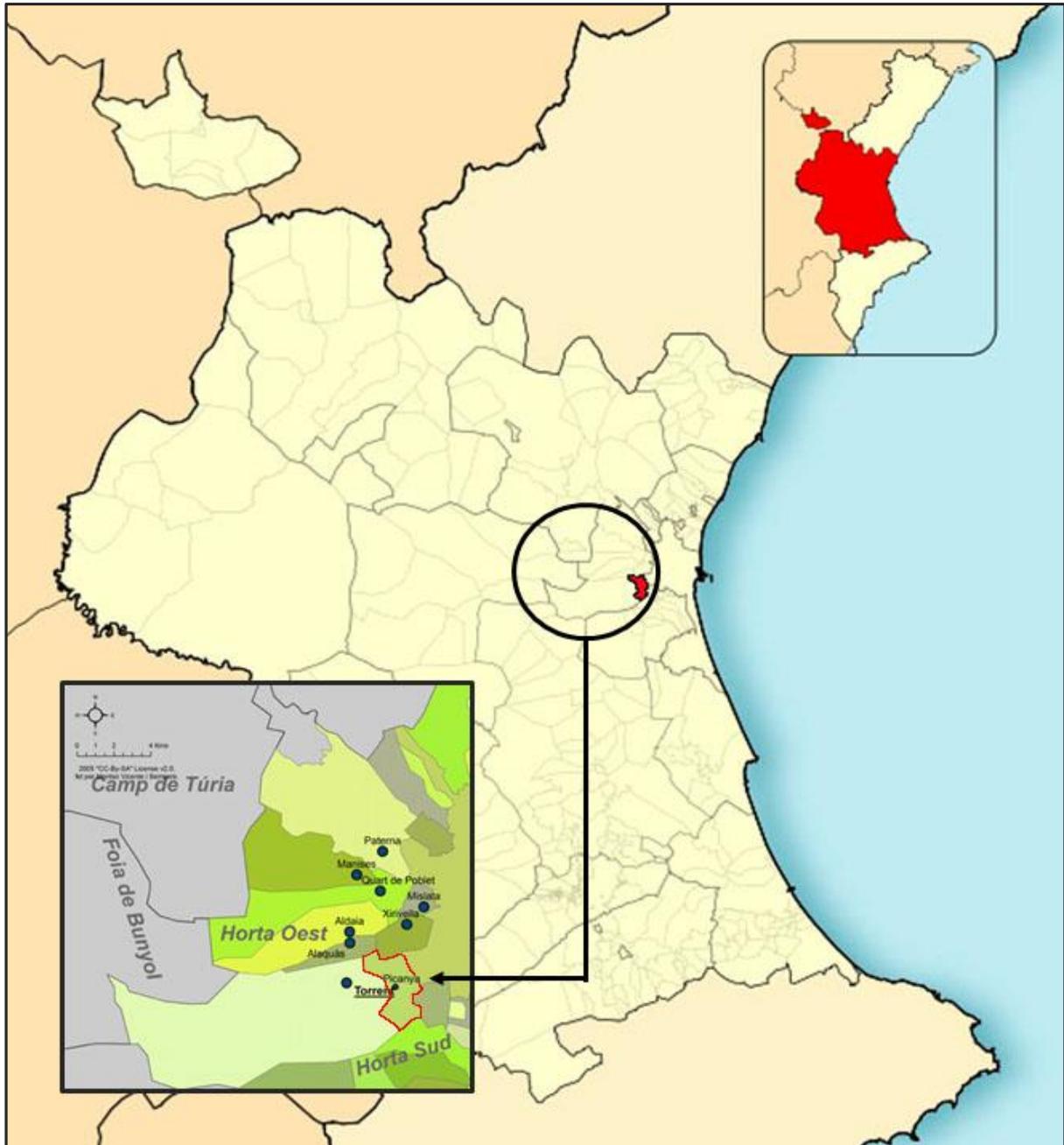
En definitiva, con la simulación de la PAT en el modelo de ALLIEVI se ha podido incrementar en casi el doble la energía recuperada estimada a través de ecuaciones teóricas. Si bien es cierto, el proceso es algo costoso y lento debido a que para cada punto óptimo de funcionamiento de la bomba hay que realizar la simulación del modelo, con el tiempo que esto conlleva. Por lo que una futura línea de investigación, podría ser automatizar todo el proceso realizado e incluirlo en ALLIEVI.

De esta manera se podría implementar en ALLIEVI la realización de la auditoría energética a partir del modelo creado, sirviendo de ayuda a la toma de decisiones sobre que estrategia utilizar para mejorar la eficiencia energética de la red. En el caso de decidir instalar una PAT, una opción que podría ser interesante en la mejora del software, sería simular varios puntos de funcionamiento simultáneamente, arrojando como resultado la energía recuperada para cada uno de ellos. Esta acción permitiría acotar rápidamente el punto óptimo de funcionamiento de la PAT que permita recuperar una mayor energía en la red.

Por último, cabe destacar que la metodología utilizada en este trabajo podría llevarse a cabo en cualquier abastecimiento. Previendo que en aquellos lugares donde la presión de entrada sea muy elevada, y por lo tanto la VRP deba introducir una mayor pérdida de carga, se conseguirá una recuperación de energía más elevada.

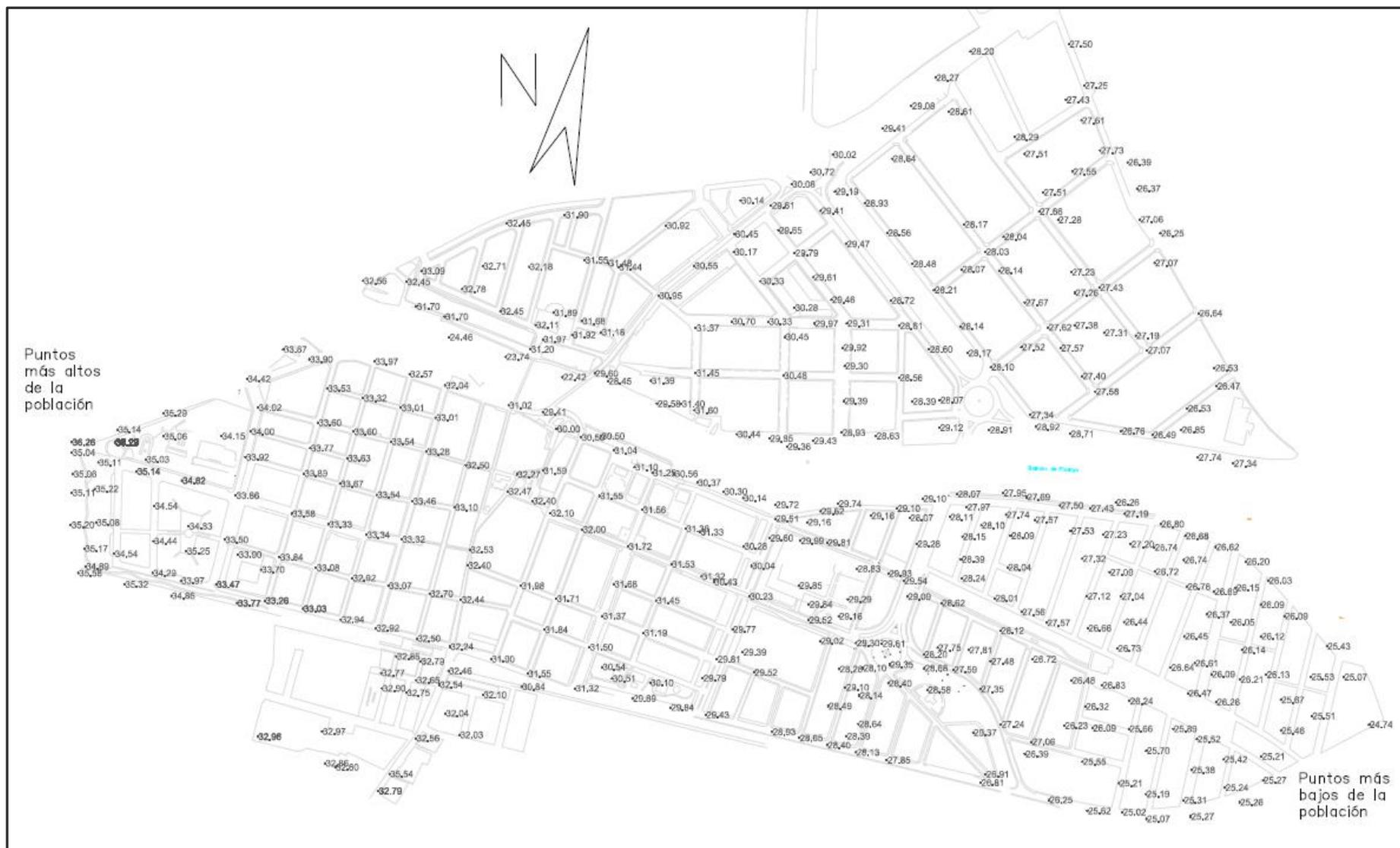
Anejo 1: Planos

Plano 1: Plano de situación



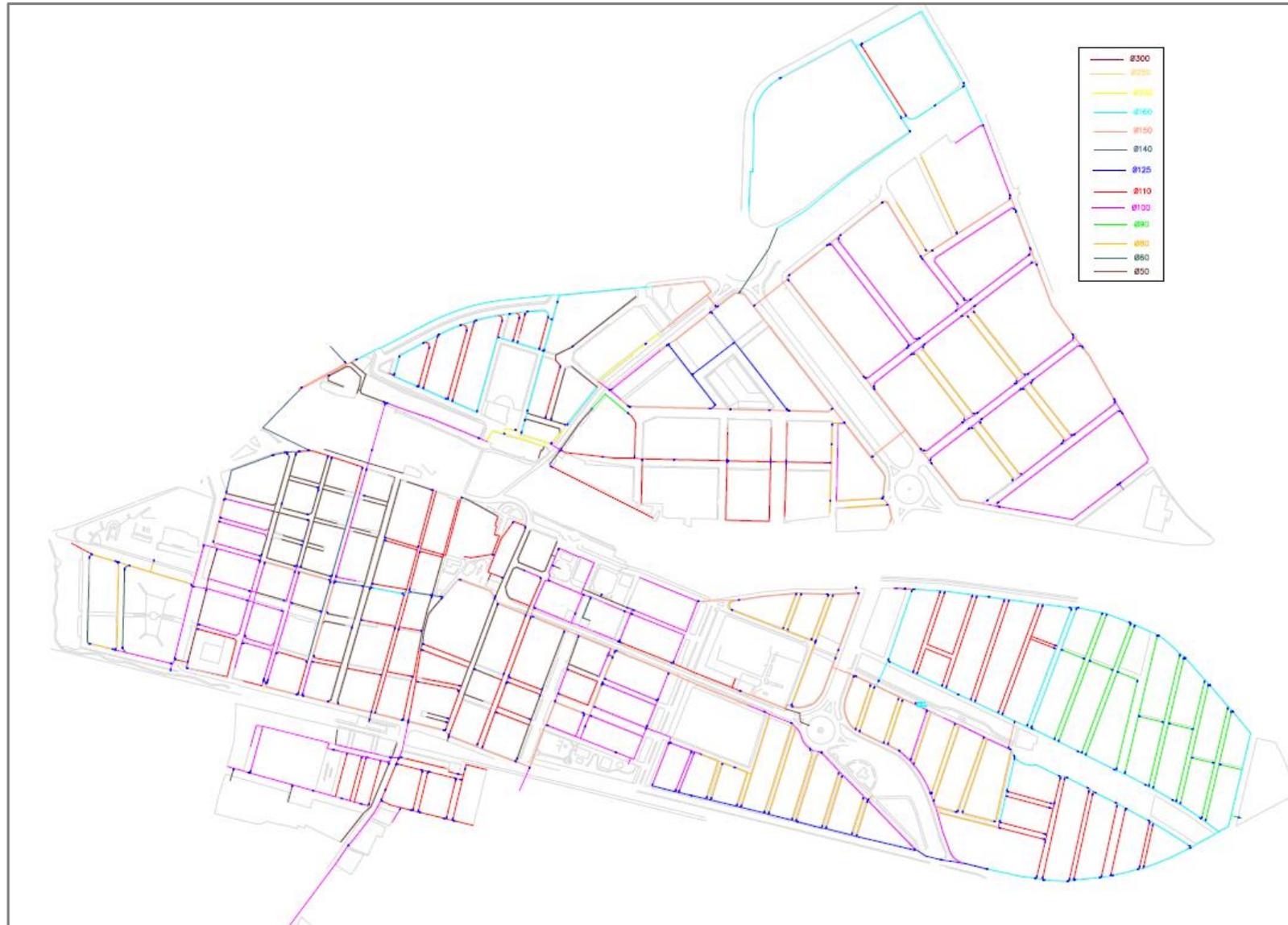
Plano 1: Situación del municipio de Picanya dentro de la Comunidad Valenciana, en la provincia de Valencia, en la comarca de l’Horta Oest

Plano 2: Plano de cotas

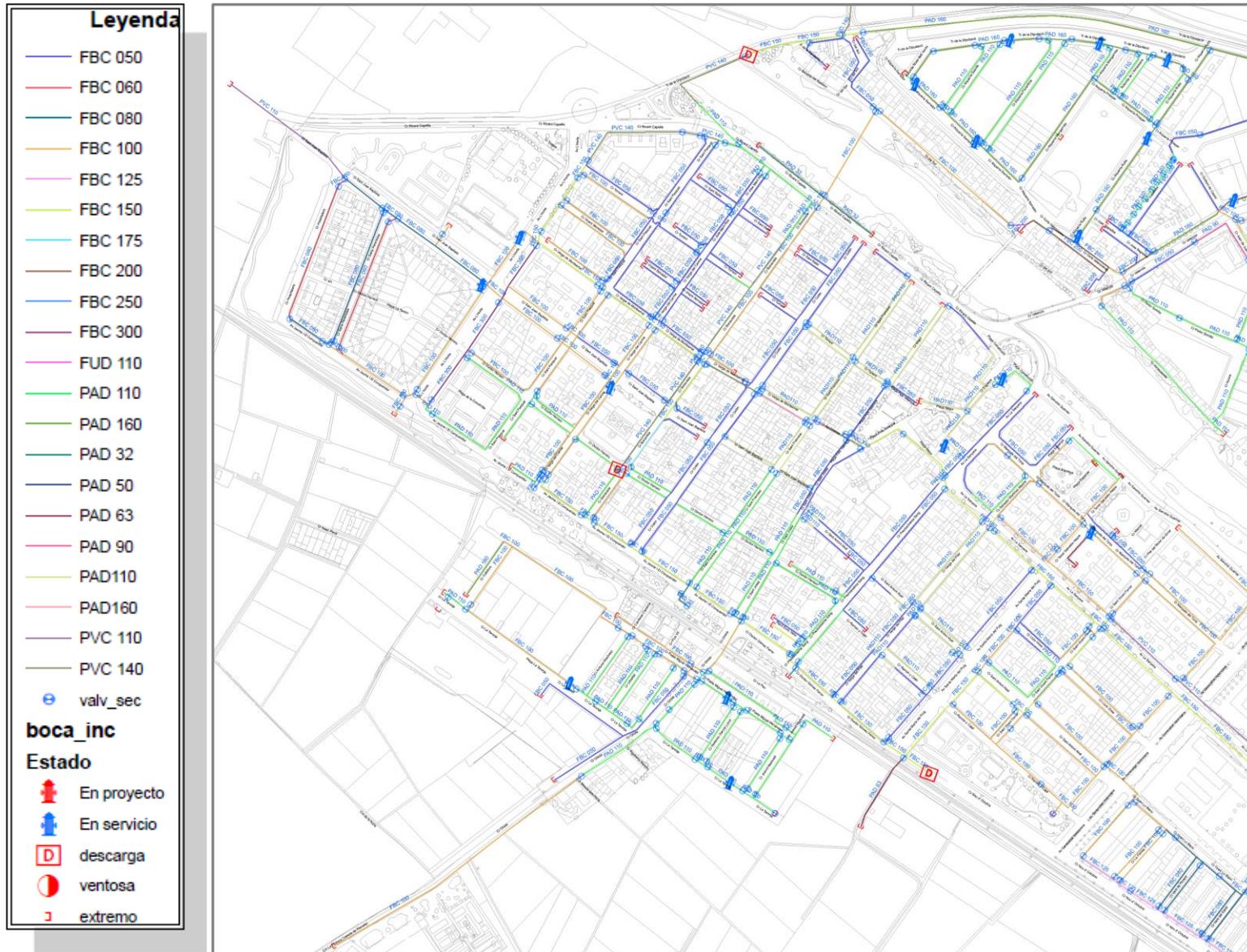


Plano 2: Plano de cotas del municipio de Picanya

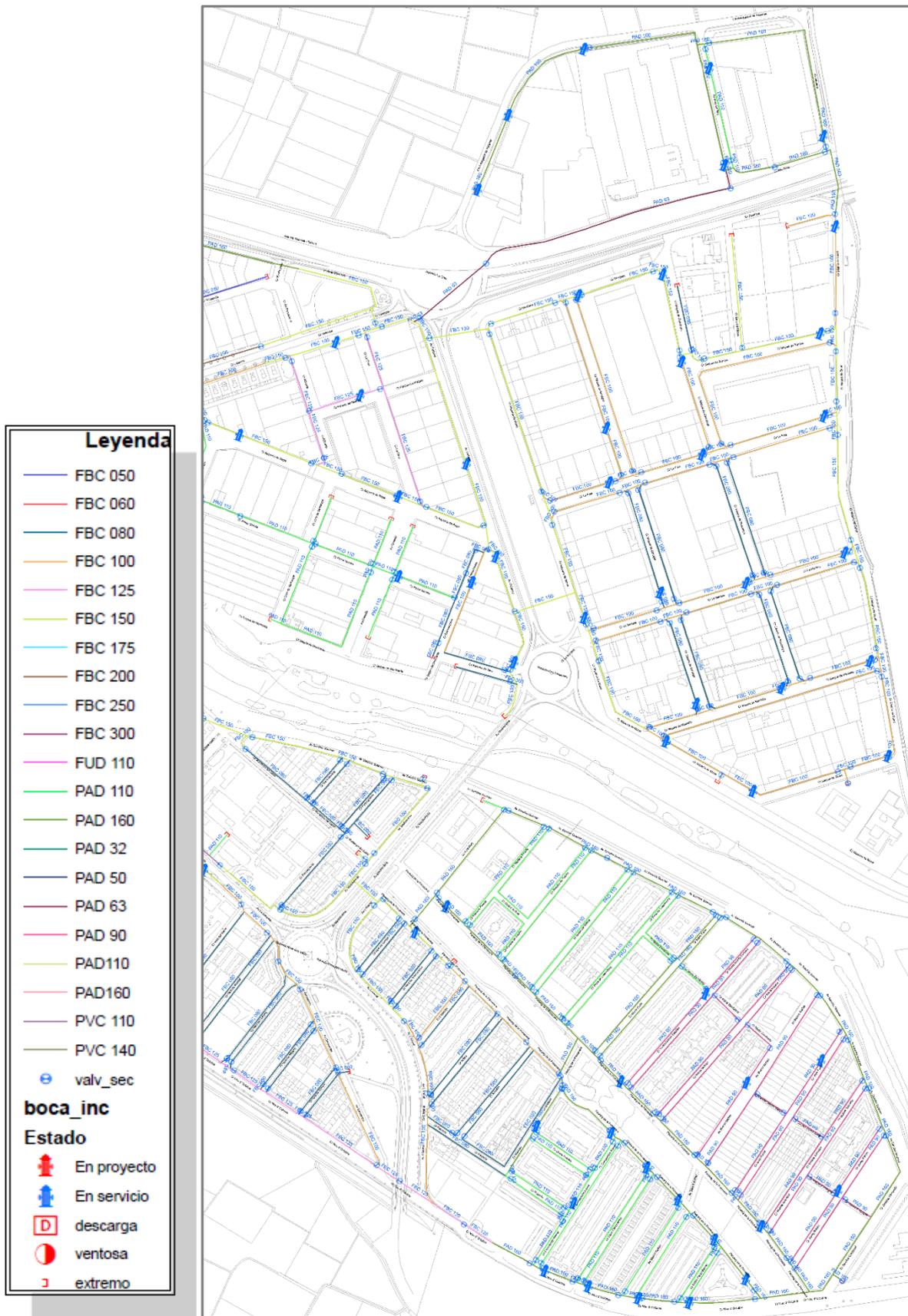
Plano 3: Red de distribución de agua potable



Plano 3: Trazado de la red de distribución de agua potable de Picanya

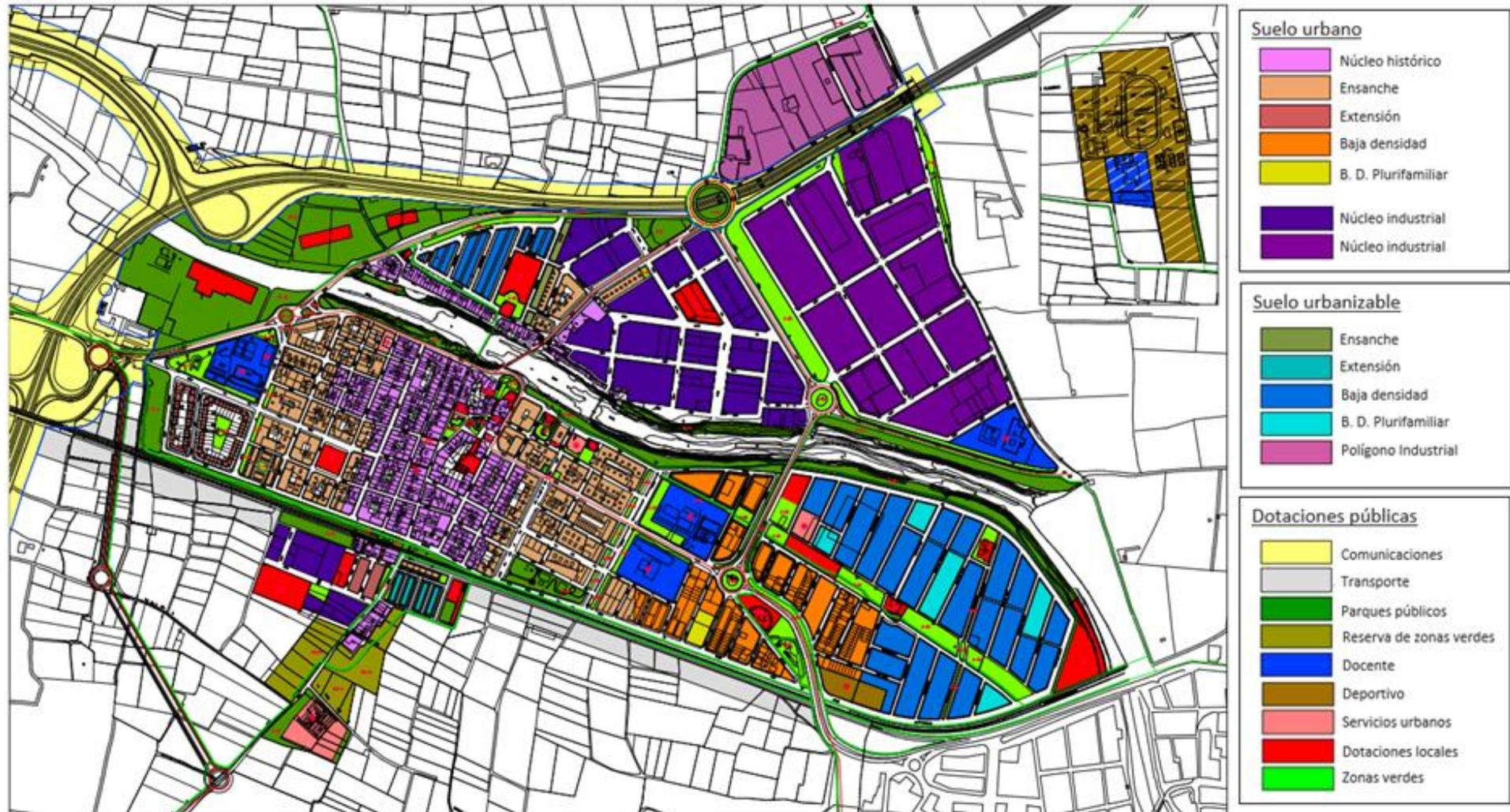


Plano 4: Materiales y diámetros de la red de distribución de agua potable de Picanya (zona oeste)



Plano 5: Materiales y diámetros de la red de distribución de agua potable de Picanya (zona este)

Plano 4: Plano de usos del suelo



Plano 6: Plano de Usos del suelo extraído del Plan General de Ordenación Urbana de Picanya. Escala 1/2000. Fecha sept-2003

Anejo 2: Descripción del modelo en EPANET

En este anejo se encuentran las cotas y demandas base de cada uno de los nudos del modelo (Tabla A 1), así como las longitudes y diámetros de las diferentes tuberías (Tabla A 2). Los nudos con un asterisco (*) indican que el nudo en cuestión tiene dos demandas base diferente.

Tabla A 1: Cotas y demanda base de los nudos

ID Nudo	Cota (m)	Demanda Base (LPS)	ID Nudo	Cota (m)	Demanda Base (LPS)
Conexión n1	33,03	0	Conexión n18	33,46	0
Conexión n2	33,03	0	Conexión n19	33,1	0
Conexión n4	33,89	0	Conexión n23	32	0
Conexión cd1*	33,92	0,945-0,082	Conexión d16	31,38	0,443
Conexión d3	33,47	0,75	Conexión d17	29,8	0,314
Conexión cd2*	34,02	0,245-0,029	Conexión d18	29,06	0,18
Conexión d1	32,94	0,696	Conexión d19	29,54	0,112
Conexión n3	32,92	0	Conexión n24	31,53	0
Conexión d2	33,54	0,622	Conexión c1	29,84	0,344
Conexión n5	33,01	0	Conexión d20	30,43	0,254
Conexión d5	32,57	0,249	Conexión n26	29,52	0
Conexión d4	33,65	0,3	Conexión d24	29,81	0,281
Conexión n6	32,7	0	Conexión d25	29,43	0,23
Conexión p1	32,5	0,554	Conexión d26	28,4	0,13
Conexión d8	31,7	0,143	Conexión pd1*	26,91	0,166-0,042
Conexión d7	31,55	0,204	Conexión d27	29,51	0,157
Conexión n16	31,92	0	Conexión n32	27,24	0
Conexión n17	31,2	0	Conexión n33	26,25	0
Conexión d6	31,7	0,114	Conexión n27	28,85	0
Conexión id1*	29,75	0,550-0,126	Conexión n31	27,46	0
Conexión n11	30,95	0	Conexión d28	27,35	0,363
Conexión n15	31,18	0	Conexión n28	28,62	0
Conexión n7	30,14	0	Conexión n29	28,2	0
Conexión d9	29,61	0,217	Conexión n30	28,12	0
Conexión n8	30,45	0	Conexión n35	27,23	0
Conexión d10	30,95	0,256	Conexión d35	26,85	0,644
Conexión n12	30,33	0	Conexión d29	26,45	0,609
Conexión n10	30,17	0	Conexión d30	25,27	0,438
Conexión n40	29,65	0	Conexión d31	25,42	0,289
Conexión n13	29,31	0	Conexión n36	26,73	0
Conexión n9	29,41	0	Conexión d33	26,8	0,189
Conexión d11	28,61	0,179	Conexión d32	25,43	0,263
Conexión n14	29,18	0	Conexión d34	28,06	0,062
Conexión id2*	28,17	0,162-0,112	Conexión pd2*	28,24	0,197-0,455
Conexión i1	29,19	0,161	Conexión d15	31,55	1,147
Conexión d23	32,24	0,916	Conexión n20	32,5	0
Conexión i2	32,54	7,981	Conexión d13	31,02	0,256
Conexión d22	31,32	0,322	Conexión n21	30	0
Conexión n25	31,37	0	Conexión n37	32	0
Conexión d21	31,19	0,829	Conexión n22	32,1	0
Conexión n65	31,53	0,518	Conexión n34	25,62	0
Conexión d14	32	0,435	Embalse 1	85	No Disponible
Conexión d12	32,5	0,593	Embalse 2	81	No Disponible

Tabla A 2: Longitudes y diámetros de las tuberías

ID Línea	Longitud (m)	Diámetro (mm)	ID Línea	Longitud (m)	Diámetro (mm)
Tubería p3	85,27	100	Tubería p92	137,71	150
Tubería p4	185,85	300	Tubería p93	105,92	100
Tubería p5	91,19	150	Tubería p94	94,98	100
Tubería p6	71,63	150	Tubería p95	124,27	100
Tubería p7	55,86	150	Tubería p96	190,52	125
Tubería p8	134,92	150	Tubería p97	241,27	125
Tubería p11	138,67	140	Tubería p98	128,97	100
Tubería p12	43,36	150	Tubería p99	229,85	100
Tubería p13	87,59	110	Tubería p100	77,99	125
Tubería p14	166,85	140	Tubería p101	42,48	125
Tubería p15	166,29	140	Tubería p102	37,39	150
Tubería p16	85,06	150	Tubería p103	170,78	150
Tubería p18	359,57	160	Tubería p104	23,63	100
Tubería p26	137,29	160	Tubería p105	183,58	100
Tubería p27	74,53	200	Tubería p106	38,87	150
Tubería p28	172,44	100	Tubería p107	68,19	150
Tubería p29	107,91	100	Tubería p108	21	100
Tubería p30	46,45	200	Tubería p109	84,33	100
Tubería p32	43,18	200	Tubería p110	147,8	100
Tubería p33	76,64	160	Tubería p111	45,32	150
Tubería p34	150,79	160	Tubería p116	50,74	160
Tubería p35	109,44	150	Tubería p117	28,32	160
Tubería p36	92,82	150	Tubería p118	340,31	160
Tubería p37	133,7	200	Tubería p119	204,18	160
Tubería p38	21,25	100	Tubería p121	170,1	160
Tubería p45	85,04	150	Tubería p122	349,56	160
Tubería p47	26,81	150	Tubería p123	264,13	160
Tubería p51	121,61	150	Tubería p124	117,95	160
Tubería p52	86,8	150	Tubería p125	43,26	160
Tubería p53	73,63	150	Tubería p126	222,41	160
Tubería p54	204,31	150	Tubería 1	46,9	250
Tubería p55	98,36	150	Tubería 9	71,01	110
Tubería p57	69,81	150	Tubería 10	125,89	110
Tubería p58	68,85	150	Tubería 11	67,01	50
Tubería p59	302,47	150	Tubería 12	149,12	100
Tubería p71	173,55	150	Tubería 13	51	100
Tubería p72	57,99	100	Tubería 14	122,83	110
Tubería p75	208,3	150	Tubería 15	113,32	150
Tubería p76	109,78	150	Tubería 16	65,9	150
Tubería p77	58,99	150	Tubería 17	31,71	50
Tubería p78	110,41	150	Tubería 18	115,49	160
Tubería p79	144,27	150	Tubería 19	331,67	160
Tubería p81	57,57	140	Tubería 20	146,73	100
Tubería p82	63,1	160	Tubería 21	54,87	100
Tubería p83	54,32	140	Tubería 22	117,17	100
Tubería p84	14,09	150	Tubería 23	108,21	150
Tubería p86	143,83	100	Tubería 24	147,2	110
Tubería p87	257,79	150	Tubería 25	67,95	160
Tubería p88	124,55	150	Tubería 26	261,72	160
Tubería p89	207,64	110	Tubería 27	170,08	150
Tubería p90	192,96	150	Tubería 2	91,48	160
Tubería p91	89,57	150	Tubería 4	46,9	250

Anejo 3: Cálculo de energías

Los cálculos energéticos de la red de distribución realizados con el programa ITAenergy siguen las ecuaciones planteadas y explicadas en los artículos Energy Audit of Water Networks (Cabrera, et al., 2010) y Energy Assessment of Pressurized Water Systems (Cabrera, et al., 2015). En este anejo se reproduce parte de lo expuesto en estos artículos con la intención de dejar completamente explicada la metodología utilizada por ITAenergy para realizar la auditoría energética del sistema.

En primer lugar se plantea la ecuación de la energía de forma sintetizada, tal como aparece en la expresión (A- 1):

$$[\text{Energía total aportada} = \text{Energía total consumida}] \quad (\text{A- 1})$$

A continuación se exponen los cálculos que intervienen en cada una de estas energías:

ENERGÍA TOTAL APORTADA: La energía total aportada es la energía total que se inyecta en el sistema, suma de la energía consumida por todas las bombas y la energía aportada de forma natural (energía potencial disponible en los embalses).

Energía aportada por las bombas:

$$E_P(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left(\sum_{i=1}^{n_p} \left(\frac{Q_{Pi}(t_k) \cdot h_{Pi}(t_k)}{\eta_{pi}(t_k)} \right) \right) \cdot \Delta t_k \quad (\text{A- 2})$$

Donde $Q_{Pi}(t_k)$ es el caudal (m^3/s) trasegado por el equipo de bombeo en el instante t_k , $H_{Pi}(t_k)$ es la altura (m) que aporta la bomba, $\eta_{pi}(t_k)$ es el rendimiento hidráulico de la bomba para ese punto de funcionamiento y Δt_k el intervalo considerado de tiempo (s). Este cálculo debe realizarse para el total de las n_p estaciones de bombeo que suministran trabajo de eje al sistema en los diferentes instantes de tiempo k .

Se trata de la energía realmente consumida por las bombas. Aunque inicialmente, las estaciones de bombeo se pueden considerar elementos externos al volumen de control, y por tanto sus rendimientos no tendrían por qué intervenir de manera directa en el cálculo de las energías aportadas, dado que el rendimiento de las bombas es un parámetro fundamental para verificar la eficiencia de un sistema, éste debe ser tenido en cuenta.

En el caso de existir más de una bomba, se desglosa la energía consumida por cada una de las bombas y se especifica en cualquier caso el tiempo de funcionamiento de cada bomba dentro del periodo total de la simulación.

Energía natural: La energía externa suministrada (por embalses), es:

$$E_N(t) = \gamma \cdot \sum_i^{n_N} \left(\sum_k Q_{Ni}(t_k) \cdot H_{Ni}(t_k) \cdot \Delta t_k \right) \quad (A-3)$$

Donde γ es el peso específico del agua, $Q_{Ni}(t_k)$ es el caudal (m^3/s) aportado por el embalse en el instante t_k , $H_{Ni}(t_k)$ es su altura piezométrica (m.c.a.) en el instante t_k , y Δt_k el intervalo de tiempo (s) considerado. Dado que se realiza un análisis en periodo extendido, durante un intervalo de tiempo establecido, hay que sumar los k instantes que integran el periodo de análisis. Si a lo largo del periodo de integración la altura de las fuentes externas es constante, la expresión se simplifica, resultando:

$$E_N(t) = \gamma \cdot \sum_i^{n_N} \forall_{Ni} \cdot H_{Ni} \quad (A-4)$$

Donde \forall_{Ni} es el volumen (m^3) aportado por el embalse i durante todo el periodo de análisis y H_{Ni} es la altura piezométrica (m) del agua en ese embalse. La ecuación anterior refleja la energía entrante en el sistema para el análisis del gasto unitario (en kWh/m^3) en esta fase de distribución, con independencia del historial previo seguido por el agua hasta ingresar en el sistema.

La energía natural sólo contempla la energía (caudal y altura) que se inyecta desde los elementos embalses, en EPANET estos elementos son fuentes de agua infinita a una altura constante. La energía que se inyecta a través de los depósitos en cabecera, o de cola, se engloba dentro del término de energía de compensación (dado que puede ser una energía inyectada o consumida). Esto implica que una red sin embalses (abastecida desde depósitos) no tiene energía natural.

En el caso que exista más de un embalse, se desglosa la energía aportada por cada uno de ellos.

ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA: Se trata de todas las energías salientes de la red. Esta energía puede considerarse como energía útil cuando se entrega a los usuarios en forma de caudal y presión o pérdida, siendo una pérdida toda la energía que se consume y que no se entrega a los usuarios.

Energía útil: Se trata de la energía entregada a los usuarios en los nudos de consumo. El objetivo de una red es satisfacer las necesidades de los usuarios entregando el agua, y la energía asociada a ella. La energía útil entregada es:

$$E_U(t) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{i=1}^n q_{ui}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \quad (A-5)$$

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

Este término es la suma de la energía mínima requerida por los usuarios (E_{uo}), la energía topográfica real (E_{tr}) y la energía de exceso real (E_{er}), en el nudo i en el instante t_k . Términos del diagnóstico energético.

$$E_{uo} = \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{p_0}{\gamma} \right] \quad (A-6)$$

$$E_{ti} = \gamma \sum v_j (z_h - z_j) = \gamma \sum v_j \frac{p_{jt,i}}{\gamma} \quad (A-7)$$

$$p_{ei} = p_{hi} - p_o, \quad E_{ei} = \gamma V \frac{p_{ei}}{\gamma} \quad (A-8)$$

Dado que $H_i(t_k)$, es la altura piezométrica en un nudo genérico i en el instante t_k , y esta es igual a la cota del nudo i (z_i) más la presión mínima de servicio ($\frac{p_0}{\gamma}$) más la sobrepresión que se entrega en cada caso en el nudo por encima de la presión estrictamente necesaria, que puede ser debida a la topografía ($\frac{p_{jt,i}}{\gamma} = (z_h - z_j)$), es decir a la necesidad de entregar la presión

mínima de servicio en el nudo más desfavorable y al exceso de presión ($\frac{p_{ei}}{\gamma}$), presión por encima de la presión mínima de servicio en el nudo más desfavorable.

Por tanto, el término de la auditoría energética correspondiente a la energía entregada a los usuarios en los nudos de consumo, $E_U(t)$, es al mismo tiempo $E_U(t) = E_{uo}(t) + E_{tr}(t) + E_{ei}(t)$. Por lo que este término, aun tratándose de energía útil, pues es presión que se entrega al usuario, puede ser optimizado en la medida que sea posible reducir los valores de energía topográfica y de exceso de energía. El segundo de ellos evitable (exceso de energía), el primero de ellos (energía topográfica) si bien en la mayoría de casos no puede ser evitado, si puede ser reducido con un nuevo planteamiento del diseño del sistema.

En el caso que en algún nudo no se satisfaga la presión de referencia indicada inicialmente antes de realizar el cálculo de la auditoría, se mostrará un mensaje de alerta pues se está reduciendo el consumo energético a costa de incumplir los requerimientos de presión.

En teoría la suma de estos tres términos debe ser igual a la energía entregada a los usuarios, pues realmente lo que se considera es del total de la presión entregada en los nudos de consumo, qué proporción es presión mínima igual a la presión de referencia (Energía mínima requerida por los usuarios), qué cantidad es presión topográfica, es decir aquella que se entrega en los nudos de consumo consecuencia de llegar con la presión de referencia la nudo más alto (Energía topográfica real) y cuanta presión de la entregada en los nudos es realmente un exceso. Se considera exceso de energía toda la que supera a la de referencia en el nudo más desfavorable.

Si estas tres energías no son exactamente la suma de la energía útil, se puede deber o bien a que en algún momento se está incumpliendo la presión de referencia en algún nudo o bien a que en algún momento el nudo más desfavorable en el sistema real deja de ser el más alto.

Energía disipada por fricción: La energía disipada debida al rozamiento del agua con las tuberías del sistema es:

$$E_{rf}(t) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{j=1}^n (q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k)) \cdot \Delta h_j(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \quad (A-9)$$

Donde l es el número de líneas de la red de distribución, $\Delta h_j(t_k)$ la pérdida de carga (m) de la línea j en el instante t_k (este término es la diferencia de alturas piezométricas entre el nudo final e inicial de la tubería j , razón por la cual se precisa el modelo matemático de la red), $q_{uj}(t_k)$ es el caudal de línea j necesario para atender la demanda de los usuarios y $q_{lj}(t_k)$ es el caudal de línea j que finalmente se perderá en fugas. De este modo, el caudal total de la línea j , $q_j(t_k)$, es la suma de los precedentes e igual a:

$$q_j = q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k) \quad (A-10)$$

Las relaciones anteriores evidencian que el caudal fugado genera una pérdida de carga adicional, ya que circula por parte de la red antes de escapar de la misma. La auditoría energética que se propone permitirá conocer el importe de esta energía adicional. Bastará con simular el comportamiento de la red con y sin fugas. Tratándose de un balance global para todo el sistema, y no por líneas, para cada una de ellas se desconoce qué parte es caudal útil, $q_{uj}(t_k)$, y qué parte es caudal de fugas q_{lj} .

Energía disipada en las válvulas: Ésta se debe a las pérdidas de carga que se da en los elementos. En este caso únicamente contempla las pérdidas que se da en los elementos definidos como válvulas en el modelo. Las pérdidas introducidas por medio de coeficientes de pérdidas en las tuberías se suman a las pérdidas por fricción.

Energía perdida a través de las fugas: Las fugas, como resulta habitual al modelar matemáticamente una red, se concentran en los nudos y su valor depende de la presión. Representan una salida de energía del sistema, formalmente análoga a la entregada a los usuarios aunque desde la óptica de la auditoría energético es una energía perdida igual a:

$$E_{rl}(t) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{i=1}^n q_{li}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \quad (A-11)$$

Donde n es el número de nudos con fugas de la red de distribución, $q_{li}(t_k)$ es el caudal fugado (m^3/s) en las tuberías adyacentes al nudo i (y, por tanto, asociadas a él) en el instante t_k , y $H_i(t_k)$ es la altura piezométrica (m) en el instante t_k en el nudo donde se localiza la fuga $q_{li}(t_k)$.

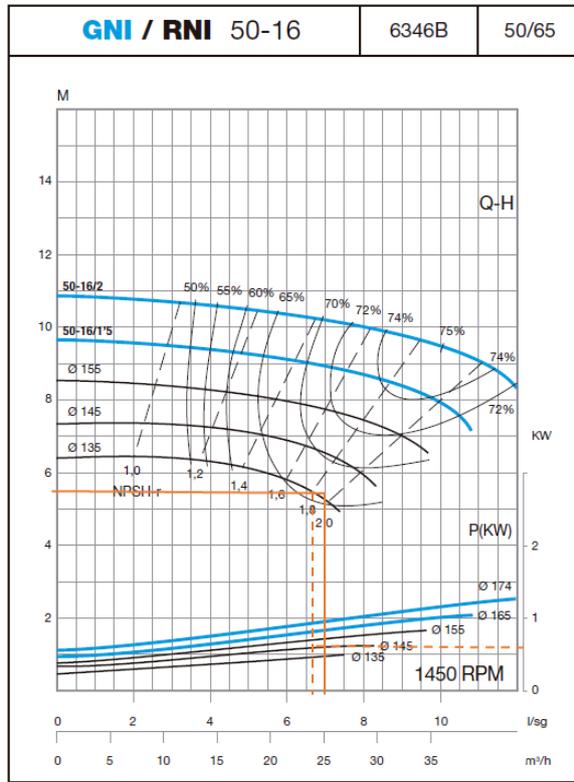
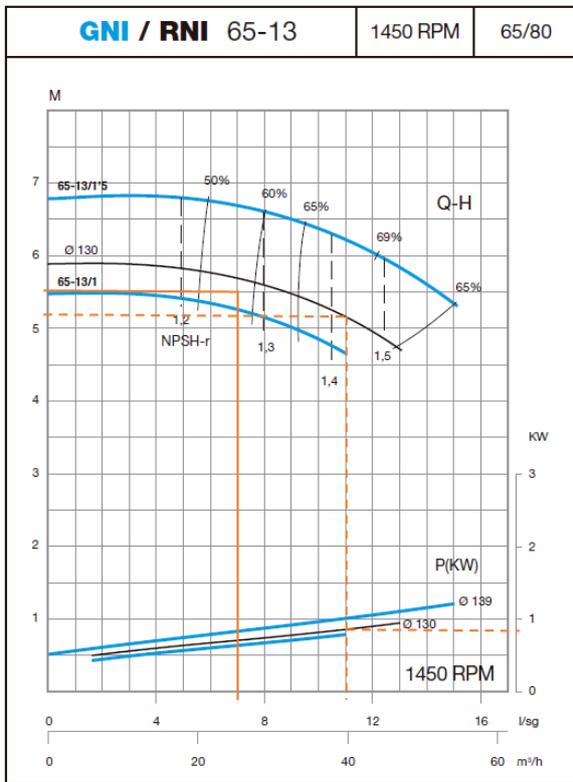
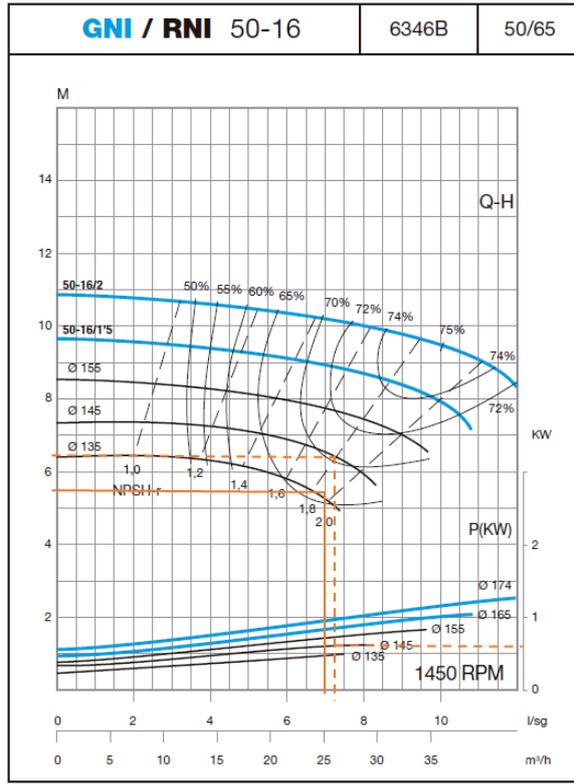
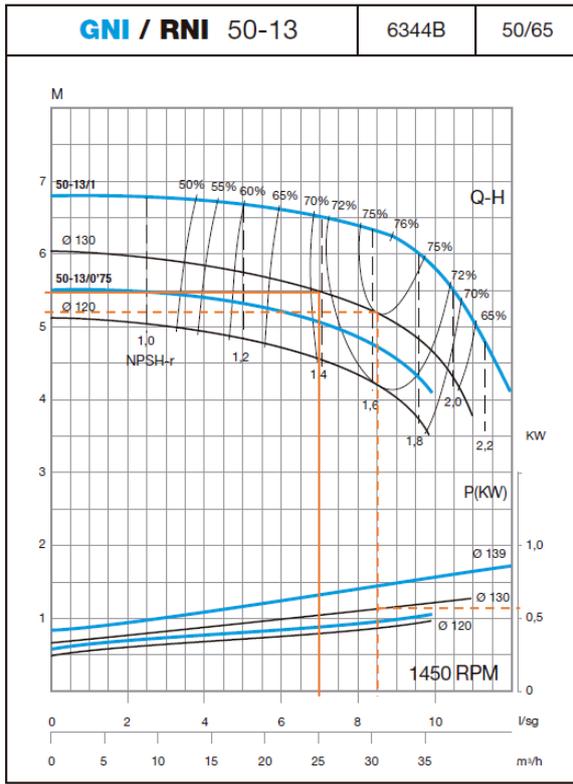
Dado que se calcula a partir del caudal fugado en el modelo (es decir el caudal calculado a partir del valor del coeficiente emisor introducido), los modelos matemáticos que no tengan implementadas las fugas del sistema a través de estos elementos, no obtendrán ningún valor de energía perdida por fugas.

Energía perdida en las bombas: El término de pérdidas de eje, resulta:

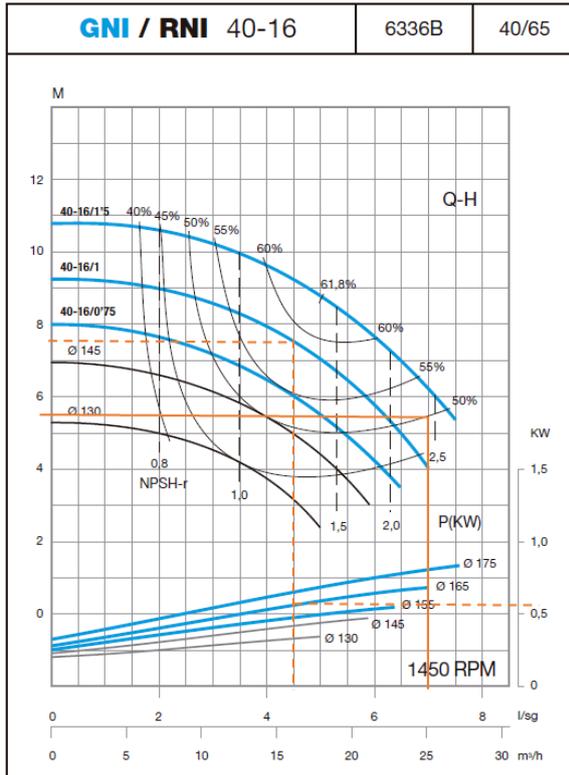
$$E_{rp}(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left(\sum_{i=1}^{n_p} \left(q_{pi}(t_k) \cdot h_{pi}(t_k) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{pi}(t_k)} - 1 \right) \right) \right) \cdot \Delta t_k \quad (A-12)$$

Únicamente se contempla el rendimiento hidráulico de la bomba en cada caso. En EPANET es posible definir este rendimiento o bien a partir de la curva de rendimiento de cada bomba, con lo que el rendimiento se calcula para cada punto de funcionamiento concreto, o bien como un valor global de rendimiento igual y constante para todas las bombas. En el caso que no se defina ninguna curva de rendimiento, el rendimiento que se considera tanto para cuantificar la energía consumida como la perdida es el que se define de forma general para toda la red.

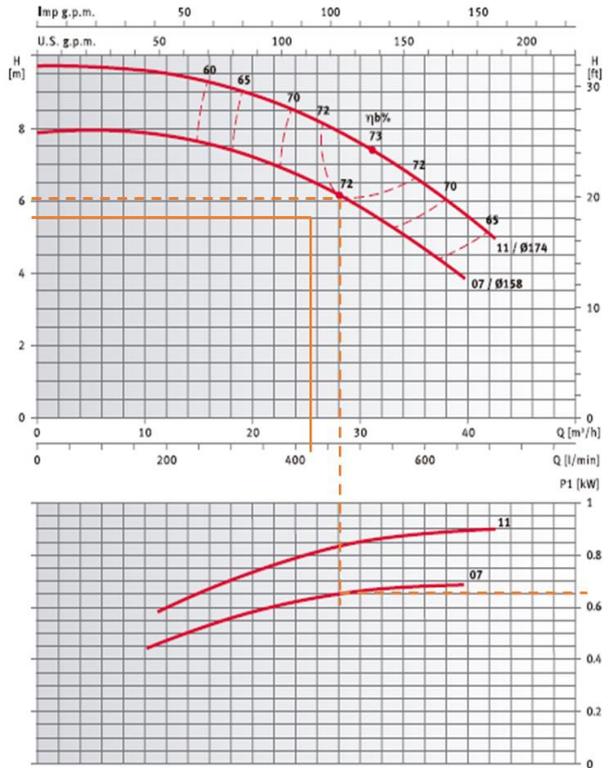
Anejo 4: Selección del punto óptimo de funcionamiento real



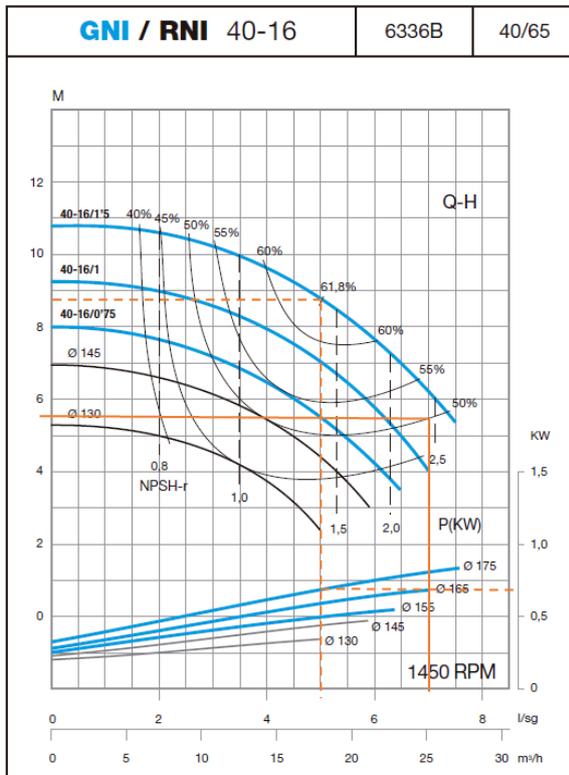
Anejo 4: Selección del punto óptimo de funcionamiento real



Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
4,5	7,5	0,57	58,09	-13,13



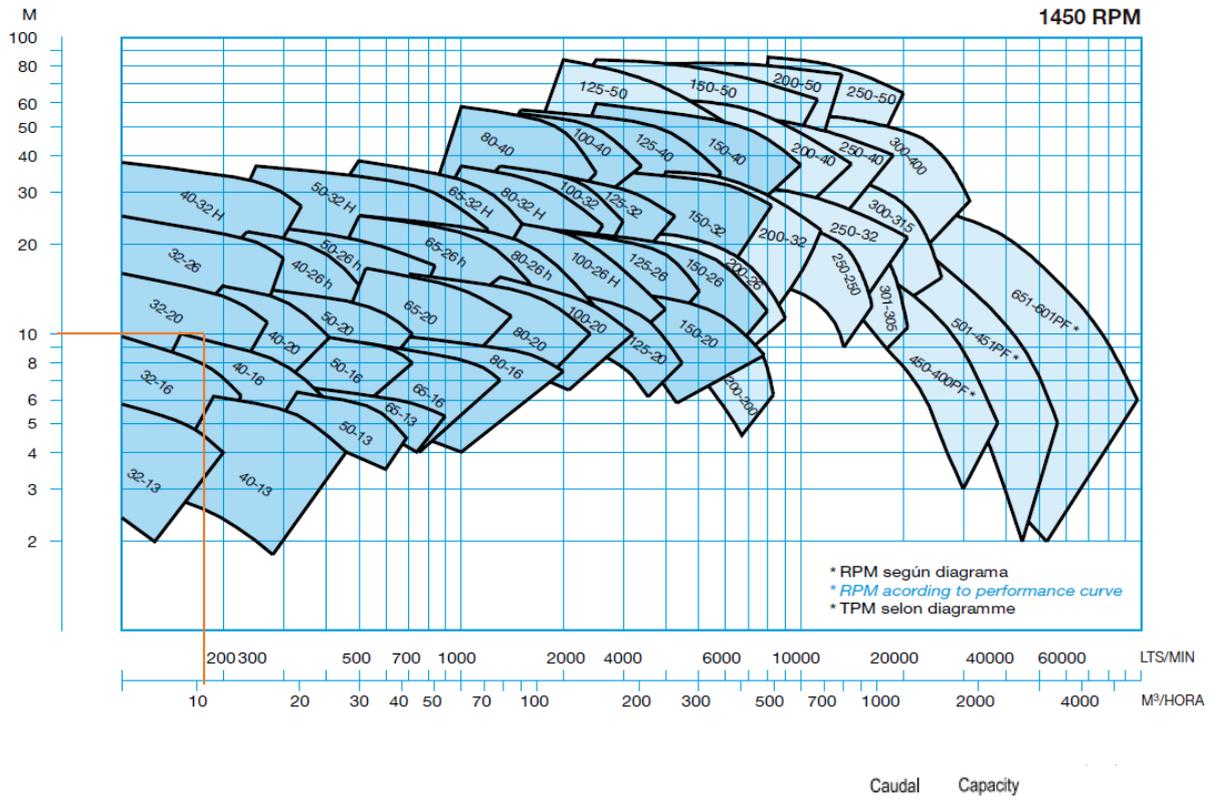
Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
7,8	6,1	0,65	71,81	-14,78



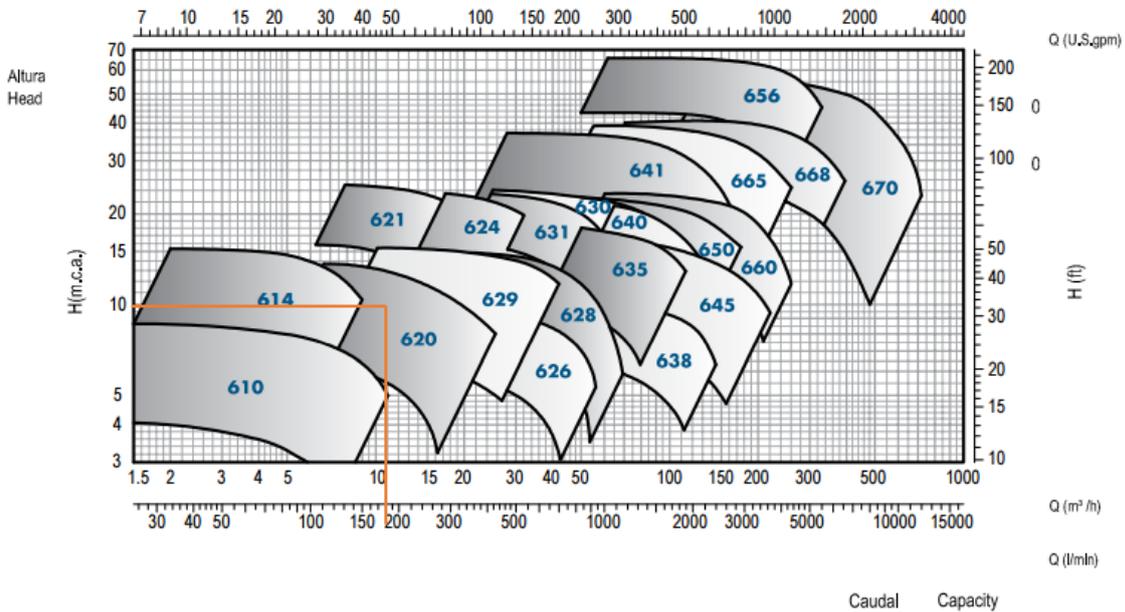
Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
5	8,8	0,7	61,66	-11,78

Anejo 4: Selección del punto óptimo de funcionamiento real

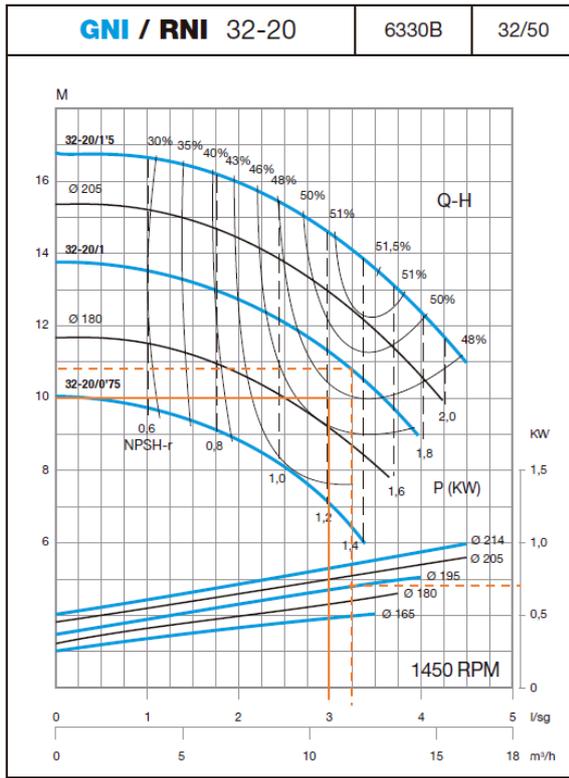
Escenario nocturno



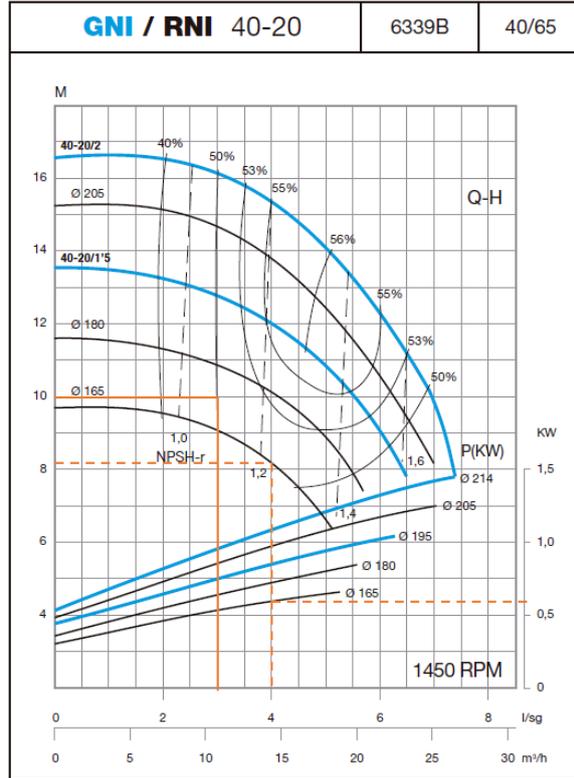
n=1450 1/min



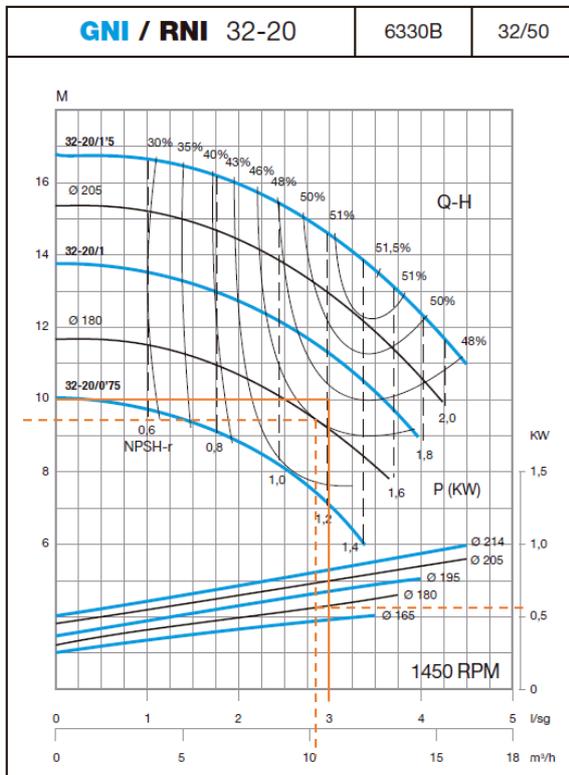
Anejo 4: Selección del punto óptimo de funcionamiento real



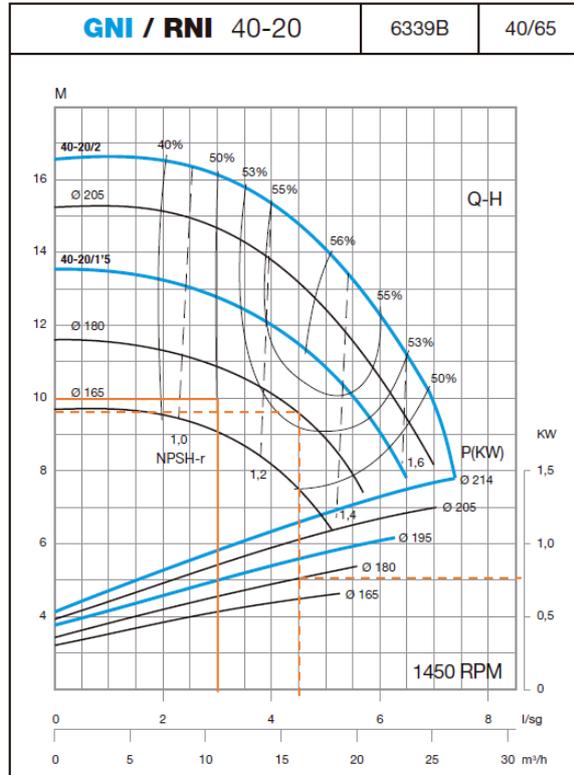
Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
3,25	10,8	0,7	49,19	-5,75



Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
4	8,1	0,62	51,27	-7,42*

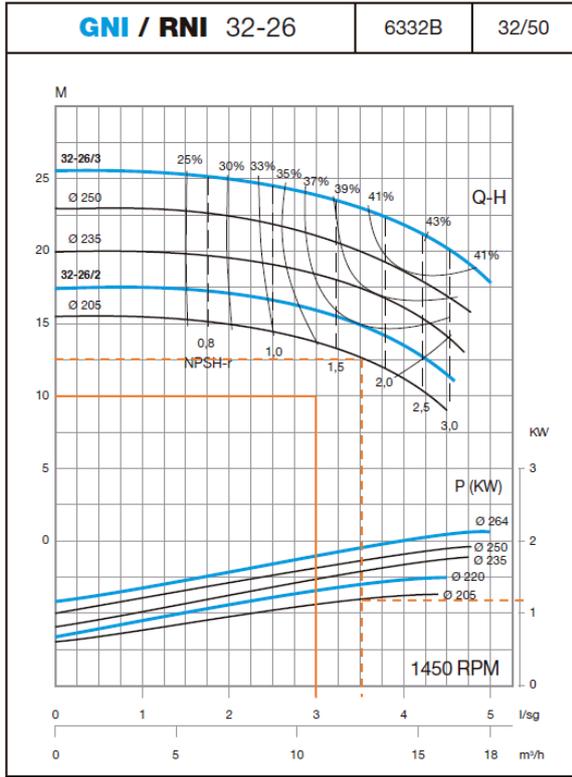


Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
2,8	9,4	0,55	46,95	-5,87

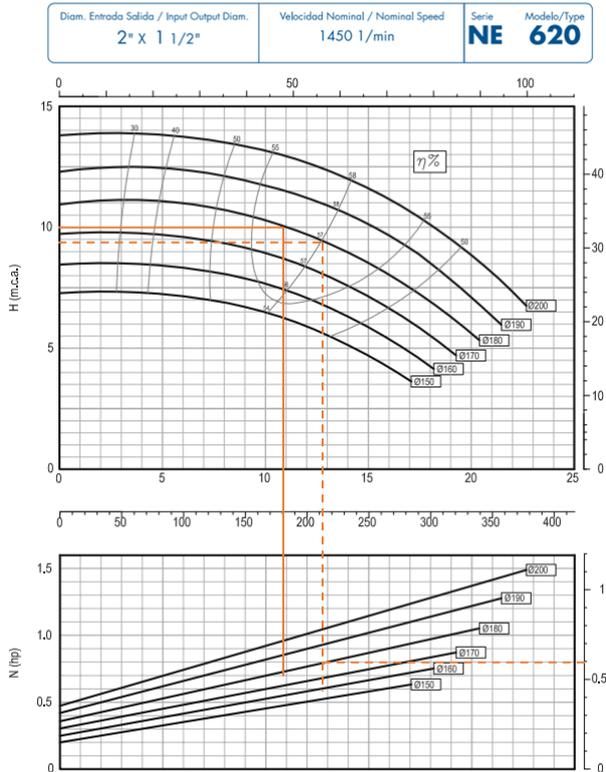


Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
4,5	9,6	0,79	53,64	-14,38*

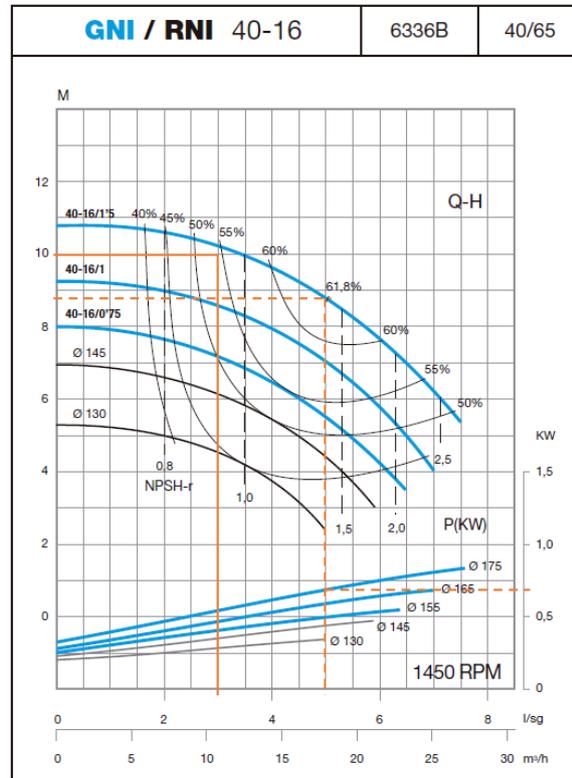
Anejo 4: Selección del punto óptimo de funcionamiento real



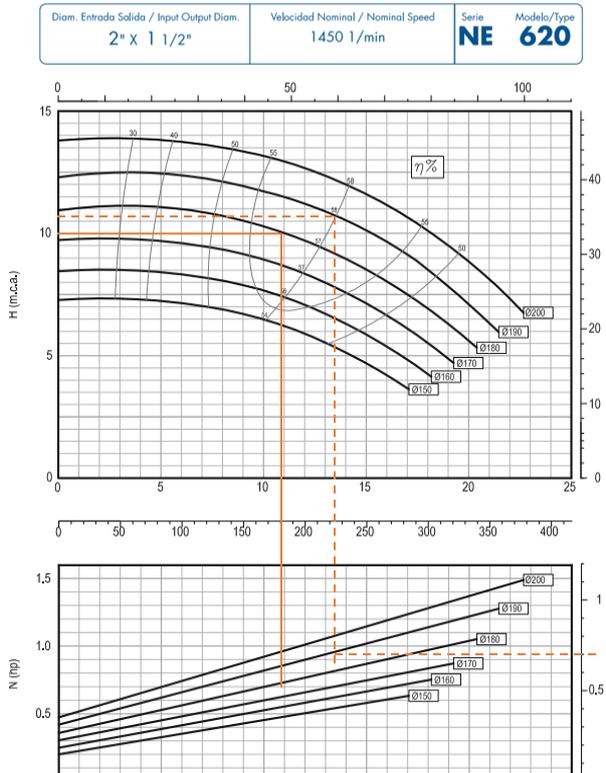
Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
3,5	12,5	1,2	35,77	-7,41*



Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
3,6	9,4	0,58	57,24	-5,94*

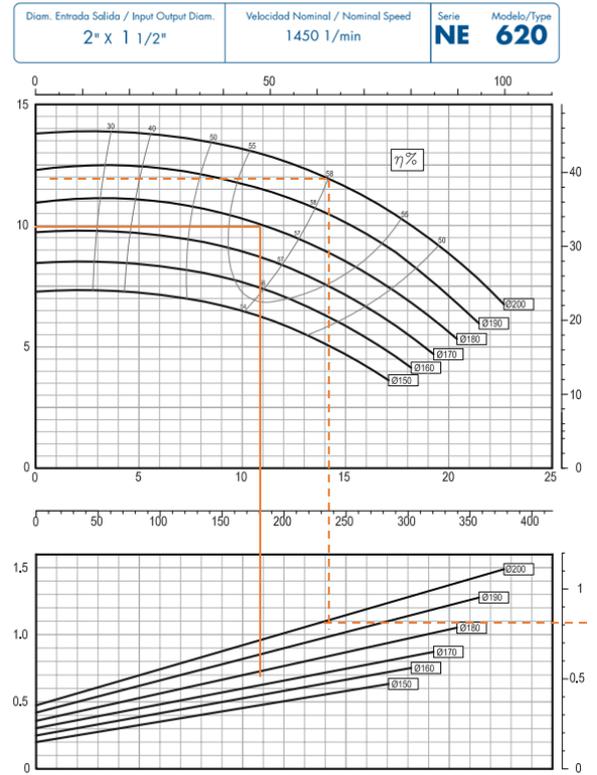
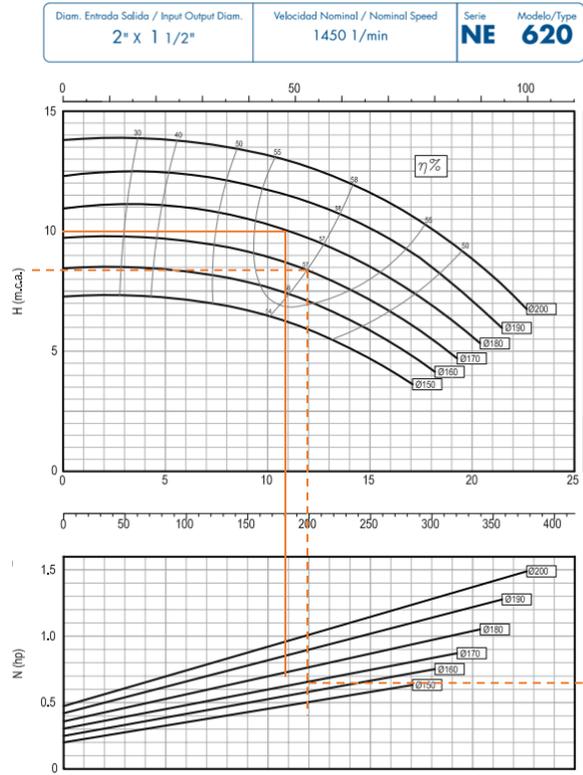


Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
5	8,8	0,7	61,66	-6,17*



Q (l/s)	H (m)	P (KW)	η (%)	E (kWh)
3,7	10,8	0,68	57,65	-5,68*

Anejo 4: Selección del punto óptimo de funcionamiento real



Anejo 5: Representación de las curvas universales

La metodología utilizada por el software ALLIEVI para representar y trabajar con las curvas universales de Suter queda explicada en el libro Transitorios Hidráulicos. Del régimen estacionario al golpe de ariete. Parte de esa explicación se expone a continuación:

Marchal, Flesch y Suter proporcionan en 1965 unas tablas que permiten reconstruir el comportamiento de cuatro bombas tipo, las cuales se distinguen por la velocidad específica definida para los valores del punto óptimo de funcionamiento según la ecuación (A- 13):

$$N_S = \frac{\omega_0 \cdot \sqrt{Q_{b0}}}{(g \cdot H_{b0})^{3/4}} \quad (\text{A- 13})$$

Donde ω_0 es la velocidad de rotación en rad/s y el resto de magnitudes se expresan en el sistema internacional.

Para la reconstrucción del comportamiento generalizado de una bomba se definen las variables reducidas siguientes (A- 14), a partir de los valores en el punto óptimo de funcionamiento de la bomba,

$$q = \frac{Q_b}{Q_{b0}} \quad ; \quad h = \frac{H_b}{H_{b0}} \quad ; \quad \alpha = \frac{N}{N_0} \quad ; \quad \beta = \frac{M}{M_0} \quad (\text{A- 14})$$

Siguiendo el método propuesto por Marchal et al., las curvas características universales, también llamadas curvas de Suter, se expresan paramétricamente en función de las variables reducidas mediante las siguientes expresiones (A- 15):

$$\frac{h}{\alpha^2 + q^2} = f_h(\theta) = f_h \left[\arctan \left(\frac{\alpha}{q} \right) \right]$$

$$\frac{\beta}{\alpha^2 + q^2} = f_\beta(\theta) = f_\beta \left[\arctan \left(\frac{\alpha}{q} \right) \right] \quad (\text{A- 15})$$

Donde las funciones f_h y f_β se encuentran tabuladas en función del ángulo θ (de 5 en 5 grados entre 0° y 360°) para los valores de N_s de 0,46, 1,61, 2,78 y 4,94 que corresponden a bombas tipo entre las centrífugas y las axiales. En la Figura A 1 y Figura A 2 se presentan gráficamente las funciones f_h y f_β para los cuatro valores de N_s indicados.

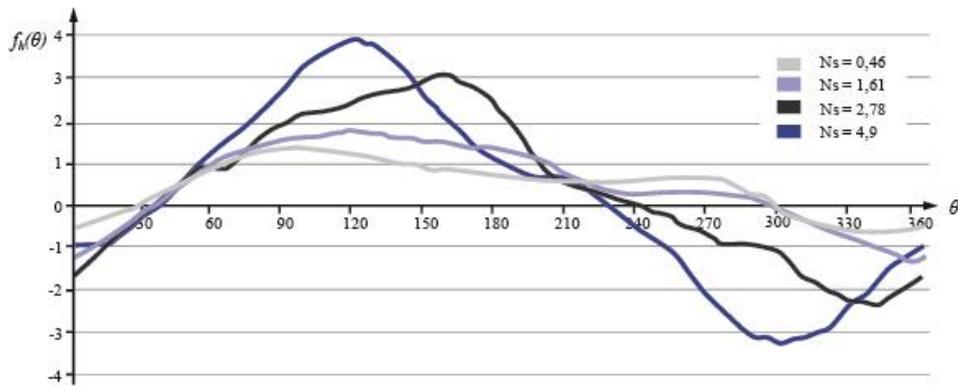


Figura A 1: Curvas de Suter para la función $f_h(\theta)$. (Abreu, et al., 2012)

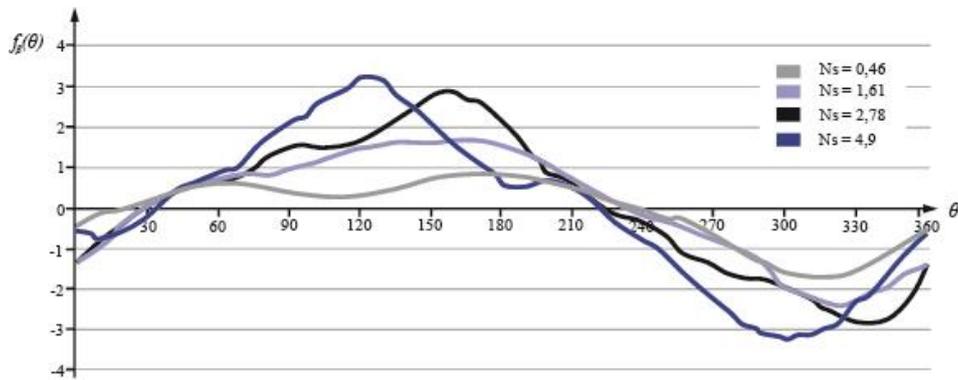


Figura A 2: Curvas de Suter para la función $f_b(\theta)$. (Abreu, et al., 2012)

La ventaja principal que presenta el uso de las expresiones (A- 15) es que las funciones f_h y f_b siempre están definidas sean cuales sean los valores de α y de q . Por ejemplo, si q tiende a cero la relación α/q tiende a infinito, y la función arco tangente de esta relación tiende a un valor real definido. O bien si α se anula q no tiene por qué anularse, tomando el denominador de las relaciones (A- 15) un valor real distinto de cero. Esto último permite tratar una bomba parada como un elemento resistente, la cual presenta unas determinadas pérdidas en función del caudal que la atraviesa.

Aunque inicialmente las curvas de Suter se publicaron en 1965 para cuatro valores de la velocidad específica N_s , la experiencia acumulada permitió ampliar el número de curvas a 14. Cuatro de estas curvas son las mismas proporcionadas por Marchal et al. en 1965, correspondiendo las otras diez a valores intermedios de la velocidad específica entre $N_s=0,46$ y $N_s=4,94$. El programa ALLIEVI trabaja con estas 14 curvas, interpolando mediante splines cúbicas entre unas curvas y otras.

Las curvas universales de Suter para definir el comportamiento de una bomba determinada no están exentas de errores, pues los detalles de diseño propios de la bomba hacen que su comportamiento real sea en general diferente, aunque tal vez no muy alejado, del que indican estas curvas tipo. Sin embargo, su uso está ampliamente aceptado en los programas de simulación de transitorios hidráulicos porque permiten reconstruir de forma aproximada el comportamiento de las bombas, y ello a partir de únicamente su punto óptimo de funcionamiento. Además, este procedimiento está ampliamente aceptado por diferentes autores, pues proporciona suficiente aproximación para definir el comportamiento generalizado de las bombas cuando no se dispone de los correspondientes datos de ensayo (Abreu, et al., 2012).

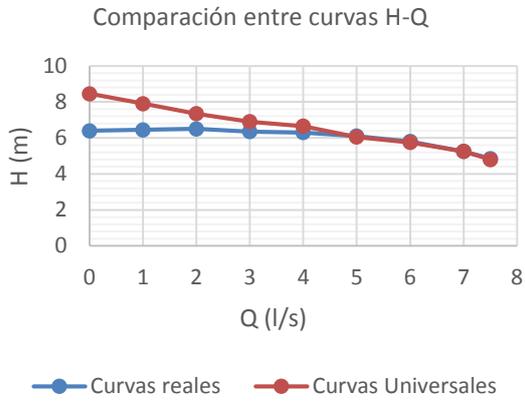
Las curvas universales se utilizarán necesariamente cuando durante el transitorio las bombas tengan que funcionar con velocidad de rotación negativa o fuera del primer cuadrante, tal y como ocurre en el caso de las PATs, pues en estos casos las curvas características de catálogo no presentan ninguna información. Se asumen, pues, en estos casos los errores que se puedan cometer.

Tomando como referencia las bombas seleccionadas para funcionar como turbinas en el escenario diurno y en el escenario nocturno definidas en el punto 5.3, se comparan sus curvas características obtenidas a partir de las curvas universales, con las curvas reales de catálogo.

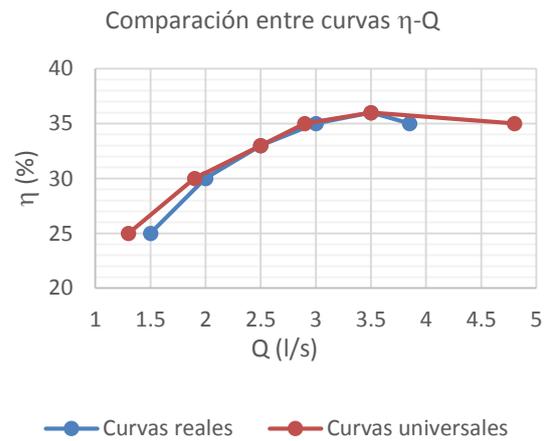
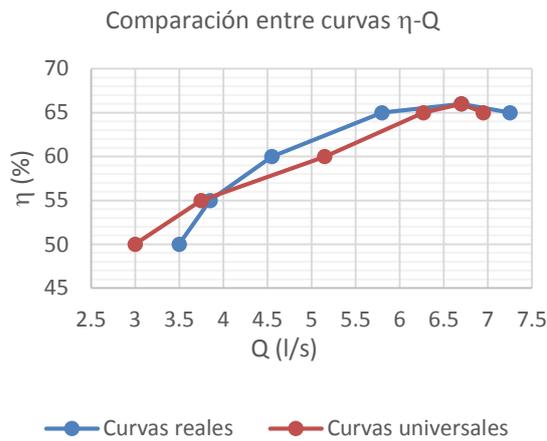
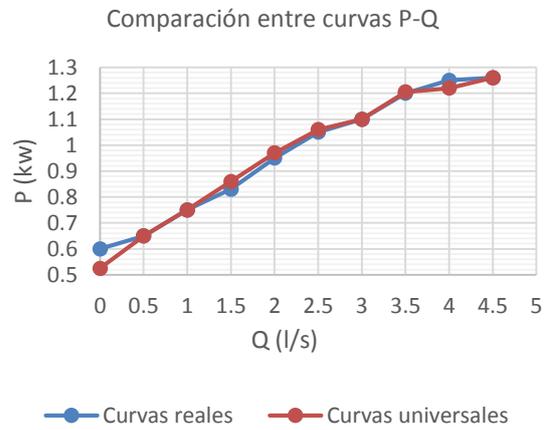
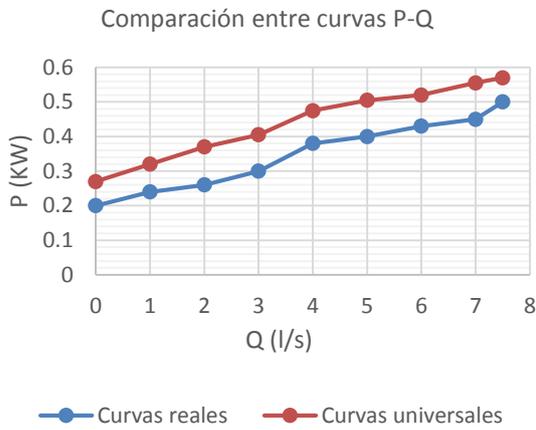
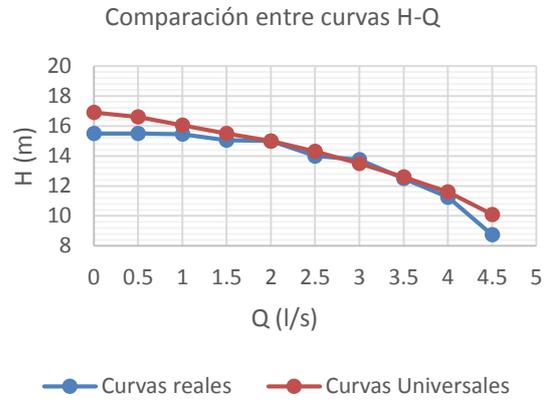
Se puede observar en la Tabla A 3 como las curvas no coinciden a la perfección, pero su aproximación es tan grande que a falta de datos concretos del funcionamiento de las bombas fuera del primer cuadrante, los resultados que ofrecen las curvas universales se pueden tomar por buenos.

Tabla A 3: Comparación de curvas reales con curvas universales

Escenario diurno (50-16/φ135)



Escenario nocturno (NE 620/φ200)



BIBLIOGRAFÍA

Abreu, J., Cabrera, E., Espert, V. B., García-Serra, J. & Sanz, F., 2012. *Transitorios Hidráulicos. Del régimen estacionario al golpe de ariete*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

AEAS, AGA, 2014. *XIII encuesta nacional de AEAS sobre el suministro de agua potable y saneamiento en España*. s.l.:AEAS.

AEAS, 2016. *XIV Estudio Nacional de Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España 2016*. s.l.:AEAS. Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento.

Ajuntament de Picanya, 2010. *Revisión del Plan General de Picanya (Valencia). Informe de sostenibilidad ambiental. Anejo 6. Estudio de necesidades de vivienda*. Picanya: Ajuntament de Picanya.

Ajuntament de Picanya, 2011. *Reglamento Regulador del Servicio de Abastecimiento de Agua Potable del Ayuntamiento de Picanya*. Picanya: Boletín Oficial de la provincia de Valencia.

Arregui, F., 1998. *Propuesta de una Metodología Para el Análisis y Gestión del Parque de Contadores de Agua en un Abastecimiento*. s.l.:Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.

Banco Mundial, 2016. *BANCO MUNDIAL*. [En línea]

Available at: <http://www.bancomundial.org>. [Último acceso: 26 08 2016].

Basho, M., s.f. *Simulaciones numéricas de una bomba centrífuga operando en modo turbina*. s.l.:Universidad EAFIT, Medellín Colombia.

Cabrera Marcet, E. & Cabrera Rochera, E., s.f. *Balances hídricos en redes de agua. El criterio de la Internacional Water Association (IWA)*. s.l.:ITA. Universitat Politècnica de València.

Cabrera, E., Espert, V. B., García-Serra, J., Martínez, F., Andrés, M. & García, M. 1996. *Ingeniería Hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua*. Valencia: U. D. Mecánica de Fluidos.

Cabrera, E., Almandoz, J., Arregui, F. & García-Serra, J., 1999. Auditoría de redes de distribución de agua. *Ingeniería del Agua*, diciembre, 6(4), pp. 291-303.

- Cabrera, E., Espert, V., Cabrera Jr, E. & Soriano, J., 2012. *Discussion and closures of “Losses Reduction and Energy Production in Water-Distribution Networks” by Nicola Fontana, Maurizio Giugni, and Davide Portolano*. s.l.:Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE).
- Cabrera, E., Gómez, E., Cabrera Jr., E., Soriano, J. & Espert, V., 2015. *Energy Assessment of Pressurized Water Systems*. s.l.: *Journal Water Resources Planning and Management (ASCE)*
- Cabrera, E., Pardo, M. A., Cobacho, R. & Cabrera Jr., E., 2010. Energy Audit of Water Networks. *Journal Water Resources Planning and Management (ASCE)*, November - December.p. 669 – 677.
- Corominas, J., 2010. Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. *Ingeniería del Agua*, septiembre.17(3).
- del Teso, R., Ferrer Polo, . J. & Aguado García, . D., 2014. *Proyecto de red de riego de jardines municipales con agua no potable en el casco urbano de Picanya (T.M. de Picanya, provincia de Valencia)*. Valencia: UPV.
- Derakhshan, S. & Nourbakhsh, A., 2008. *Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation*. s.l.:Experimental Thermal and Fluid Science.
- Durán Molina, J. A. & Moral Fernández, J., 2015. *Gestión de las redes de abastecimiento. Control del Agua No Registrada (ANR)*. s.l.:IV Jornadas de Ingeniería del Agua.
- Grupo Aguas de Valencia; ITA, 2016. *Diagnóstico del gasto energético de una red a presión. Estimación de las posibilidades de mejora*. s.l.:s.n.
- INE, 2015. *Encuesta sobre el Suministro y Saneamiento del Agua. Año 2013*. s.l.:Instituto Nacional de Estadística.
- ITA, 2015. *EAGLE tool, Energy Assessment of Global Pressurized Water Systems*. s.l.:Universitat Politècnica de València.
- ITA, 2015. *Manual técnico de ALLIEVI. Versión 2.2.0.0*. s.l.:Universitat Politècnica de València.
- ITA, 2016. *ITAEnergy*. s.l.:Universitat Politècnica de València.

Ministerio de industria, turismo y comercio; IDAE, s.f. *Estudio de prospectiva: consumo energético en el sector del agua*. s.l.:IDAE.

Ministerio de industria, energía y turismo; Ministerio de Fomento; IDAE, 2014. *Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria*. s.l.:Minetur.

Naciones Unidas, 2014. *Agua y energía*. [En línea]
Available at: <http://www.un.org>. [Último acceso: 25 08 2016].

Nations, U. & Bank, T. W., s.f. *Sustainable energy for all*. [En línea]
Available at: <http://www.se4all.org>. [Último acceso: 26 08 2016].

Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura, 2009. *El agua en un mundo en constante cambio. El 3er Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*. s.l.:UNESCO.

Ortiz Flórez, R. & Abella Jiménez, J. A., 2008. *Máquinas hidráulicas reversibles aplicadas a micro centrales hidroeléctricas*. s.l.:IEEE Latin America Transactions.

Red Eléctrica de España, 2015. *Informe de Responsabilidad Corporativa 2015. Energía Sostenible*. s.l.:REE.

Rossman, Lewis, 2007. *EPANET 2.0*. s.l.:EPA

Serrano Iribarnegaray, L. & Martínez Román, J., 2014. *Máquinas eléctricas*. 3ª ed. s.l.:Universitat Politècnica de València.

Singh, P. & Nestmann, F., 2010. *An optimization routine on a prediction and selection model for the turbine operation of centrifugal pumps*. s.l.:s.n.

UNEP, 2014. *Eficiencia en el uso del agua y la energía*. s.l.:Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente - UNEP.

UNESCO, 2016. *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP)*. [En línea]
Available at: <http://www.unesco.org>. [Último acceso: 26 08 2016].

UPC, 2016. *Anexo número 1. Teoría de transitorios hidráulicos*. UPC ed. s.l.:s.n.

Williams, A., 1997. *Pumps as turbines. A user's guide*. s.l.:Intermediate Technology Publications.

