

Caracterización y mejora de la eficiencia energética del transporte de agua a presión

Elena Gómez Sellés

Directores:

Enrique Cabrera Marcet
Javier Soriano Olivares

Tesis doctoral
Valencia, septiembre 2016



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

Caracterización y mejora de la eficiencia energética del transporte de agua a presión

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

Elena Gómez Sellés

Dirigida por:

Enrique Cabrera Marcet

Javier Soriano Olivares

Valencia, julio de 2016

Resumen

El ciclo urbano del agua, desde la fuente hasta su retorno al medio natural, consume energía. Cada etapa del ciclo (captación, tratamiento, transporte, distribución, utilización, depuración y vertido al medio natural) tiene una necesidad específica de energía (kWh/m^3). Este valor depende de las circunstancias de cada caso: de la disponibilidad y calidad del agua en origen, de la topografía del terreno, etc. Esta tesis se ocupa particularmente de una de esas etapas, del transporte de agua a presión, fundamental en cualquier suministro de agua, bien sea urbano o de riego. Este tipo de transporte (como alternativa al natural, en lámina libre) no sólo preserva mejor la calidad del agua. También posibilita la racionalización de su uso, lo que permite satisfacer la creciente exigencia de demanda de agua por parte de la población. Sin embargo, la energía utilizada para mover el agua a presión, es notable, de ahí la importancia de desarrollar estrategias que permitan minimizarla. El presente escenario exige ser mucho más eficientes en el uso de estos dos bienes: agua y energía, si tal como indica la tendencia actual, la población sigue creciendo y los recursos disponibles menguando.

Es crucial, por tanto, minimizar los impactos negativos del transporte de agua a presión, lo que requiere el estudio y la mejora de la eficiencia de estos sistemas, desde una perspectiva global. La creciente preocupación por la situación actual ha propiciado numerosos estudios sobre la reducción tanto del consumo de energía como de agua en los sistemas de distribución. La mayoría de ellos orientados a mejorar partes concretas de estos sistemas, como el aumento de eficiencia de los grupos de presión, la disminución de fricción en las tuberías, la reducción de fugas o la recuperación de energía. El presente trabajo trata de ser una guía y compendio de estos estudios precedentes, agrupándolos dentro de un protocolo de actuación que permita analizar y mejorar el sistema desde una óptica general.

Se propone, por tanto, un proceso de mejora de la eficiencia que pueda ser estandarizado y convertirse en una metodología a seguir por cualquier suministro de agua. Un procedimiento que sea aplicable a todo sistema, independientemente de su uso (riego o urbano) y sea cuál sea su topografía (redes planas o muy irregulares). Este proceso se divide en cuatro etapas: diagnóstico, análisis del sistema (auditorías), evaluación de acciones, y toma de decisiones (análisis coste-beneficio).

El punto de partida es el diagnóstico. Éste establece referencias para la evaluación de la eficiencia energética, mediante la definición de consumos mínimos realistas de energía que tengan en cuenta las particularidades de cada sistema, tales como fuentes de agua disponibles, estándares de servicio requeridos, características topográficas y configuración de la red. Comparando el consumo actual con el mínimo requerido por ese mismo sistema, puede estimarse el margen de mejora existente.

Realizado el diagnóstico, se requiere un estudio en profundidad de los flujos de agua y de energía. Se han desarrollado a lo largo del presente trabajo herramientas que permiten realizar tanto la auditoría hídrica como la energética. Éstas aportarán una visión precisa de las principales ineficiencias del sistema. Con el objetivo de minimizarlas, se ha establecido un catálogo de acciones que permite reducirlas. Para ello, se ha realizado un análisis y revisión de las diferentes medidas estructurales y operacionales que pueden contribuir a mejorar la eficiencia energética en el transporte de agua a presión.

Resum

El cicle urbà de l'aigua, des de la font fins al seu retorn al medi natural, consumeix energia. Cada etapa del cicle (captació, tractament, transport, distribució, utilització, depuració i abocament al medi natural) té una necessitat específica d'energia (kWh/m³). Aquest valor depèn de les circumstàncies de cada cas: de la disponibilitat i qualitat de l'aigua en origen, de la topografia del terreny, etc. Aquesta tesi s'ocupa particularment d'una d'eixes etapes, del transport d'aigua a pressió, fonamental en qualsevol subministrament d'aigua, bé siga urbà o de reg. Aquest tipus de transport (com a alternativa al natural, en làmina lliure) no sols preserva millor la qualitat de l'aigua. També possibilita la racionalització del seu ús, la qual cosa permet satisfer la creixent exigència de demanda d'aigua per part de la població. No obstant això, l'energia utilitzada per a moure l'aigua a pressió, és notable, d'ací la importància de desenvolupar estratègies que permeten minimitzar-la. El present escenari exigeix ser molt més eficients en l'ús d'estos dos béns: aigua i energia, si tal com indica la tendència actual, la població continua creixent i els recursos disponibles minvant.

És crucial, per tant, minimitzar els impactes negatius del transport d'aigua a pressió, la qual cosa requereix l'estudi i la millora de l'eficiència d'aquests sistemes, des d'una perspectiva global. La creixent preocupació per la situació actual ha propiciat nombrosos estudis sobre la reducció tant del consum d'energia com d'aigua en els sistemes de distribució. La majoria d'ells orientats a millorar parts concretes d'aquests sistemes, com l'augment d'eficiència dels grups de pressió, la disminució de fricció en les canonades, la reducció de fugues o la recuperació d'energia. El present treball tracta de ser una guia i compendi d'aquests estudis precedents, agrupant-los dins d'un protocol d'actuació que permeta analitzar i millorar el sistema des d'una òptica general.

Es proposa, per tant, un procés de millora de l'eficiència que puga ser estandarditzat i convertir-se en una metodologia que es puga seguir per qualsevol subministrament d'aigua. Un procediment que siga aplicable a tots els sistemes, independentment del seu ús (reg o urbà) i siga quina siga la seua topografia (xarxes planes o molt irregulars). Aquest procés es divideix en quatre etapes: diagnòstic, anàlisi del sistema (auditories), avaluació d'accions, i presa de decisions (anàlisi cost-benefici).

El punt de partida és el diagnòstic. Aquest estableix referències per a l'avaluació de l'eficiència energètica, per mitjà de la definició de consums mínims realistes d'energia que tinguen en compte les particularitats de cada sistema, com ara fonts d'aigua disponibles, estàndards de servici requerits, característiques topogràfiques i configuració de la xarxa. Comparant el consum actual amb el mínim requerit per eixe mateix sistema, pot estimar-se el marge de millora existent.

Realitzat el diagnòstic, es requereix un estudi en profunditat dels fluxos d'aigua i d'energia. S'han desenvolupat al llarg del present treball ferramentes que permeten realitzar tant l'auditoria hídrica com l'energètica. Aquestes aportaran una visió precisa de les principals ineficiències del sistema. Amb l'objectiu de minimitzar-les, s'ha establert un catàleg d'accions que permet reduir-les. Per a això, s'ha realitzat una anàlisi i revisió de les diferents mesures estructurals i operacionals que poden contribuir a millorar l'eficiència energètica en el transport d'aigua a pressió.

Abstract

The urban water cycle, from source to its return to the natural environment, consumes energy. Each stage of the cycle (collection, treatment, transportation, distribution, use, treatment and discharge into the natural environment) has a specific need for energy (kWh / m³). This value depends on the circumstances of each case: the availability and quality of raw water, topography, etc. This thesis is particularly concerned with one of these stages, the transport of pressurized water, essential in any water supply system, whether urban or irrigation. This type of transport (as an alternative to natural, free surface) not only preserves better water quality. It also allows the rationalization of its use, making possible to meet the growing water demand by the population. However, the energy used to move the pressurized water is remarkable, hence the importance of developing strategies to minimize it. This scenario demands to be much more efficient in the use of both water and energy, as according to the current trend, the population will keep growing and the resources decreasing.

It is crucial, therefore, to minimize the negative impacts of transporting pressurized water which requires the study and improvement of the efficiency of these systems from a global perspective. The growing concern about the current situation has led to numerous studies on the reduction of both energy and water consumption in distribution systems. Most of them have been aimed at improving specific parts of these systems, such as increasing efficiency of pumping stations, decreasing the friction in pipes, reducing leakage or energy recovery. This paper tries to be a guide and compendium of these previous studies, grouping them into a protocol for analysing and improving the system from a general perspective.

Therefore it is proposed a process for improving the efficiency that can be standardized and become a methodology to be applied for any water supply utility. This method is applicable to any system, regardless of its use (irrigation or urban) and their topography (flat or irregular networks). The process is divided into four stages: diagnosis, analysis of the system (audits), evaluation of the possible actions and decision-making (cost-benefit analysis).

The starting point is the diagnosis which establishes benchmarks for the energy efficiency evaluation. In this stage is defined a realistic minimum energy consumption taking into account the particularities of each system, such as available raw water sources, service standards required, topographical features and network configuration. Comparing the actual consumption with the minimum required by the same system, it can be estimated the margin of improvement.

Once made the diagnosis, a depth study is required for the water and energy flows. Different tools have been developed throughout this work that perform both the water and energy audit. These audits provide with a precise view of the major inefficiencies in the system. In order to reduce them, it has been established a set of actions. To do so, it has been conducted an analysis and review of the several structural and operational measures that can contribute to the improvement of the energy efficiency in the transport of pressurized water.

Resumen.....	i
Resum	iii
Abstract.....	v

Índice de los capítulos

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción.....	1
1.1.1. Motivación	2
1.2. Introducción a la eficiencia en los sistemas de agua a presión	5
1.2.1. El trinomio agua – energía – cambio climático: los objetivos del Horizonte 2020.....	11
1.1.2.1. La modernización del regadío.....	14
1.2.2. Las consecuencias energéticas de modernizar el regadío.....	17
1.2.3. El camino recorrido: el protocolo del IDAE.....	21
1.2.4. Estrategias de operación. Posibilidades de mejora.....	23
1.2.5. Implicaciones energéticas del riego a la demanda y del riego programado	26
1.2.6. Eficiencia energética y contratación del suministro eléctrico.....	27
1.3. Proceso de mejora de la eficiencia energética de una red a presión	29
1.3.1. Conceptos del proceso de mejora de la eficiencia energética de los sistemas de agua a presión.....	30
1.3.2. Necesidad de diagnosticar la eficiencia energética de las redes a presión	32
1.3.3. Enfoque general y metodología	33
1.4. Antecedentes. Sobre la necesidad de unificar terminología, indicadores, métricas y procedimientos de los análisis energéticos globales	36
1.5. Justificación y objetivos	38
1.6. Estructura del documento.....	40

Capítulo 2: Implicaciones ambientales

2.1. Introducción.....	45
2.2. Evolución del cambio climático.....	47
2.2.1. Futuro en el cambio climático, riegos e impactos.....	48
2.2.2. Caminos de futuro para la Adaptación, Mitigación y Desarrollo sostenible	48
2.2.3. Relación cambio climático - ciclo del agua.....	50
2.3. Diseñando soluciones para mitigar el cambio climático. El proyecto WaCCliM.....	51
2.4. La herramienta ECAM. Metodología de evaluación y seguimiento	52
2.4.1. Concepto del sistema	53
2.4.2. La evaluación de la metodología	56
2.4.3. Enfoque del Ciclo integral del agua	58
2.4.4. Cálculo de las emisiones.....	58
2.4.5. Información general de las emisiones de GEI incluidas en ECAM.....	63
2.4.6. Consideraciones finales.....	65
2.4.7. La estructura de la herramienta ECAM.....	66
2.4.8. La estructura de datos: Variables e indicadores	67
2.4.9. Emisiones no consideradas en la herramienta	68
2.5. Conclusiones.....	70

Capítulo 3: Fase de diagnóstico energético

3.1. Introducción.....	72
3.2. Hipótesis de partida.....	74
3.2.1. Sistema ideal sin exceso de presión.....	74
3.2.2. Sistema ideal con el exceso de presión.....	76
3.2.3. Sistema real	77
3.3. La eficiencia energética de un sistema de agua a presión.....	79
3.3.1. La eficiencia energética de un sistema ideal (con y sin recuperación de energía)	79

3.3.2.	La eficiencia energética de un sistema real	80
3.3.3.	La eficiencia energética objetivo	81
3.3.3.1.	Energía reducible en fugas, $E_{r1,o}$	83
3.3.3.2.	Energía reducible debida a las pérdidas por fricción, $E_{rf,o}$	83
3.3.3.3.	Energía reducible en estaciones de bombeo, $E_{rp,o}$	84
3.3.3.4.	Otras pérdidas de energía reducibles, $E_{ro,o}$	84
3.4.	Disipación y recuperación de energía (con VRP o PAT) en un PWTS	84
3.5.	La mejora de la eficiencia de un PWTS	85
3.6.	Síntesis del diagnóstico	86
3.7.	La herramienta EAGLE	88
3.8.	Casos de estudio	89
3.8.1.	Caso práctico 1. Evaluación de los diferentes términos energéticos	89
3.8.1.1.	Planteamiento del caso	90
3.8.1.2.	Cálculo de energías y rendimientos	92
3.8.1.3.	Cálculo de energías y rendimientos ante un nuevo escenario	96
3.8.1.4.	Cálculo de las energías y rendimiento objetivo	100
3.8.2.	Caso práctico 2. Evaluación de la energía topográfica	103
3.8.2.1.	Planteamiento del caso	104
3.8.2.2.	Cálculo de energías y rendimientos	105
3.8.2.3.	Desacoplamiento del sistema	106
3.9.	Conclusiones	112

Capítulo 4: Fase de análisis. Auditorías

4.1.	Introducción	114
4.2.	Auditoría hídrica	116
4.2.1.	Sobre las pérdidas de agua	116
4.2.2.	Componentes del balance hídrico	117

4.2.3.	Introducción a la auditoría hídrica e indicadores	125
4.2.3.1.	Realización de la auditoría hídrica	131
4.2.4.	Ejemplo de nuevas técnicas de detección y reparación de fugas	136
4.2.4.1.	Sistema remoto de detección de fugas UTILIS	136
4.2.4.2.	Técnica automatizada de reparación de fugas sin zanjas (TALR) propuesta por CURAPIPE.....	137
4.3.	Auditoría energética	138
4.3.1.	Introducción.....	138
4.3.2.	Sobre los peajes energéticos en una red de distribución de agua	139
4.3.3.	Fundamentos de la auditoría energética.....	141
4.3.4.	Integración en periodo extendido de la ecuación de la energía	142
4.3.4.1.	Energía entrante en la red, aportada por el embalse o depósito	143
4.3.4.2.	Energía entrante en la red, aportada por el equipo de bombeo (energía de eje).....	144
4.3.4.3.	Energía entregada a los usuarios en los nudos de consumo	145
4.3.4.4.	Energía saliente de la red a través de las fugas existentes	146
4.3.4.5.	Energía disipada por fricción en tuberías y otros elementos	146
4.3.4.6.	Término energético de compensación del depósito de cola	147
4.3.5.	Balance global de energía	147
4.3.6.	Aplicaciones de la auditoría energética	148
4.3.7.	Sobre las debilidades y limitaciones energéticas de EPANET	150
4.3.7.1.	Introducción al estado actual del módulo energético de EPANET	151
4.3.7.2.	Errores principales	153
4.3.7.3.	Errores menores	153
4.3.7.4.	Mejoras potenciales	154
4.3.7.5.	Caso de estudio	155
4.4.	Conclusiones.....	160

Capítulo 5: Influencia de la configuración del sistema

5.1. Introducción.....	163
5.2. Suministro de agua en directo o indirecto, desde la perspectiva de la evaluación energética	165
5.2.1. Diagnóstico energético	166
5.2.2. Ejemplo numérico.....	168
5.2.2.1. Datos Básicos.....	169
5.2.2.2. Resultados del diagnóstico energético.....	171
5.2.2.3. Resultados de la auditoría energética	173
5.2.3. Ventajas e inconvenientes del suministro en directo. Análisis económico	176
5.2.3.1. Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)	177
5.3. Conclusiones.....	180

Capítulo 6: Estrategias de mejora. Evaluación de acciones

6.1. Introducción.....	182
6.2. Medidas operacionales.....	184
6.2.1. Operar el sistema en su punto de funcionamiento óptimo (BEP, Best Efficient Point) ..	184
6.2.1.1. Reducción de la demanda	185
6.2.1.2. Ajustar el sistema al BEP	188
6.2.2. Evitar cualquier excedente de energía.....	194
6.2.3. Reducir al mínimo las fugas	196
6.2.4. Minimizar las pérdidas por fricción.....	201
6.3. Medidas estructurales	206
6.3.1. Utilizar bombas más eficientes	207
6.3.2. Recuperar o reducir la energía topográfica.....	212
6.3.3. Mejorar viejos diseños de distribución y suministro	215
6.3.4. Evitar las pérdidas no incluidas en los apartados anteriores.....	220

6.3.4.1. Caso de estudio. Sustitución de bombes aspirando de depósitos de rotura por aspiración directa de red	221
6.4. Ejemplo de aplicación.....	225
6.4.1. Breve descripción del sistema inicial	225
6.4.2. Medidas OP.3 y OP.4. Reducción de las fugas y de la fricción por reducción de la presión	229
6.4.3. Medidas OP1: Operar en el BEP	231
6.4.4. Medida OP2: Evitar excedentes de energía.....	234
6.4.5. Medida EST1: Recurrir a bombas más eficientes	237
6.4.6. Medida EST3: Reducción de energía por fricción por cambio de diámetros	238
6.5. Conclusiones.....	240

Capítulo 7: Conclusiones y desarrollos futuros

7.1. Introducción.....	243
7.2. Proceso de mejora de la eficiencia energética de una red a presión	245
7.2.1. Fase de diagnóstico energético	246
7.2.2. Fase de análisis (auditorías).....	248
7.2.3. Fase de evaluación de acciones. Definición de estrategias de mejora	248
7.2.4. Fase de toma de decisiones.....	249
7.3. Resultados directos de la tesis	249
7.4. Desarrollos futuros	251
7.5. Conclusión.....	253

Índice de los anexos

A1 Anexo 1. La herramienta EAGLE	255
A1.1 La herramienta EAGLE	256
A1.2 Estructura de la herramienta	256

A1.2.1	Tipología	257
A1.2.2	Caracterización	260
A1.2.3	Configuración.....	261
A1.2.4	Datos energéticos	266
A1.2.5	Datos fuentes.....	267
A1.2.6	Diagnóstico	268
A1.2.7	Preauditoría - Objetivo	271
A1.2.8	Resumen del diagnóstico	275
A1.3	Cuestiones varias sobre la herramienta	276
A1.3.1	Mensajes arrojados por EAGLE	276
A1.3.2	Tipo de celdas disponibles	277
A1.3.3	Ayuda y descripción de las variables.....	278
A1.4	Ejemplos de cálculo	278
A1.4.1	Ejemplo sistema urbano.....	278
A1.4.1.1.	Selección de la tipología.....	279
A1.4.1.2.	Caracterización del sistema.....	280
A1.4.1.3.	Configuración	282
A1.4.1.4.	Datos energéticos.....	284
A1.4.1.5.	Diagnóstico.....	285
A1.4.1.6.	Preauditoría y energías objetivo	291
A1.4.2	Ejemplo sistema riego.....	293
A2	Anexo 2. Manual de usuario de ITAFugas	301
A2.1	ITAFugas.....	302
A2.2	Ejemplo de aplicación.....	303
A2.2.1	Método de los nudos:.....	304
A2.2.2	Método de la X:.....	306

A3	Anexo 3. Manual de usuario de ITAEnergy.....	310
A3.1	Descripción del software	311
A3.2	Conceptos	311
A3.3	Variables y resultados de la auditoría energética.	312
A3.3.1	Introducción de valores	312
A3.3.2	Resultados obtenidos.....	314
A3.3.2.1.	Balance hídrico:.....	314
A3.3.2.2.	Auditoría energética.....	316
A3.3.2.3.	Indicadores energéticos.....	321
A3.4	Observaciones	324
A4	Anexo 4. Referencias.....	326

Índice de las figuras

Capítulo 1

Figura 1-1:	El campo ibicenco está sufriendo las consecuencias de la sequía (El Mundo 23/08/2015).....	3
Figura 1-2:	Evolución del consumo y la dotación por habitante y día (AEAS 2014).....	4
Figura 1-3:	Uso del agua por sectores (INE 2008).....	5
Figura 1-4:	Evolución del consumo de energía en los regadíos Españoles (1950-2013) (Berbel et al., 2014)	7
Figura 1-5:	Evolución de algunos indicadores hídricos en las ciudades españolas (INE 2016).	8
Figura 1-6:	Producción de agua desalada (Ministerio de Fomento, CEDEX).....	9
Figura 1-7:	Consumos específicos de energía. Nota: GWRS, groundwater replenishment system; WWTP, wastewater treatment plant (Lazarova et al. 2012)	9
Figura 1-8:	Fotogalería Diario La Verdad (3 Noviembre 2015). “El otoño más lluvioso desde 2001 apenas palía la sequía extrema en la provincia de Alicante. Las precipitaciones han sido beneficiosas para el campo, pero la situación de los embalses sigue siendo crítica.”	13
Figura 1-9:	Evolución de la superficie regada según tipos de Riego. Años 2004-2013 (Fuente: Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos, ESYRCE, MAGRAMA 2013)	15

Figura 1-10: Evolución del consumo de agua y energía para riego en España con respecto al año 1950.....	19
Figura 1-11: Ejemplo de fluctuación del precio horario del mercado eléctrico diario (OMIE, 2015)	28
Figura 1-12: Diagrama de flujo de la metodología.	35

Capítulo 2

Figura 2-1: Interconexiones Agua – Energía- Clima	46
Figura 2-2: Límites del sistema urbano del agua	54
Figura 2-3: El ciclo urbano del agua (Fuente: IWA. WaCCliM Methodology Factsheet)	56
Figura 2-4: Emisiones GEI en la industria del agua (adaptada de OFWAT, 2010).....	59
Figura 2-5: Emisiones de GEI por scope y etapa en la que se cuantifica en la herramienta ECAM	64
Figura 2-6: Resumen del enfoque para el cálculo de las emisiones globales de GEI	66
Figura 2-7: Estructura de ECAM.....	67

Capítulo 3

Figura 3-1: Sistema ideal de agua a presión (perfil sin exceso de energía).	75
Figura 3-2: Sistema ideal de agua a presión (perfil con exceso de energía).....	77
Figura 3-3: Sistema real de agua a presión (perfil sin el exceso de energía).....	78
Figura 3-4: Comparación de E_{ti} y $E_{tr,o}$ dependiendo del perfil topográfico.	82
Figura 3-5: Diagrama de flujo para mejorar la eficiencia en PWTS. Diagnóstico	86
Figura 3-6: Esquema del sistema en alta, Caso 1.	90
Figura 3-7: Esquema simplificado del perfil del sistema.	93
Figura 3-8: Relación entre E_{uo}/E_{ti} en el sistema simplificado y en el sistema con más detalle.	96
Figura 3-9: Sistema ideal con exceso de energía.	97
Figura 3-10: Comparación del efecto de la VRP en la disipación de energía dependiendo de su ubicación	99
Figura 3-11: Esquema red de riego del caso 2	104
Figura 3-12: Sectores de la red de riego Caso 2.	106
Figura 3-13: Esquemmatización sectorización del caso 2.	107
Figura 3-14: Comparación energía topográfica ideal en el sistema desacoplado y en el sistema completo	111

Capítulo 4

Figura 4-1: Diagrama de flujo para mejorar la eficiencia en un PWTS. Análisis (auditorías).....	115
Figura 4-2: Síntesis estrategias orientadas a la reducción de fugas (IWA, 2000).	122
Figura 4-3: Probabilidad e impacto de los diez riesgos globales (Global Risk Perception Survey, 2014. Foro Económico Mundial).....	124
Figura 4-4: Modelo de fugas basado en el NFM (Puust et al., 2010)	132
Figura 4-5: Componentes del caudal mínimo nocturno (UKWIR, 1994).....	132
Figura 4-6: Horquillas de las HEA unitarias en California (CEC, 2005).....	139
Figura 4-7: Diagrama simple del balance de energía (BID, 2011)	140
Figura 4-8: Notación utilizada para los nudos y líneas de la red de distribución	142
Figura 4-9: Tabla de resultados del Balance Hídrico y de la Auditoría Energética (ITAEnergy) .	149
Figura 4-10: Tabla de Indicadores	150
Figura 4-11: Esquema de la red caso de estudio.....	155
Figura 4-12: Características del punto de funcionamiento trabajando a dos velocidades distintas	159

Capítulo 5

Figura 5-1: Diagrama de flujo para mejorar la eficiencia en PWTS.....	164
Figura 5-2: izda.) Escenario 1 (suministro indirecto) drcha.) Escenario 2 (suministro en directo)	168
Figura 5-3: Esquemas de los escenarios analizados	169
Figura 5-4: Factor de emisión (EF) estimado a 24 horas (línea continua), en comparación con el valor medio de EF (línea discontinua). (Stokes et al., 2014).....	179
Figura 5-5: Evolución diaria del factor de emisión (EF) frente a la evolución del precio de la energía.....	180

Capítulo 6

Figura 6-1: Diagrama de flujo para mejorar la eficiencia en PWTS. Evaluación de acciones.....	183
Figura 6-2: Diagrama de flujo para mejorar la eficiencia en PWTS. Cambios en las condiciones de contorno	188
Figura 6-3: Variación horaria a lo largo del año de los periodos de la tarifa 6X.	189
Figura 6-4: Sectores de la red de riego Estado final.	192
Figura 6-5: Reducción de energía total según el porcentaje de reducción de fugas.	199

Figura 6-6: % de reducción de energía total asociada a las fugas según el % de reducción de fugas en función de j .	199
Figura 6-7: % de reducción de energía total asociada a las fugas según el % de reducción de fugas en función de x .	200
Figura 6-8: Variación de la reducción de la energía en función de x y j , para una reducción del caudal fugado del 30%.	201
Figura 6-9: Representación de los costes totales asociados a la renovación de un tubería (Pardo, 2010).	206
Figura 6-10: Pérdidas energéticas típicas en los componentes electromagnéticos de un sistema de agua (BID, 2011).	208
Figura 6-11: Diagrama energético global de las bombas centrífugas.	210
Figura 6-12: Acciones recomendadas para ajustar las curvas del equipo de bombeo a la condición real de operación (BID, 2011).	211
Figura 6-13: Proporciones típicas en el análisis del coste de vida de una bomba industrial de tamaño medio.	212
Figura 6-14: Esquema del funcionamiento propuesto del Rebombear.	214
Figura 6-15: Esquema simplificado de la red de distribución de agua de Jávea modelado con ALLIEVI.	222
Figura 6-16: Situación inicial de la estación de bombeo de Adsubia-Cabanes. Escenario 1.	223
Figura 6-17: Situación propuesta de la estación de bombeo de Adsubia-Cabanes. Escenario 2.	224
Figura 6-18: Esquema de la red del sistema inicial.	225
Figura 6-19: Curva de consigna frente a la curva característica del grupo de presión.	228
Figura 6-20: Esquema de la red del sistema inicial.	231
Figura 6-21: Curva de consigna frente a la curva característica del grupo de presión.	232
Figura 6-22: Curva de funcionamiento en los tres sistemas de una bomba.	234
Figura 6-23: Puntos de funcionamiento de la instalación y del grupo de presión.	236

Capítulo 7

Figura 7-1: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.	246
--	-----

Anexo 1

Figura A1-1: Estructura de EAGLE.	257
Figura A1-2: Tipologías básicas disponibles para el análisis de redes.	257

Figura A1-3: Hoja de Caracterización	261
Figura A1-4: Selección Disponibilidad de Datos. Hoja de Configuración	262
Figura A1-5: Tabla de datos de Configuración para la selección 1. Cotas y demandas de los nudos de consumo	263
Figura A1-6: Tabla de datos de Configuración para la selección 2. Cota de cada nudo de consumo	264
Figura A1-7: Tabla de datos de Configuración para la selección 3. Sólo cotas extremas	265
Figura A1-8: Sección superior de la hoja Configuración.	265
Figura A1-9: Hoja de Datos energéticos.	266
Figura A1-10: Hoja de Datos fuentes.....	267
Figura A1-11: Hoja de Diagnóstico	269
Figura A1-12: Gráfico de distribución de energías	270
Figura A1-13: Gráfico de distribución de energías	271
Figura A1-14: Preauditoría del sistema	271
Figura A1-15: Energía objetivo perdida por FUGAS	273
Figura A1-16: Energía objetivo perdida por BOMBEO.....	273
Figura A1-17: Energía objetivo perdida por FRICCIÓN	274
Figura A1-18: Rendimiento objetivo del sistema.....	274
Figura A1-19: Resumen del diagnóstico de una red de abastecimiento de agua a presión	275
Figura A1-20: Gráfica del diagnóstico energético del sistema	276
Figura A1-21: Ejemplo de mensaje de error	277
Figura A1-22: Ejemplo de mensaje de advertencia	277
Figura A1-23: Tipo de celdas disponibles	278
Figura A1-24: Ejemplo definiciones y ayuda.....	278
Figura A1-25: Esquema de funcionamiento caso 1	279
Figura A1-26: Paso 1. Selección de la tipología	280
Figura A1-27: Paso 2. Caracterización	281
Figura A1-28: Paso 3. Configuración.....	283
Figura A1-29: Paso 3. Configuración. Pérdidas de agua	284
Figura A1-30: Paso 3. Configuración. Pérdidas de agua	285
Figura A1-31: Paso 5. Obtención del Diagnóstico	286
Figura A1-32: Resultados del Diagnóstico energético en el caso de Disponibilidad de datos 2	287
Figura A1-33: Resultados del Diagnóstico energético en el caso de Disponibilidad de datos 3	288

Figura A1-34: Resultados del Diagnóstico energético. Gráfica de distribución de energías.....	289
Figura A1-35: Resultados del Diagnóstico energético. Gráfica de porcentaje de energías acumuladas.....	289
Figura A1-36: Ejemplo gráfica de porcentaje de energías acumuladas	290
Figura A1-37: Paso 6. Obtención de la Preauditoría.....	291
Figura A1-38: Paso 6. Cálculo de las energías objetivo (fugas).....	291
Figura A1-39: Paso 6. Cálculo de las energías objetivo (estación de bombeo)	292
Figura A1-40: Gráfica de distribución de energías (real, objetivo e ideal)	292
Figura A1-41: Esquema de funcionamiento caso 2.	293
Figura A1-42: Paso 2. Caracterización de un sistema de riego	295
Figura A1-43: Paso 3. Configuración.....	296
Figura A1-44: Paso 4. Datos energéticos	296
Figura A1-45: Paso 5. Análisis de los datos obtenidos en el Diagnóstico	297
Figura A1-46: Gráfica de energías acumuladas caso 2	298
Figura A1-47: Gráfica de distribución de energías caso 2	299
Figura A1-48: Paso 6. Análisis de los datos de la preauditoría	299
Figura A1-49: Gráfica de distribución de energías ideales, reales y objetivo caso 2.....	300
 Anexo 2	
Figura A2-1: Esquema de la red del Ejemplo 1.....	303
Figura A2-2: Distribución supuesta del caudal incontrolado.	304
Figura A2-3: Elección del método de la X.....	307
Figura A2-4: Evolución temporal del caudal inyectado.	307
Figura A2-5: Representación gráfica de la desviación típica del modelo frente a la del caudal inyectado.....	309
 Anexo 3	
Figura A3-1: Ventana de selección de tiempos	313
Figura A3-2: Introducción de variables para el cálculo.....	314
Figura A3-3: Tabla de resultados del Balance Hídrico.....	315
Figura A3-4: Tabla de resultados de la Auditoría Energética.....	317
Figura A3-5: Tabla de Indicadores.....	322

Índice de las tablas

Capítulo 1

Tabla 1-1: Indicadores de producción y consumo de energía por usos del agua (Corominas, 2010).....	17
Tabla 1-2: Evolución del consumo de energía para riego en España (Corominas, 2010)	18
Tabla 1-3. Energía asociado a cada sistema de riego (Corominas, 2010)	20

Capítulo 3

Tabla 3-1: Características de los nudos de la red.....	91
Tabla 3-2: Características básicas (mínimas conocidas) del sistema.	91
Tabla 3-3: Comparación de resultados en función del grado de detalle de los datos.....	95
Tabla 3-4: Resultados del escenario con exceso de energía.....	98
Tabla 3-5: Rendimientos energéticos del sistema	103
Tabla 3-6: Energías de partida Caso 2.	105
Tabla 3-7: Características principales de cada uno de los sectores del Caso 2.....	107
Tabla 3-8: Energías ideales y rendimiento ideal del Sector Alto.	108
Tabla 3-9: Energías ideales y rendimiento ideal del Sector Medio.....	109
Tabla 3-10: Energías ideales y rendimiento ideal del Sector Bajo.	110
Tabla 3-11: Evaluación del sistema completo y desacoplado	110

Capítulo 4

Tabla 4-1: Beneficios de la gestión de la presión (GIZ, 2011).....	123
Tabla 4-2: Auditoría hídrica (IWA, 2000)	126
Tabla 4-3: Auditoría hídrica (Almandoz et al., 2005).....	127
Tabla 4-4: Valores del IFE en países en desarrollo y en vías de desarrollo (Liemberger, 2005).	130
Tabla 4-5: Directrices generales para el valor objetivo del IFE (AWWA, 2003).....	130
Tabla 4-6: Notación empleada en la definición de las energías actuantes en el sistema	143
Tabla 4-7: Esquema del balance energético a largo plazo de una red de distribución de agua .	148
Tabla 4-8: Datos básicos de los nudos y las tuberías para el caso de estudio	156
Tabla 4-9: Características de las bombas	156
Tabla 4-10: Auditoría hídrica	157

Tabla 4-11: Balance de potencias	157
Tabla 4-12: Comparación análisis energético calculado y ofrecido por EPANET.....	158

Capítulo 5

Tabla 5-1: Características de los nudos y las líneas de la red	169
Tabla 5-2: Curvas de modulación de los nudos de consumo.....	170
Tabla 5-3: Características y funcionamiento de las bombas.....	171
Tabla 5-4: Resultado del diagnóstico energético sobre los dos escenarios presentados.....	172
Tabla 5-5: Resultados de la auditoría energética para ambos escenarios	174
Tabla 5-6: Mix eléctrico red peninsular (g CO ₂ /kWh) (Datos: OCCC 2015)	178

Capítulo 6

Tabla 6-1: Punto de funcionamiento para cada turno. Estado inicial.....	190
Tabla 6-2: Coste del Término de Potencia y Término de energía para la tarifa 6.1A (año 2015, estado inicial).	190
Tabla 6-3: Puntos de funcionamiento para cada turno. Estado final	193
Tabla 6-4: Comparación de resultados entre el estado inicial y después de las mejoras.....	194
Tabla 6-5: Primera clasificación de los costes que intervienen en el diseño de una red (Pérez et al., 2009)	204
Tabla 6-6: Consumo eléctrico medio de la estación de bombeo Adsubia – Cabanes	224
Tabla 6-7: Datos básicos de los nudos y las tuberías.....	226
Tabla 6-8: Características de las bombas	227
Tabla 6-9: Auditoría energética del sistema inicial (kWh/día).....	227
Tabla 6-10: Regulación de las VRP del sistema	229
Tabla 6-11: Auditoría energética tras aplicar las medidas OP3 y OP4 (kWh/día)	230
Tabla 6-11: Auditoría energética tras aplicar la medida OP1 (kWh/día).....	232
Tabla 6-13: Regulación del grupo de presión	234
Tabla 6-14: Auditoría energética tras aplicar la medida OP2 (kWh/día).....	235
Tabla 6-14: Auditoría energética tras aplicar la medida EST1 (kWh/día).....	237
Tabla 6-16: Auditoría energética tras aplicar la medida EST3 (kWh/día).....	239

Anexo 2

Tabla A2-1: Datos de los nudos del ejemplo.304
Tabla A2-2: Demandas mayoradas con el caudal incontrolado consumido.305
Tabla A2-3: Resultados de la simulación del modelo para cada valor de x.....308

Anexo 3

Tabla A3-1: Indicadores de contexto del sistema.323
Tabla A3-2: Indicadores energéticos del sistema.324

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

La gente necesita, y siempre ha necesitado, agua para vivir y para regar los campos y, por tanto siempre ha requerido del transporte de agua desde la fuente hasta las zonas agrícolas y urbanas. Hace más de un siglo, toda el agua se movía por gravedad, no sólo a través de ríos y cauces naturales, sino también a través de acueductos y canales artificiales. Esto ha dejado un vasto patrimonio hidráulico especialmente en áreas donde la necesidad de mover el agua era mayor. La energía requerida para mover el agua era principalmente gravitacional, a excepción de aquellos elementos que se aprovechaban de la energía cinética del río para elevar el agua a una altura igual a su diámetro, este agua con energía potencial era capaz de correr posteriormente a través de canales artificiales y cunetas.

El transporte de agua a presión, aunque conocido, era raro. La incapacidad para construir tuberías con un diámetro lo suficientemente grande como para presurizar el agua era uno de los factores limitantes. Por otro lado, aunque las bombas volumétricas eran conocidas desde la antigüedad (el tornillo de Arquímedes es el ejemplo más notable), el proceso de presurización de agua de manera continua no lo era. Las turbo-bombas, no estarán disponibles hasta la época del Renacimiento. La innovación de la maquinaria hidráulica reversible no llegó hasta el siglo XVIII por Leonhard Euler. Y no fue hasta un par de décadas más tarde, a mitad del siglo XIX, cuando se normalizó la fabricación de tuberías con diámetro suficiente para transportar grandes volúmenes de agua.

El almacenamiento de agua en depósitos, con suficiente energía potencial, que más tarde se transforma en electricidad mediante el uso de turbinas y generados (agua para la energía) fue un avance significativo en el transporte de agua a presión, y para mediados del siglo XX, la energía hidroeléctrica ya había sido ampliamente desarrollada (Viollet, 2005).

A principios del siglo XX, el nexo agua – energía funcionaba principalmente en una dirección, con agua se generaba energía, con escasa consideración a la energía que consume el agua durante su transporte. La expansión industrial y el tremendo crecimiento de la población, causó un aumento del consumo de agua y en consecuencia, la creación de una mayor demanda de redes de agua para abastecer esa demanda. Por otra parte, un mayor uso del agua también requiere un mayor tratamiento de ésta. Dado que el transporte de agua a presión y el tratamiento de aguas residuales, requiere cada vez mayor cantidad de energía, la relación energía para el agua, creció exponencialmente. A finales del siglo XX, esto animó al visionario Peter Gleick, a hablar del nexo agua-energía como lo conocemos hoy en día (Gleick, 1994).

Este término se confirmó cuando la Comisión de la Energía de California llevó el análisis cualitativo de Gleick al análisis cuantitativo. Aunque los resultados son del año 2001, el estudio fue publicado en 2005 (CEC, 2005), con importantes conclusiones: el 19% del consumo de la energía eléctrica total de California está ligado al agua y casi el 32% de la energía de gas natural, más una indeterminada cantidad de combustibles líquidos, están ligados al agua. La conclusión es obvia: si bien ambas direcciones (agua para la energía y energía para el agua) son vitales en el nexo agua-energía, el epicentro de las políticas de agua, hoy en día, se refieren principalmente a la segunda de ella, energía para el agua. Y no hay nada que sugiera que no seguirá siendo de esta manera (Copeland, 2014).

1.1.1. Motivación

Conforme pasa el tiempo, la necesidad de mover agua es mayor y, salvo en unos pocos casos, el agua siempre se transporta presurizada. Entre muchos otros beneficios del transporte de agua a presión destacan la flexibilidad de diseño, más seguridad, más atención a la calidad del agua, mejor control en el suministro, menor impacto ambiental debido al ahorro de agua y una mayor eficiencia. En contraposición, el aspecto negativo es la enorme cantidad de energía que requieren los sistemas presurizados (no hay que olvidar que un metro cúbico pesa una tonelada). El proceso de transformación del regadío clásico a los sistemas de transporte de agua a presión es un claro ejemplo de los aspectos negativos y positivos que posee esta cuestión. Como consecuencia de estas transformaciones en la forma de operación y de suministro, el gasto de energía está creciendo sin parar. En California, la energía eléctrica consumida por las bombas es superior al 6% de los costes totales (WW, 2013). En Europa, este valor es alrededor del 4%. De acuerdo con la evaluación de impacto que acompaña a la Directiva EC/ 2009/125 (OJEU, 2012) la demanda total de energía de las bombas de agua en 2005 fue de 109 TWh.

Una gran parte de esta demanda energética está asociada a las etapas de transporte y distribución de agua (urbana y agrícola). El uso actual de la energía para el suministro de agua requiere explorar estrategias de mejora y márgenes de optimización. La UE (OJEU, 2012) estima, sólo en la etapa de bombeo, el 20-30% de ahorro, y lo hace sin tener en cuenta las bombas como parte del sistema de transporte de agua presurizado. Existe el potencial para llegar a un ahorro de energía mucho más allá de un 50%. Aunque las bombas más eficientes pueden ahorrar un 20-30% de la energía de bombeo, existen otras pérdidas de energía, como la fricción (en tuberías, válvulas y otros elementos), la energía embebida en fugas, la energía excedente o, según el caso, la pérdida de energía por mal funcionamiento del sistema.

Por tanto, se impone buscar sistemas más eficientes en el transporte de agua a presión, tanto para el abastecimiento urbano como para el riego. La demanda de agua urbana crece, es claro (y ha quedado demostrado) que se ha urbanizado de forma incontrolada gran parte del territorio en los últimos años, lo que implica un requerimiento mayor de agua. Claros ejemplos de esta urbanización enloquecida y de su consecuencia sobre el recurso del agua se dan de forma más destacada todos los veranos. Ciudades tremendamente turísticas sometidas a cortes de agua, desaladoras al cien por cien de su capacidad, y turistas y ciudadanos que disponen de todas las comodidades de los resorts de lujo, pero sin agua. La siguiente imagen (Figura 1-1) de los campos en Ibiza en el verano de 2015 es sólo un ejemplo, los periódicos que se hacían eco de esta noticia resumían perfectamente el estado actual y sobre todo las causas que han conducido a esta situación. *“Una sequía histórica que gravita entre la falta de lluvias, el agotamiento de unos manantiales salinizados, y una gestión de infraestructuras tan ineficaz que ha visto evaporarse 54 millones de euros en obras inservibles o de ejecución infinita”* (El Mundo 23/08/2015).



Figura 1-1: El campo ibicenco está sufriendo las consecuencias de la sequía (El Mundo 23/08/2015).

Estas zonas de sequía recurrente y sobre todo de superpoblación estival recurren a campañas de sensibilización de los ciudadanos con el fin de que reduzcan sus consumos, pero aunque existe una tendencia descendente en el consumo doméstico, ésta, extrañamente, no va acompañada de un descenso en la dotación por habitante. Según la XIII encuesta nacional de AEAS sobre el suministro de agua potable y saneamiento en España publicada en 2014, el consumo doméstico (agua utilizada en litros por habitante y día por cada persona para consumo en el hogar, para lavarse, lavar, etc.) había descendido en el año 2012 a 112 litros, lo que implica una reducción del 10% con respecto a 2010. Por otro lado, la misma encuesta cifra en un aumento del 2% con respecto al mismo año la dotación de agua por habitante y día (agua entregada desde los depósitos a las redes de abastecimiento para el consumo en viviendas, industrias, comercios y servicios de la ciudad).

Esta evolución opuesta (Figura 1-2) del último periodo, el consumo doméstico desciende pero se inyecta más agua en las redes, se justifica claramente con un aumento del agua no registrada (ANR) en los últimos años. Del 23,3% en el año 2010 al 24,6% en el 2012. Es decir se consume menos agua pero se pierde más. Existe, al igual que ocurre con la dotación un claro descenso en la última década del ANR hasta el 2012, que vuelve a subir. Esta subida demuestra el déficit de inversión en renovación de tuberías en los últimos años, falta de inversión supuestamente motivada por la crisis económica. En la misma encuesta, AEAS cuantifica un 38% del total de las redes de distribución con una antigüedad superior a 30 años. Por tanto, las redes envejecen y la inversión en renovarlas desciende, lo cual no hace sorprender que el agua que se pierda por éstas sea mayor. El problema reside en que no sólo se está perdiendo agua sino que además las fugas se llevan con ellas la energía que se le ha suministrado al agua en cabecera además de la utilizada en el tratamiento de potabilización.

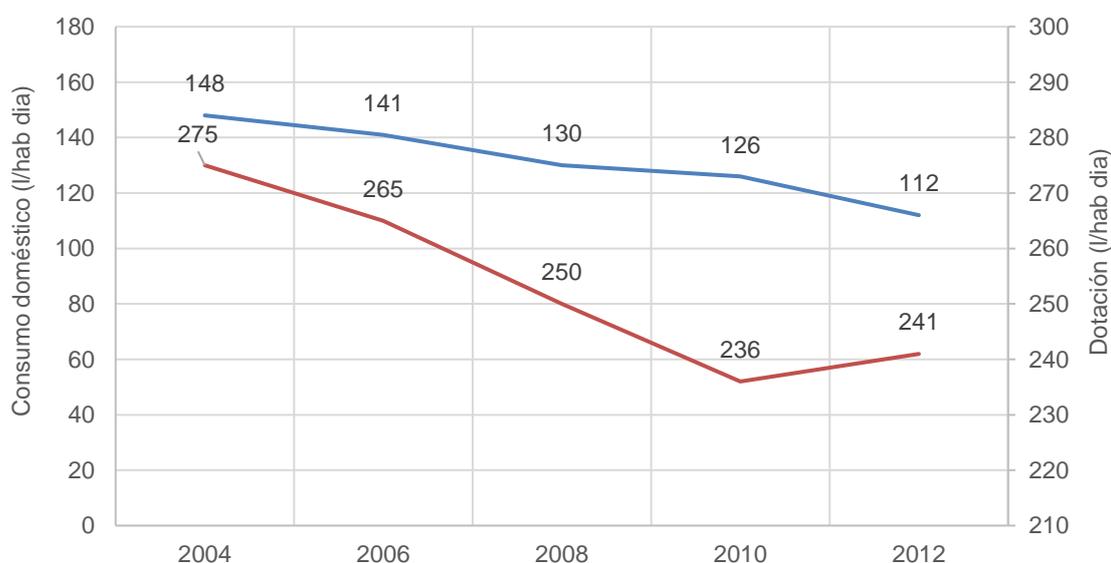


Figura 1-2: Evolución del consumo y la dotación por habitante y día (AEAS 2014).

Es crucial, por tanto, que los abastecimientos ya sean urbanos o de riego, busquen estrategias que les encaminen hacia la eficiencia, es decir, lograr dar servicio de calidad con el menor consumo de recursos (agua y energía). El objetivo debe ser minimizar los impactos negativos del transporte de agua a presión, lo que requiere el estudio y la mejora de estos sistemas, y siempre desde una perspectiva global. Para lograr este objetivo, se requiere disponer de un protocolo de actuación que sea aplicable a cualquier sistema, independientemente de su uso y sea cuál sea su topografía.

1.2. Introducción a la eficiencia en los sistemas de agua a presión

El aumento del consumo de energía asociado al abastecimiento de agua en zonas urbanas ha sido notable, consecuencia del crecimiento de la población, del estrés producido en las zonas turísticas, de mayores requerimientos de tratamiento del agua devuelta al medio (hoy el agua está más contaminada), de exigencias superiores de calidad, etc. Pero es el nexo agua-energía en la agricultura el que ha sufrido un mayor crecimiento.

La agricultura es el mayor consumidor de agua en España, según los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), tal cual se muestra en la Figura 1-3. En cuanto al resto de usos, el agua está muy vinculada al sector turístico, de hecho el consumo de agua por habitante en los municipios turísticos es sustancialmente superior al de los municipios donde la población estacional no es significativa. El INE en su boletín informativo del 2008 (al inicio de la actual crisis económica), sobre *Estadísticas e indicadores del agua*, hacía un comentario de los campos de golf situándolo como un usuario emergente del agua en la economía española que representaban una demanda hídrica de 120 hm³, inferior al 1% de la demanda hídrica total (pero con una demanda muy superior en el caso de la costa mediterránea y el sur).

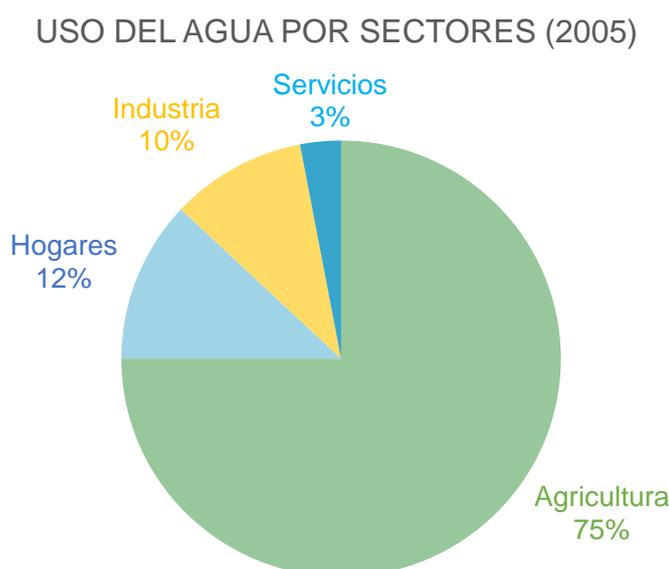


Figura 1-3: Uso del agua por sectores (INE 2008).

El impacto social que en España ha tenido la reciente transformación del riego tradicional en riego a presión ha sido notable mientras que, desde la óptica energética, el desarrollo de las redes urbanas ha pasado casi desapercibido. Cuando el ciudadano comenzó a disponer de agua dentro de sus viviendas el salto, en términos de calidad de vida, fue tan espectacular que cualquier otra circunstancia, como el gasto energético que todo ello pudiera conllevar, pasó inadvertida. Hoy, sin embargo, los crecientes costes energéticos y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, han puesto la eficiencia energética del transporte de agua a presión en un plano de actualidad que antes jamás tuvo.

Siendo, obviamente las ecuaciones que gobiernan el transporte de agua a presión no dependientes de su uso, existen diferencias entre la revolución sufrida del nexo agua-energía entre estos dos usos del agua (urbano y riego):

El tiempo de establecimiento de estos dos sistemas ha sido muy diferente. Unos pocos años en el riego, varias décadas en el uso urbano.

El peso económico del coste de la energía sobre el total de gastos corrientes es muy distinto. Mientras que en el riego puede llegar a alcanzar el 50 % del total, la mayor complejidad del suministro urbano (con unos costes generales superiores) limita, en este segundo uso, el impacto económico de la energía.

La superior capacidad para asumir los costes del uso urbano frente al regadío, hace que el pago de la factura eléctrica sea, en este segundo caso, mucho más traumática. Es decir, el esfuerzo económico para costear el gasto energético de los regantes (independientes, agrupados en comunidades, cooperativas, etc.) no es comparable al presupuesto de las compañías de agua, en las que tal cual se ha dicho el gasto económico asociado al uso de energía eléctrica es uno más laminado por muchos otros.

El proceso de liberalización del sector eléctrico español, que comienza en 1997 con la aprobación de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, culminará una década después (en concreto en julio de 2008, Orden ITC/1857/2008) con la supresión de las tarifas preferentes del regadío. Esta subida sin precedentes del coste de la energía agrícola, coincidente en el tiempo con una congelación de muchos precios agrarios, traumatizará el campo español.

La agricultura representa el 2% del consumo total de energía en Europa (MOE, 2011), y la energía necesaria para el suministro de agua urbana (sin tener en cuenta el tratamiento) puede suponerse similar. Estos son valores medios y la energía requerida puede variar de un país a otro. Por ejemplo en España, el uso de energía eléctrica destinada al abastecimiento de agua en la agricultura supone el 3% del consumo total de energía del país. En los últimos 55 años, el consumo de energía para el suministro de agua para la agricultura en España se ha incrementado 19 veces, mientras que la demanda de agua sólo se ha duplicado en este tiempo (Corominas, 2010).

El claro crecimiento de la demanda energética y la increíble transformación sufrida en los últimos años en el regadío, ponen de manifiesto la urgencia de acometer reformas. Y un claro ejemplo de la diferente evolución de ambos recursos (agua y energía) a lo largo de los últimos años queda reflejado en la siguiente gráfica (Figura 1-4). Mientras que el uso del agua ha sufrido un retroceso (descenso), el consumo de energía no ha hecho otra cosa que aumentar, de hecho ahora se requiere más energía para mover menos agua, lo que implica que los diseños de los sistemas energéticos de los últimos años han sido ineficientes desde el punto de vista energético, no desde la reducción del consumo de agua.

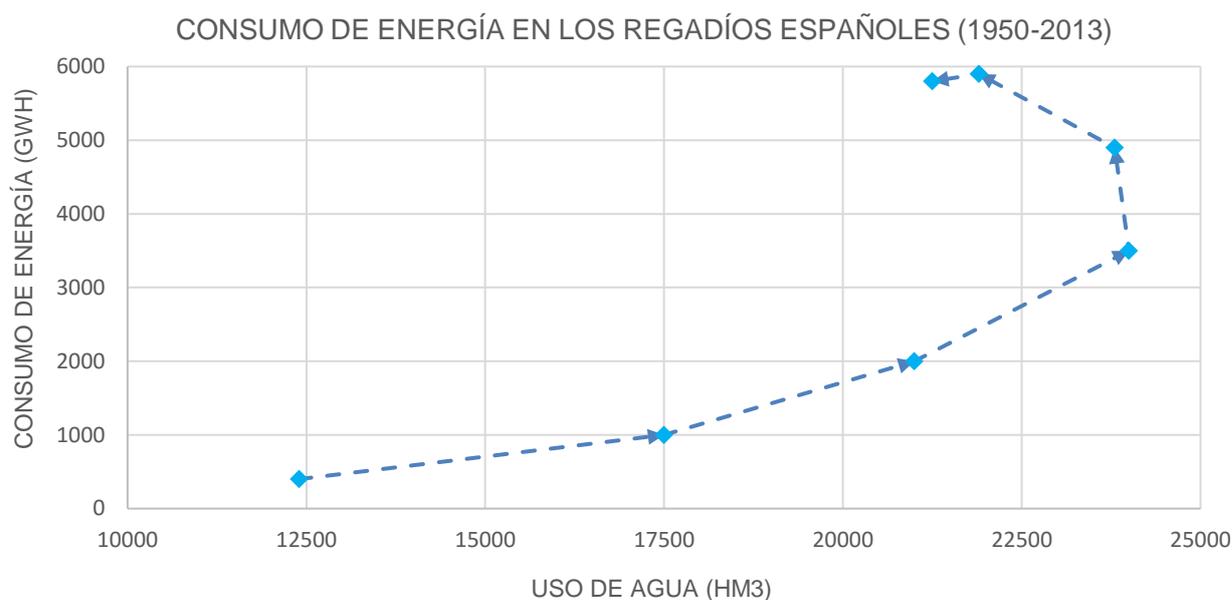


Figura 1-4: Evolución del consumo de energía en los regadíos Españoles (1950-2013) (Berbel et al., 2014)

La necesidad de dirigir esfuerzos para mejorar la eficiencia de los sistemas de agua a presión con el objetivo de reducir tanto el consumo de agua como el consumo de energía asociada a ellos, es independiente del tipo de uso que se le dé al agua.

Sin un histórico tan claro del consumo energético asociado al uso de agua urbana, es previsible que la evolución sea similar aunque más gradual y sin un descenso del uso de agua tan pronunciado, pues aunque el consumo en los hogares ha ido disminuyendo en los últimos años (así lo evidencia junto con otros indicadores de agua en las ciudades la Figura 1-5) no lo ha hecho de igual forma el agua inyectada a las redes.

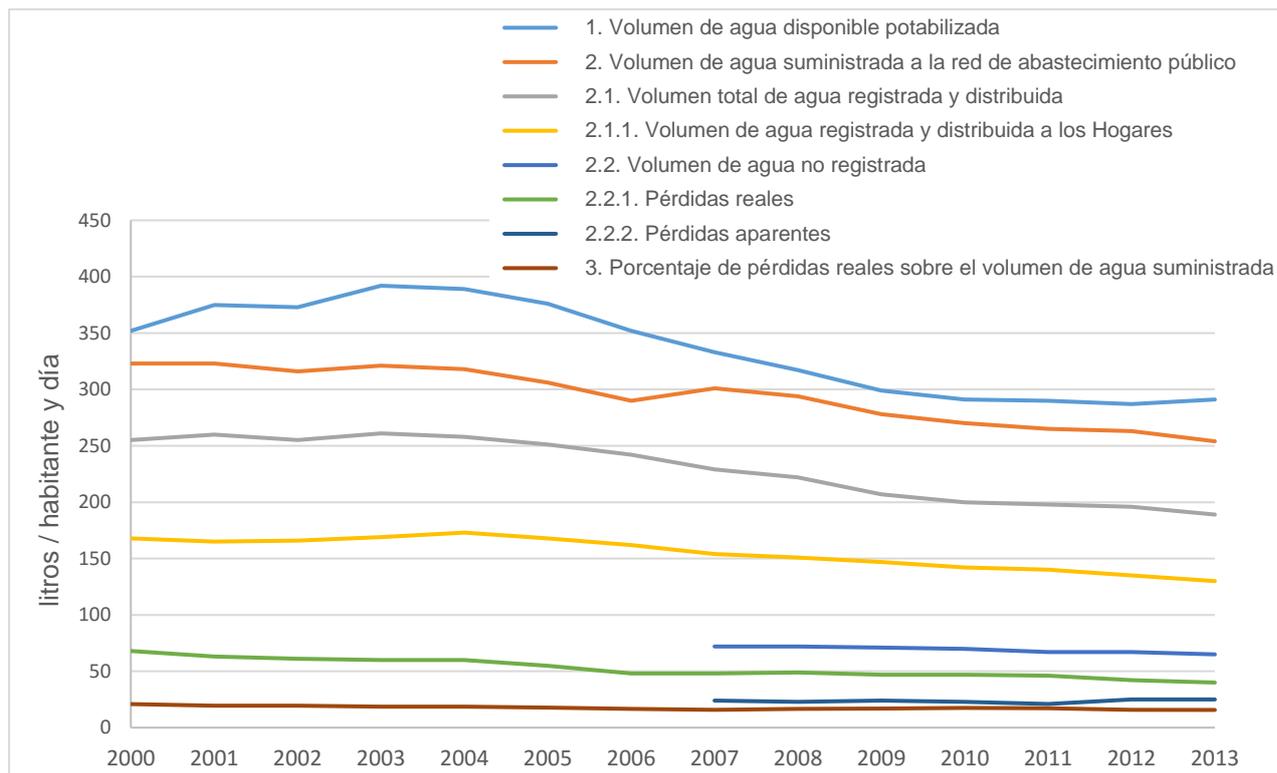


Figura 1-5: Evolución de algunos indicadores hídricos en las ciudades españolas (INE 2016).

Existen una serie de cifras que ponen de manifiesto la relación crítica entre la energía y el uso del agua urbana. Por un lado, el aumento de la producción de agua desalada. El informe presentado por el INE en 2008 estimaba en 3,4 hm³/día la producción de agua desalada para el año 2009. Previsiones sobrevaloradas, aunque la realidad no se queda corta, pues en estos momentos el total de las plantas desaladoras en España suman una producción de aproximadamente 1,45 millones de metros cúbicos al día. Siendo éste el quinto país en número de desaladoras del mundo con un total de 900 plantas, de hecho, por ejemplo, el suministro de agua potable de la isla de Lanzarote y de Fuerteventura se realiza totalmente a través de agua desalada. Y del total de agua desalada se estima que el 59% se destina al uso urbano, el 22% al agrícola y el 19% al industrial.

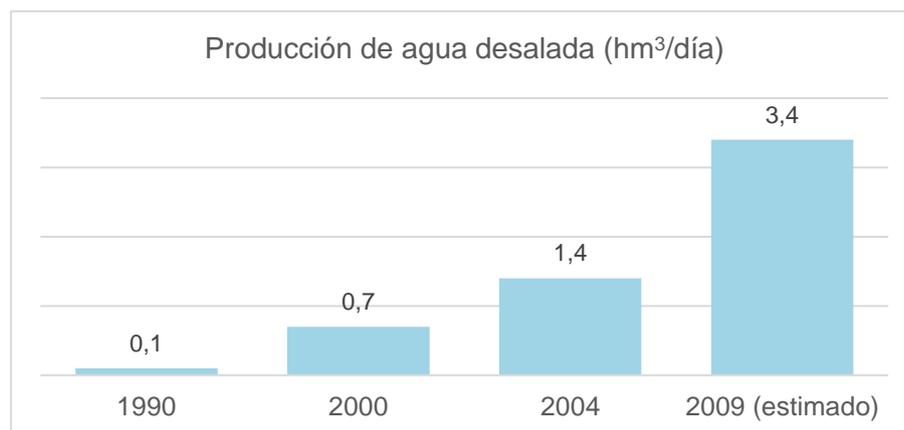


Figura 1-6: Producción de agua desalada (Ministerio de Fomento, CEDEX)

Por tanto, teniendo en cuenta que la desalación se encuentra entre las técnicas más consuntivas desde el punto de vista energético, la relación entre el consumo de agua urbana y el aumento de la energía asociada a él está claro. El siguiente gráfico, incluido en el Informe de Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo del año 2014, muestra la huella energética de las principales etapas del ciclo de agua con ejemplos de plantas de tratamiento que utilizan esas tecnologías. Las ciudades cada vez más deben recurrir a técnicas de obtención de agua que consumen más energía. La relación entre el uso de agua urbana y el consumo de energía queda claro, más aún cuando tal cual se ha dicho las poblaciones más castigadas por las sequías son aquellas que más consumo presentan durante el verano (la estación climatológica más crítica).



Figura 1-7: Consumos específicos de energía. Nota: GWRS, groundwater replenishment system; WWTP, wastewater treatment plant (Lazarova et al. 2012)

El aumento de la energía asociada al uso del agua queda claro, independientemente de cual sea el destino final de ésta, las ciudades o los campos, o qué procesos hayan propiciado este aumento. También el margen de mejora en estos dos usos es del mismo orden de magnitud. Pero mientras que en el riego la necesidad se ha presentado prácticamente por sorpresa, en el uso urbano se ha ido poniendo de manifiesto de manera mucho más gradual. Por ello, es mucho más fácil de explicar la motivación de todo este trabajo a partir de la reciente historia del regadío español que es la que a continuación se resume.

Uno de los objetivos de los últimos tiempos en el campo del regadío ha sido identificar estrategias que permitan aumentar la productividad de los cultivos, promoviendo la conservación y uso racional del agua e independizándolos del impacto de los inevitables ciclos de sequía. Muestra de este objetivo global es la creación e implantación a lo largo de los últimos quince años de diversos planes, normativas y propuestas, tanto del Gobierno Español como de la Unión Europea, todas ellas encaminadas a mejorar la eficiencia en el regadío.

Según los antecedentes indicados en el Informe de Sostenibilidad Ambiental publicado por el Ministerio de Medio Ambiente y del Medio Rural y Marino en el año 2010, en el año 2002 el Gobierno Español puso en marcha el primer Plan Nacional de Regadíos extendido hasta el año 2008, que entre otras cuestiones buscaba la modernización de las infraestructuras de regadío y la incorporación de la investigación y de las nuevas tecnologías. De forma paralela a estas políticas, la Unión Europea lanza diferentes directivas que incluyen criterios medioambientales en la gestión y la regulación de los recursos hídricos, la protección de éstos frente a la contaminación y la conservación del medioambiente y la diversidad. A raíz de estas directivas, el Plan Nacional de Regadíos se adapta y completa en sintonía con las nuevas sensibilidades ambientales y sociales. Con este objetivo, en marzo de 2006 se propone un conjunto de actuaciones enmarcadas dentro del conocido como Plan de Choque de Modernización de Regadíos 2006-2008, que plantea una serie de estrategias destinadas a la modernización de regadíos y a promover una mejor gestión de los recursos, todo ello con el objetivo de paliar y minimizar los impactos de futuras sequías, vistas y analizadas las consecuencias de la padecida en los años 2004 y 2005.

Este Plan Nacional de Regadíos, PNR, (2002-2008) establecía cinco programas de actuación referidos a la modernización de los regadíos (existentes, en ejecución, de interés social y privados) y a programas de apoyo dirigidos a formación de técnicos y regantes, normalización de equipos de riego, y estudios sobre eficiencia energética y seguimiento ambiental de obras proyectadas. El PNR suponía una superficie de actuación de 1,13 millones de hectáreas con un ahorro estimado de 1.375 hm³ anuales de agua, dada la obsolescencia de las infraestructuras de las redes y sistemas de riego españoles, la infradotación de la superficie regable y la escasez de agua en prácticamente todo el territorio. Para ello se planificó una financiación de 5.024,58 millones de euros a cubrir entre el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, las comunidades autónomas implicadas y los propios regantes.

Por su parte, el plan de choque del 2006, que únicamente contemplaba mejoras en los regadíos existentes pero no el desarrollo de nuevos regadíos, proponía medidas encaminadas a maximizar el ahorro de agua, con el fin de mitigar las consecuencias de la sequía y dar un impulso hacia la sostenibilidad de los regadíos. Este programa preveía un ahorro de 1.162 hm³ en una superficie de regadío de 866.898 ha, a través de la modernización de los sistemas de transporte, distribución y aplicación del agua en parcela, y el empleo de recursos hídricos alternativos como el agua desalada y regenerada procedentes de la depuración de aguas residuales urbanas.

Alcanzado el horizonte temporal del Plan Nacional de Regadíos y del Plan de Choque, según datos facilitados por la Subdirección de Regadíos y Economía del Agua del MARM, se ha alcanzado casi el 90% de la superficie total contemplada en la planificación y una inversión superior al 80% del total. Actuaciones distribuidas por todo el territorio nacional, consistentes principalmente en la sustitución de sistemas de conducción abiertos por redes de tubería a presión, con el fin de minimizar las pérdidas de agua y aumentar su ahorro. Esta modernización de los antiguos regadíos, ha provocado una tendencia de expansión del riego localizado, con un incremento de casi el 44% de la superficie regada por goteo entre el 2002 y el 2009, en detrimento, fundamentalmente del riego por gravedad.

Todos estos pasos dados hacia la eficiencia hídrica de los sistemas de regadío han traído consigo una consecuencia negativa, o al menos un peaje que debe tenerse muy en cuenta, el aumento de la energía necesaria asociada a los nuevos sistemas de regadío. Porque, cuando antes no se requería prácticamente energía en el uso de sistemas por gravedad y canales abiertos, ahora con el riego localizado y por goteo, las redes a presión que forman estos sistemas necesitan de mucha más energía para funcionar correctamente. El regadío requiere explorar un nuevo concepto de eficiencia, que sin olvidar el uso racional del agua, también busque la eficiencia energética de los sistemas. Una eficiencia que, por otra parte, no se puede desacoplar de la hídrica. La búsqueda de esta eficiencia energética debe estar presente en todas las etapas; desde la planificación y creación de nuevas redes, hasta la explotación de los sistemas existentes, con un enfoque global que permita el ahorro de energía en todo el proceso.

1.2.1. El trinomio agua – energía – cambio climático: los objetivos del Horizonte 2020

En el actual modelo del sector agrario, el regadío juega un papel importante desde cualquiera de las tres ópticas (económica, social y ambiental) de la sostenibilidad. El regadío es un sector relevante, tanto en términos de ocupación (casi 3,5 millones de hectáreas, que suponen aproximadamente el 13% de la superficie agrícola útil y el 7% de la superficie total nacional), como de demanda de agua (en torno al 75% de la demanda correspondiente a los principales usos consuntivos en 2005, aunque con tendencia claramente decreciente debido a las políticas de modernización, tendencia que se refleja en el hecho de que el regadío ha pasado a consumir

en España el 68% de los recursos hídricos (MARM, 2006)). Además, más de un tercio de sus infraestructuras tienen más de 100 años de antigüedad, por lo que su renovación precisa ya de importantes inversiones.

El sector agrario atraviesa profundos procesos de cambio, influenciados por la economía mundial, por el desarrollo normativo de la Política Agraria Común, y por las disposiciones de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE). Además, la agricultura y en este caso el regadío, deben adaptarse a los efectos del cambio climático. Se tiende hacia políticas de eco condicionalidad y desarrollo rural frente a políticas precedentes de fomento de la producción y uso intensivo de recursos.

Se han dado una serie de circunstancias que han propiciado la modernización de las infraestructuras y sistemas de riego, así como la introducción de nuevas tecnologías más eficientes en la gestión del agua de riego. De una parte la limitación de recursos y el aumento de la demanda de agua no sólo por parte de agricultura, también de la industria y del uso urbano. De otra parte, la recuperación de costes también ha tenido implicaciones, no sólo desde un punto de vista de los pagos por el servicio del agua, sino porque plantea la necesidad de un uso más eficiente. Por último, la desvinculación de las ayudas está comportando, para buena parte de los regantes, una reorientación de la producción.

La política agraria no debe ser ajena a la definición de la nueva estrategia común y de futuro “UE 2020”, que destaca la importancia de fomentar la cohesión económica, social y territorial. En definitiva, la agricultura, se integra en la Estrategia UE 2020 a través del reto de una economía más respetuosa con el medio ambiente, en la que la agricultura gestiona la mayor parte del territorio comunitario y tiene un papel esencial en el uso de los recursos, la conservación de las hábitats naturales, la biodiversidad y la lucha contra el cambio climático. Es importante su contribución al crecimiento y al empleo, así como al mantenimiento de la población y la actividad económica del medio rural.

La Directiva Marco del Agua y su transposición a la legislación española (Ley de Aguas, 2001), añaden al objetivo tradicional de la regulación del dominio público hidráulico, presente en la legislación, un nuevo marco normativo que incorpora elementos de protección del agua y ecosistemas acuáticos, terrestres y humedales. Se trata, pues, de una norma de marcado carácter ambiental que supedita la gestión y uso del agua al mantenimiento y la mejora del estado de las aguas.

La posición geográfica de España, se conjuga con la amenaza del cambio climático para configurar un escenario futuro en el que el régimen de lluvias, ya de por sí limitado y discontinuo, derivará hacia una mayor escasez e irregularidad. A este hecho se suma que el regadío es el uso del agua más extendido en algunas zonas, especialmente en aquellas situadas al sur y este del país. De esta forma, durante la época estival se superpone la escasez de precipitaciones con una mayor demanda de agua, no sólo por parte de la agricultura, sino también para el abastecimiento urbano y el sector turístico. No hay que perder de vista que casi el 70% de la

demanda de agua se asocia al riego, y por otra parte se concentra en ciertas zonas de la península, especialmente en la costa levantina, que no forma parte precisamente de la denominada España húmeda.



Figura 1-8: Fotogalería Diario La Verdad (3 Noviembre 2015). “El otoño más lluvioso desde 2001 apenas palió la sequía extrema en la provincia de Alicante. Las precipitaciones han sido beneficiosas para el campo, pero la situación de los embalses sigue siendo crítica.”

En cuanto a la calidad de las aguas, existe una clara y notable diferencia entre las aguas superficiales y subterráneas. En los últimos años la evolución de la calidad de las masas superficiales está siendo positiva, aunque se precisa un esfuerzo adicional en la implementación de nuevas estaciones de medición. La situación en el caso de las aguas subterráneas es muy diferente, una consecuencia de la aplicación inadecuada o abusiva de productos fertilizantes, de la infiltración de estabulaciones ganaderas y, en menor medida, de los vertidos urbanos. Éstas son, en síntesis, las principales causas de la contaminación por nitratos que nuestros acuíferos sufren. Y en cuanto a la disposición de agua en los acuíferos existe un parámetro clave, la escurrentía (Nieto, 2016). Se deduce (a partir de datos obtenidos de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir durante 53 años) que la relación entre la escurrentía y las precipitaciones es exponencial. De modo que para precipitaciones elevadas (900 mm) la cantidad de agua que se convierte en escurrentía puede superar el 70%, mientras que para valores medios (500 mm) el coeficiente de escurrentía es inferior al 10%. Derivado de lo anterior se puede suponer que una disminución del 10% de las precipitaciones puede originar hasta un 60% menos de escurrentía a los ríos; y que por debajo de los 400 mm de precipitaciones no se produce aportación alguna de agua. Ambas cuestiones (la contaminación y la disponibilidad de agua en los acuíferos) no son

sólo cuestiones que afectan al riego, pues claro está que las zonas urbanas con un coeficiente de escorrentía mucho menor y con una capacidad de contaminación industrial mayor, son también muy responsables del estado actual de los acuíferos.

Con todo lo expuesto, queda patente que la sostenibilidad del uso del agua en España está ligada de manera fundamental a su uso en agricultura. El aumento del papel de los recursos hídricos alternativos en la agricultura, puede dotar de garantía, con agua de calidad, a la agricultura más productiva, aunque la clave se encuentra en la modernización sostenible de los regadíos que persigue la eficiencia y el buen uso de los recursos hídricos. Y todo ello sin olvidar la eficiencia del recurso asociado a esta modernización, la energía, asunto al que está dedicado este documento.

1.1.2.1. La modernización del regadío

La modernización de la agricultura de regadío es un hecho. Así, según la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE) publicada por el MAGRAMA en el año 2013, la evaluación de los sistemas de riego en España sigue una clara tendencia hacia el riego localizado en detrimento del riego por gravedad. Por un lado existe un incremento de la superficie regada en España, una tendencia al alza que se viene manteniendo desde el año 2006, sólo alterada durante al año 2010 con un ligero descenso del 0,4% de la superficie regada. Es importante, tal como indica esta encuesta, tener muy presente que la disponibilidad hídrica en las distintas regiones ha sido, a lo largo de todos estos años, muy variable con años de sequías severas y campañas excepcionalmente húmedas como las de los años 2010 ó 2013. Ello puede explicar el leve descenso de la superficie regada habida en esos años.

Junto con el incremento de la superficie regada hay un cambio en la evolución de los sistemas empleados. El tipo de riego que más ha aumentado es el riego localizado que crece de forma continuada cada año. El sistema automotriz, que también ha ido en aumento, fluctúa más con los años debido principalmente a que se trata de un sistema más propio de cultivos herbáceos. En general, y tal como se muestra en la Figura 1-9, los sistemas más tecnificados son los que han aumentado más en los últimos años, relegando a un segundo plano a los sistemas más tradicionales como el riego por gravedad.

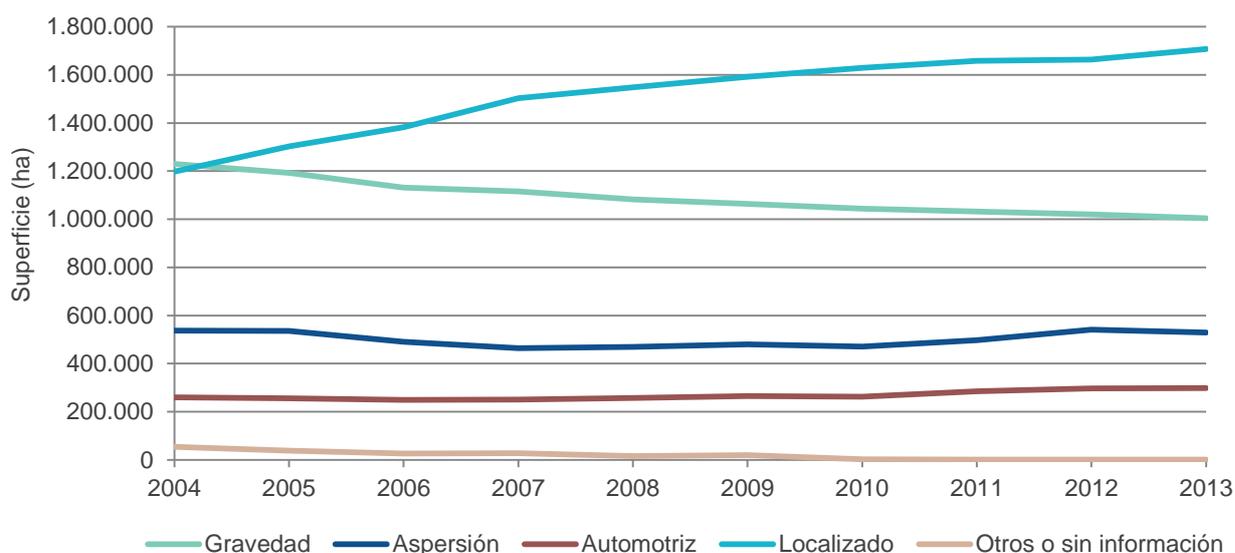


Figura 1-9: Evolución de la superficie regada según tipos de Riego. Años 2004-2013 (Fuente: Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos, ESYRCE, MAGRAMA 2013)

En cuanto al volumen de agua consumido, de los datos disponibles se concluye que el mayor porcentaje aún lo demandan los tradicionales sistemas de riego por gravedad. Y si además se tiene en cuenta la distribución de superficies por tipología de riego, queda patente que el menor consumo de agua corresponde a los sistemas de riego a presión. Éstos son, de acuerdo con los datos del ESYRCE del 2013, los principales tipos de regadío en el territorio nacional. De una parte los sistemas localizados (1.707.576 ha; 48,23% del total). De otra el riego por gravedad (1.004.782 ha; 28,37% del total).

El proceso de modernización que han ido sufriendo los sistemas de riego es principalmente, el establecimiento y consolidación de redes colectivas de distribución de riego por una parte, y por otra la transformación del tradicional riego en parcela a sistemas más eficientes desde el punto de vista del consumo de agua, como son el riego por goteo o por aspersión. Es decir, los regantes han ido sustituyendo acequias y canales por redes de tuberías a presión.

Este cambio patente en los sistemas de riego, trae consigo dos consecuencias fundamentales. Por un lado la disminución del consumo de agua. Las necesidades de agua para regar la misma superficie son mucho menores, lo que indica un claro aumento de la eficiencia hídrica. Pero también existe otra consecuencia no tan deseable, el aumento de la energía asociada al riego. Los campos que antes se regaban por gravedad y por tanto requerían de un mínimo o ningún aporte energético, ahora se riegan por goteo o aspersión, sistemas que siendo más eficientes desde el punto de vista del consumo de agua, requieren para funcionar energía.

En el marco de la lucha contra el cambio climático o calentamiento global, España adquirió a través de la firma del Protocolo de Kioto, el compromiso de no aumentar sus emisiones de CO₂ equivalente en el horizonte de 2012, en más de un 15% respecto a las emisiones de 1990. En el

año 2006 ya se superaba ampliamente el umbral de emisiones de CO₂ que se comprometió a alcanzar para el 2012. A este respecto, el 78% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) proceden del sector del procesamiento de la energía, que agrupa a las industrias del sector energético, seguido del transporte, las industrias manufactureras y de la construcción. La agricultura ocupa el cuarto lugar en emisiones de CO₂ equivalente, pero el segundo en emisiones de GEI en metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), con mayor poder de calentamiento de la atmósfera que el propio CO₂. Este sector apenas supone el 11% de las emisiones totales y es además uno de los sectores que menos ha aumentado sus emisiones con respecto al año 1990. De esta forma el sector del regadío no tiene un papel tan relevante en la emisión de GEI, pues más de la mitad de las emisiones globales se deben a las industrias energéticas y al transporte, pero alberga cierta capacidad para proporcionar recursos que favorezcan la disminución de emisiones, como fuente de materias primas para la elaboración de biocombustibles o como sumideros de CO₂.

Sin embargo, si bien la agricultura no ocupa un puesto prioritario desde el punto de vista de los causantes del cambio climático es, a pesar del grado de desarrollo alcanzado, muy sensible a las condiciones climáticas. De hecho ya ha quedado patente que el cambio climático tiene influencia en las modificaciones del régimen de lluvia, con la repercusión que esto conlleva tanto en términos de actividad económica como de conservación del medio. Por tanto, no siendo uno de los principales causantes del cambio climático sí es una de las principales víctimas.

La necesidad de garantizar el uso sostenible de los recursos, los principios de seguridad y garantía alimentaria, el equilibrio territorial, la adaptación al cambio climático y la necesidad de conseguir una agricultura cada vez más sostenible, hacen imprescindible un nuevo impulso de la modernización de los regadíos. Con este espíritu se formuló la Estrategia Nacional para la Modernización Sostenible de los Regadíos Horizonte 2015. Éste comprende un conjunto de actuaciones, establecidas de acuerdo con las comunidades autónomas, dirigidas a asegurar la máxima eficiencia en el uso del recurso del agua y el respeto al medioambiente. Estas actuaciones incluyen la mejora de la red de transporte y distribución, la construcción de estaciones de bombeo y filtrado con sus redes eléctricas asociadas, el aumento de la capacidad de almacenamiento, la incorporación de recursos hídricos alternativos, la automatización, la incorporación de tecnologías de la información y de las comunicaciones y, en fin, actuaciones de mejora de la eficiencia energética y promoción de energías alternativas.

Por tanto, siendo los sistemas de agua (riegos o urbanos) causantes y víctimas del cambio climático, se requiere de medidas que contribuyan a la mitigación de éste, pues por ejemplo en todo el litoral valenciano aunque evidentemente, el impacto visible de la disminución de las masas de hielo no parece afectar ya que se carece de ellas; es un magnífico ejemplo para demostrar que todo lo que pasa en el planeta afecta a todos sus habitantes. En efecto, como consecuencia del deshielo se elevará el nivel del mar y, debido a ello, los 518 kilómetros del litoral valenciano, en su inmensa mayoría playas, se verán irremediablemente afectados. Lo indicado tiene repercusiones tanto en el medio natural (playas, acuíferos y humedales costeros

como la Albufera) como en la sociedad (2.712.392 habitantes en 60 municipios) y en la economía valenciana la cual depende en gran medida del sector turístico de sol y playa (Nieto, 2016). Por tanto, aunque sólo sea por interés se requiere de soluciones y propuestas concretas de todos los agentes implicados desde el ciudadano, a la empresa o los gobiernos no sólo para la adaptación, sino para la mitigación del cambio climático y el desarrollo sostenible.

1.2.2. Las consecuencias energéticas de modernizar el regadío

El requerimiento de energía para el agua en sus tres usos (riego, urbano e industrial) se ha disparado, sobre todo el derivado de la modernización del regadío, tal cual se ha comentado. La Tabla 1-1 muestra el estado de la cuestión.

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

Indicadores de producción y consumo de energía			
USO			kWh/m ³
PRODUCCIÓN	ELÉCTRICO	Hidroelectricidad (salto 100 m)	0,21
		Refrigeración central 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 manom. media 723 m)	3,7
	DESALACIÓN	Desalación de agua marina	3,5 - 4
Desalación de agua salobre		1,4 - 1,8	

A la vista de la tabla anterior, y desde la óptica del consumo de energía para el uso del agua, se puede observar cómo el mayor gasto energético se asocia a la obtención del agua, bien para su transporte (desde donde está hasta donde se la requiere) con grandes obras (3,7 kWh/m³) bien con la desalación (3,5 kWh/m³). Ello pone de manifiesto la necesidad de un uso eficiente y racional del agua. La mejor manera de ser eficiente en el uso de la energía es no necesitarla, por

lo que cuanto más control se realice en el uso del agua menos necesidad existirá de transportarla hasta donde escasea o de desalarla donde sea posible (orilla del mar). Del resto de usos los más consuntivos, aunque a mucha distancia, son los bombeos asociados al riego y las etapas de depuración de agua. Sin embargo conviene decir que los avances tecnológicos están modificando permanentemente los valores de las intensidades energéticas de la Tabla 1-1. En la actualidad se trabaja en aprovechar al máximo el biogás de las depuradoras para generar energía. Algunas de ellas ya son autosuficientes.

Tal cual se ha visto, los apoyos económicos del estado en los últimos 20 años se han encaminado hacia la modernización del regadío lo que ha supuesto un ahorro en el gasto de agua por superficie irrigada considerable. Ahora se riega la misma superficie con mucha menos agua. Este proceso que ha logrado que el regadío sea menos vulnerable durante los ciclos secos ha supuesto, por el contrario, un aumento del consumo de energía. El cambio sufrido por los sistemas de regadío, de riego por gravedad a riego por aspersión o localizado en su mayoría, requiere de la implantación de sistemas a presión y por consiguiente del uso de energía que aporte la necesaria energía elástica al fluido. En la Tabla 1-2 se detalla la evolución habida en el último siglo. Los valores mostrados evidencian que en la última mitad de siglo, mientras que la superficie de regadíos y el consumo de agua se han multiplicado por 2,5, el consumo energético en el mismo tiempo lo ha hecho por 19.

Tabla 1-2: Evolución del consumo de energía para riego en España (Corominas, 2010)

Evolución del consumo de energía para riego en España				
Año	Superficie (miles de ha)	Uso del Agua (hm ³)	Consumo de agua (hm ³)	Consumo de energía (GWh)
1900	1.000	9.000	5.400	0
1930	1.350	12.150	7.594	182
1940	1.500	12.750	8.288	191
1950	1.500	12.375	8.353	309
1970	2.200	17.600	13.320	1.056
1980	2.700	20.925	14.648	2.093
1990	3.200	24.000	17.400	3.480
2000	3.410	23.870	18.499	4.893
2007	3.760	24.400	20.163	5.866

La Figura 1-10, ilustra cómo ha ido incrementando tanto el uso del agua como el gasto energético a partir del año 1950. Claramente se aprecia cómo el incremento de la superficie regada y el consumo de agua han ido al compás mientras que el crecimiento del gasto energético ha visto un crecimiento muy superior. En este mismo periodo la eficiencia en el uso del agua ha mejorado un 21% (desde 8,25 hm³/ha en 1950 a 6,48 hm³/ha en 2007) mientras que el consumo de agua, que contempla la demanda de agua menos los posibles retornos originados por el riego, únicamente ha mejorado en un 3% (de 5,56 hm³/ha a 5,36 hm³/ha) en el mismo periodo de tiempo, lo que implica una importante minoración de los retornos de riego. La menor utilización de agua permite un uso más eficiente y, al tiempo, un descenso de su contaminación aunque al estar ligado a la evapotranspiración de los cultivos implantados, la disminución del consumo no sea tan acusada (Corominas, 2010).

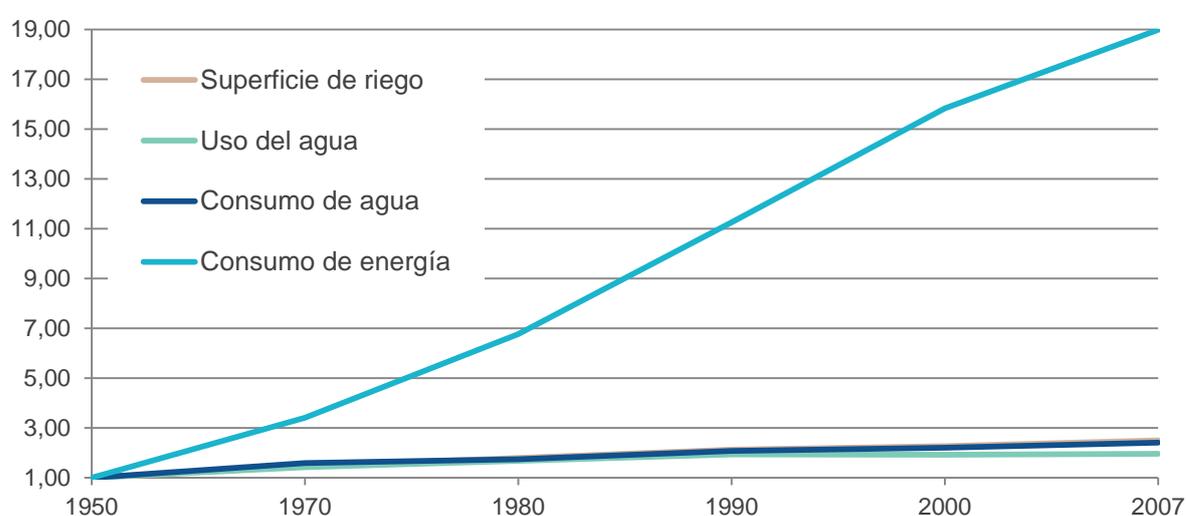


Figura 1-10: Evolución del consumo de agua y energía para riego en España con respecto al año 1950.

La modernización de los sistemas de regadío ha ido acompañada, tal cual se ha visto, de una mayor exigencia de energía. Al mismo tiempo se ha producido una diversificación de las fuentes de suministro, hasta alcanzar el uso de aguas subterráneas, más consuntivas que las aguas superficiales, un 28,4% del total. Las fuentes alternativas (trasvases o desalación) suponen un 4% de los aportes de agua. Energéticamente muy exigentes, parece que seguirán aumentando sobre todo en la zona del litoral mediterráneo donde la agricultura intensiva es habitual.

La Tabla 1-3 muestra, teniendo en cuenta las fuentes de suministro, una estimación de las necesidades energéticas asociadas a los diferentes sistemas de riego. Siendo los valores mostrados en la tabla valores medios, la intensidad energética del regadío está comprendida en el interior de una horquilla cuyo valor inferior, 0,02 kWh/m³, corresponde a sistemas de riego con aguas superficiales por gravedad. Un valor superior de referencia puede alcanzar 0,68 kWh/m³ en el riego localizado realizado con aguas subterráneas. El valor máximo, 4 kWh/m³, corresponde obviamente a cultivos intensivos que utilizan agua desalada (Corominas, 2010).

Tabla 1-3. Energía asociado a cada sistema de riego (Corominas, 2010)

Energía consumida (kWh/m ³)								
SISTEMA DE RIEGO	BAJA			ALTA			TOTAL	
	SISTEMA DE RIEGO	CAPTACIÓN		TRANSPORTE Y TRATAMIENTO			ZONA RIEGO (BAJA)	INCLUIDO TRANSPORTE Y TRATAMIENTO (ALTA Y BAJA)
		SUPERFICIAL	SUBTERRÁNEO	TRASVASES	DESALACIÓN	REUTILIZACIÓN		
Gravedad		0,02	0,15	1,20	3,70	0,25	0,04	0,07
Aspersión y automotriz	0,24	0,05	0,25	1,20	3,70	0,25	0,35	0,35
Localizado	0,18	0,10	0,50	1,20	3,70	0,25	0,43	0,53
TOTAL REGADÍOS	0,13	0,06	0,39	1,20	3,70	0,25	0,28	0,34

Todas estas cifras, ponen de manifiesto la necesidad de disponer, desde el punto de vista energético, de redes más eficientes. Y si hasta ahora todas las políticas y estrategias de los últimos años han promocionado sistemas más eficaces desde la perspectiva del ahorro de agua, ahora es también prioritario atacar al peaje asociado a esta eficiencia, el aumento del uso de la energía.

Y si el objetivo es implementar medidas de ahorro y eficiencia energética en la explotación de redes de riego, es importante conocer los puntos críticos del consumo energético de este tipo de redes. Éstos se encuentran principalmente en las captaciones y en las estaciones de bombeo, y su consumo energético depende en gran medida de la procedencia del agua. Y así, por lo general, las aguas subterráneas son mucho más consuntivas que las superficiales. Resulta obvio que el consumo energético será mayor cuanto más desfavorable sea la diferencia de cotas entre la captación y el punto de consumo. Además en el caso de la captación de aguas subterráneas, es importante no sólo el desnivel entre la boca del pozo y el consumo, sino los niveles piezométricos de los acuíferos, que, por ejemplo, en las zonas del levante y sureste español ya se sitúan entre 200 y 400 metros de profundidad (MINETUR, 2008) lo que supone un aporte energético más que considerable puesto que la altura a vencer por las bombas será esa profundidad más el desnivel desde el brocal del pozo al punto de consumo más elevado. Y a todo ello hay que añadirle las inevitables pérdidas de carga en el recorrido del agua.

En efecto, el estudio de las zonas con predominio de riego con aguas subterráneas procedentes de acuíferos sobreexplotados y el del consumo de energía eléctrica por comarcas (PNR H-2008, MAPA 2002), pone de manifiesto que las zonas de riego con mayor consumo energético son las que utilizan agua subterránea, zonas en las que la agricultura ejerce una mayor presión sobre los acuíferos.

Otro de los puntos críticos es la presión de servicio que demande el sistema de riego, que depende de si es por gravedad, por goteo o por aspersión. Por ejemplo en el riego en superficie, la demanda energética de la distribución es nula dado que el agua se distribuye por las parcelas por gravedad. En los sistemas de riego por goteo la presión de servicio necesaria a la entrada de las parcelas suele oscilar entre los 2,5 y los 3 bares, aumentando a 4 – 4,5 bares en el caso de riego por aspersión. En cualquier caso, en los últimos años la presión requerida por algunos goteros se sitúa ya por debajo de 1 bar. Desde la óptica del ahorro energético es una excelente noticia.

Por último el consumo energético también está condicionado por la propia configuración y elevación del sistema, y no sólo de si la diferencia entre la cota del punto de captación y la zona de consumo es positiva o negativa, también lo condiciona el propio trazado de la red de tuberías.

1.2.3. El camino recorrido: el protocolo del IDAE.

El IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) está llevando a cabo una serie de actuaciones dirigidas por un lado a la diversificación energética a través de fuentes renovables, y por otro al ahorro de energía. Dentro de este segundo objetivo, ha desarrollado una serie de medidas agrupadas en la Estrategia de Eficiencia Energética en España, con sus planes de acción 2005-2007 y 2008-2012.

Estos planes engloban dos itinerarios fundamentales. De un lado la formación e información de técnicas más eficientes en el uso de la energía en el sector agrario, con el fin de formar y concienciar a los agentes implicados de la importancia de la eficiencia energética. En este sentido, el IDAE ha publicado un total de once documentos que explican, para las distintas tareas agrícolas, cómo alcanzar diferentes medidas de ahorro energético.

El otro itinerario, desarrollado en el Plan de Acción 2008-2012, propone la “Realización de Auditorías Energéticas y Planes de Actuación de Mejoras en Comunidades de Regantes”. Para esto el IDAE ha creado un protocolo de auditorías en las comunidades de regantes con el objetivo de realizar un análisis exhaustivo de la situación energética de cada comunidad. El protocolo propuesto trata de identificar los puntos menos eficientes de cada red de riego para, después, poder mejorarlos.

Por el importante papel que ha venido jugando en los últimos años, conviene efectuar alguna puntualización sobre el protocolo de auditorías desarrollado por el IDAE (detallado en el texto “Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes” publicada por el IDAE y el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, protocolo incluido en la serie “Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura, en abril del 2008).

La auditoría planteada en el documento se sintetiza en el valor de un indicador final *ESE* (Eficiencia de Suministro Energético), definido cual sigue:

$$ESE(\%) = \frac{|\Delta E|}{ICE} \cdot 100$$

Donde el numerador, ΔE , estima las necesidades energéticas del sistema de distribución de riego, igual a la diferencia entre el valor de la energía media que se inyecta en el sistema, EI ; y la energía media que demandan los hidrantes, ED . El denominador, ICE (Índice de Carga Energética), evalúa la energía media de bombeo aportada al sistema.

Por tanto este indicador trata de comparar las necesidades del sistema con el aporte realizado. Si se satisfacen las necesidades con menos aportes, la eficiencia crece. Si por el contrario las necesidades son mínimas pero exigen aportes elevados, entonces la eficiencia resultante es muy baja. Este razonamiento que es lógico desde una óptica estrictamente cualitativa, presenta algunos defectos conceptuales, a saber:

- a) En el procedimiento planteado no se distingue entre el volumen inyectado en el sistema (suma de las distintas captaciones) y el que realmente es utilizado. La diferencia entre ambos valores reside en la existencia de fugas que pueden existir en las redes, más aún a medida que las redes vayan envejeciendo. De hecho, y esto es quizá aún más cuestionable, la energía demandada (ED) no se calcula en función del volumen consumido por los hidrantes sino en función de la superficie potencialmente regable, a una determinada cota y con intervalos de cinco metros. Se debería tener en cuenta que puede que exista disparidad de cultivos, y por tanto haya parcelas que no requieran ser regadas o no demanden la misma cantidad de agua o incluso que estén abandonas. Por tanto, la energía demandada debería ligarse al volumen entregado, que si bien guarda una estricta correlación con la superficie a regar, ésta no permite contemplar singularidades.
- b) El cálculo de la energía final (con independencia de la cuestión anterior) se realiza de una manera muy general. De hecho presupone una presión de servicio necesaria en el riego por goteo de 30 metros, cuando es posible que ésta se disminuya a 20 metros e, incluso, se tiende a los 10 metros porque los avances que se están desarrollando en el diseño de goteros avanzan hacia la disminución de las cargas requeridas. Por esto, este dato debería adaptarse a cada sistema concreto.
- c) Las pérdidas de carga se estiman siempre en 10 metros. No importa que el hidrante esté cerca o a varios kilómetros del punto de inyección. Además en ningún momento se asocia las pérdidas de carga a las condiciones hidráulicas de la red (diámetros, caudales y longitudes) ni al modo de riego (a la demanda o por turnos).
- d) No tiene en cuenta los aportes de energía natural, o sea, la energía gravitatoria por la propia elevación del punto de captación disponible, que en muchos casos puede ser importante e incluso la única fuente de energía. De hecho sólo considera los bombeos.
- e) Si se desea clasificar el protocolo como una auditoría, ésta debería aclarar en qué se invierte la energía que se inyecta en el sistema. Es decir, desagregar la demanda energética en sus diferentes conceptos (pérdidas en fugas, por fricción, en bombeo y

otros). El problema principal del protocolo desarrollado es, pues, que no aporta información sobre cómo se gasta la energía, y si bien indica que existe un margen global de mejora, no concreta dónde se puede ahorrar energía.

En resumen, el protocolo del IDAE más que una auditoría, es una primera aproximación al balance energético que ignora conceptos fundamentales de la hidráulica a presión. El agua es la portadora de la energía, y por ello es imprescindible modelar su comportamiento en la red de transporte y distribución. Para ello una auditoría energética requiere realizar previamente la hídrica, dado que no se pueden separar problemas que están absolutamente acoplados: el energético y el hidráulico. Este problema, lo aborda el capítulo 8 del referido Protocolo de Auditoría Energética, *Propuestas de mejoras y valoración* que propone, entre otras, mejoras en el diseño y manejo de la red, así como en equipos y estaciones de bombeo. Medidas lógicas pero que serían más razonables si se propusieran a la luz de una auditoría rigurosa previamente realizada que ayudara a identificar los puntos más ineficientes del sistema.

Por tanto, siendo de una notable utilidad, el protocolo propuesto por el IDAE como base de diagnóstico (no de auditoría) sobre la eficiencia energética de la red de riego, puede mejorarse notablemente. De hecho convendría desarrollar una herramienta que, solicitando menos datos que la herramienta del IDAE (no tiene mucho sentido recabar multitud de datos superfluos que después no se utilizan) fuera más amigable y directa.

Es importante recordar, que para realizar una auditoría energética de la red de riego (Cabrera et. al, 2010) cercana a la realidad del sistema, no se puede prescindir de la auditoría hídrica previa. Asimismo se debe disponer del modelo hidráulico ajustado y calibrado de la red. Este modelo puede resultar tremendamente útil desde cualquier punto de vista, dado que permite conocer, gestionar y plantear modificaciones, mejoras y soluciones a las redes de agua. Pero es cierto que se trata de una tarea laboriosa, que requiere sobre todo del conocimiento exhaustivo del sistema.

Por este motivo es vital, como paso previo a la realización de la auditoría energética (que requiere de tiempo y recursos), diagnosticar el comportamiento energético del sistema. El diagnóstico es, pues, una visión aproximada de la eficiencia energética de la red y al mismo tiempo una estimación del margen de mejora. Lo más importante de este diagnóstico es informar al gestor, antes de acometer unas auditorías siempre laboriosas, cómo se comporta su sistema desde el punto de vista energético y, si necesita mejoras, que estime con precisión razonable su margen de mejora. Este diagnóstico, tal cual se verá será, es el punto de partida del proceso de mejora para los sistemas de agua a presión propuesto en todo este trabajo.

1.2.4. Estrategias de operación. Posibilidades de mejora

La implantación de las redes a presión en los sistemas de riego, además de facilitar la gestión ha supuesto un ahorro económico, consecuencia del ahorro de agua, dado que se eliminan las pérdidas de agua por evaporación (salvo las que puedan darse en las balsas de

almacenamiento) y minimizan las de infiltración. Además, este tipo de suministro permite controlar con mayor precisión los consumos y evitar la construcción de balsas de almacenamiento en las parcelas, ya que es posible la instalación de pequeños grupos de bombeo individuales que aporten presión a las instalaciones de riego localizado. Por otro lado, el hecho de establecer redes a presión colectivas ha permitido controlar el almacenamiento y consumo tanto de agua como de energía de forma global, por parte de las comunidades de regantes, lo que supone un rendimiento mayor que si se hiciera de forma individual.

Las posibles medidas de ahorro en este tipo de sistemas se pueden clasificar entre las que afectan al diseño de la red, como puede ser la creación de sectores; a su operación y mantenimiento, como el establecimiento de turnos; o a sus instalaciones como el cambio o ajuste de los grupos de presión. La evaluación de la mejor configuración posible en la contratación del suministro eléctrico, si bien no contribuye a disminuir el consumo energético, si disminuye el coste económico de éste.

En lo que sigue se describen a título de ejemplo dos de las actuaciones más frecuentes y eficaces en sistemas de riego a presión. A lo largo de todo este trabajo se tratarán en detalle éstas y otras medidas. Las dos que a continuación se describen permiten reducir energía suministrada en exceso, la primera tiene un coste razonable si se implementa en la etapa de diseño, siendo a posteriori más costosa. La segunda puede, y debe, implementarse en cualquier momento.

Sectorización del sistema por cotas homogéneas

Existen situaciones en la que debido a las irregularidades del terreno pueden existir diferencias sustanciales entre los distintos puntos a regar en un mismo sistema. En estos casos la bomba se debe dimensionar y debe funcionar para aportar la altura necesaria para llegar al punto de consumo más desfavorable con presión suficiente. Este hecho implica por un lado que toda el agua debe ser impulsada a la máxima altura necesaria, independientemente de la demanda de la zona más elevada, con el gasto energético que esto supone y por otro lado que en las zonas de consumo más bajas existirá sobrepresión, con los efectos negativos que ésta conlleva (mayor posibilidad de rotura de las tuberías y elementos, y mayor cantidad de agua fugada), incluso si la sobrepresión es muy elevada puede requerirse elementos que la disminuyan como válvulas reductoras de presión (VRP), lo que implica un despilfarro energético en sí mismo, ya que se está suministrando (gastando) energía que luego se va tener que disipar (tirar).

Una posible solución a este problema, es la sectorización de instalaciones por cotas homogéneas, es decir, si se agrupan las parcelas que tengan cotas similares creando sectores independientes, se pueden instalar bombas propias para cada sector, de manera que cada una de ellas impulse a la altura de la parcela el volumen que demanda esa parcela, de esta forma existirá una bomba que sí tenga que elevar el

agua a la altura máxima pero únicamente la que demanda la parcela más alta. Con esto se evita aportar a toda el agua una energía innecesaria y derivar en sobrepresiones. Aunque esto puede suponer un coste de instalación mayor, se trata de más bombas y más elementos, a la larga el ahorro en energía puede compensar, pues supone impulsar volúmenes menores a alturas más reducidas.

Al hablar de sectores de cotas homogéneas, también se pueden incluir zonas con diferentes presiones de servicio, es decir, cuando en un mismo sistema convivan diferentes métodos de riego (gravedad, goteo o aspiración), dado que cada uno requiere una presión de servicio, al igual que ocurre con los desniveles, cada zona requerirá que la bomba suministre una altura diferente, por tanto siempre que sea posible es recomendable que cada sector esté formado por parcelas que utilicen el mismo sistema de riego.

Dentro de esta misma filosofía, es posible gestionar los sectores no necesariamente con la instalación de diferentes bombas sino con una combinación con bombas de velocidad variable y la asignación de turnos de riego. Esto implica que cada sector, que posee características similares de requerimientos de presión (bien por cotas bien por sistema de riego), riega en un turno diferente, por lo que el punto de funcionamiento de la bomba se ajustará durante ese turno a los requerimientos de altura y caudal de ese sector, gracias al variador de frecuencia durante el siguiente turno, la bomba podrá ajustarse a los requerimientos del nuevo sector. Ésta puede ser una de las medidas más eficaces desde el punto de vista del ahorro energético.

Por este motivo, esfuerzos y recursos deben ir enfocados a ajustar las presiones, el diseño de redes o la reorganización de los sistemas en turnos han de ser el primer punto a considerar antes incluso de buscar e invertir en grupos de presión más eficientes, pues la mejor manera de reducir la energía implicada es no tener que suministrarla.

Automatización de las instalaciones según los requerimientos de presión y demanda (Reducción de energía de exceso)

Si la demanda de una red o de un sector de riego es constante, los grupos de presión únicamente requieren ser seleccionados de forma cuidadosa, de manera que éstos funcionen con el rendimiento óptimo en el punto de funcionamiento, que será fijo. Pero si la demanda es variable, por criterios de explotación del sistema, resulta imprescindible una regulación. En estos casos los grupos deben disponer de equipos de automatización capaces de captar datos de presión y/o caudal y controlar el funcionamiento en función de éstos.

En este sentido, las posibilidades varían en función del parámetro que se mida y en consecuencia se controle. Normalmente, midiendo la presión (regulación manométrica), midiendo el caudal (regulación caudalimétrica) o ambos (regulación

manocaudalimétrica), eligiendo el sistema en función de los requerimientos y posibilidades del sistema.

La forma de regulación más conveniente (regulación manocaudalimétrica), consiste en variar el régimen de las bombas de manera que se mantenga la presión de consigna en los puntos más desfavorables de la red. Las sondas que miden la presión instaladas en estos puntos más desfavorables, transmiten la señal a los autómatas instalados en las bombas que varían y ajustan el funcionamiento de ésta, modificando su velocidad de giro para que se ajuste al nuevo punto de funcionamiento. La presión en los puntos de consumo de la red variará en función de la demanda de éstos, disminuyendo cuando la demanda aumenta y aumentando cuando los requerimientos de agua disminuyen, por tanto, regular este parámetro es garantizar que se recibe el agua que se necesita en cada instante pero a la presión mínima que garantice el buen funcionamiento del sistema y lo más cercana a ésta de manera que no exista un exceso de presión.

Por otro lado la regulación manométrica más sencilla pero menos efectiva, fija una presión de consigna a la salida de la estación de bombeo, función de la presión en el nudo más desfavorable, sin considerar las posibles variaciones de la demanda, por lo que pueden darse sobrepresiones (sobre todo en los puntos más favorables) cuando las demandas son pequeñas y presiones inferiores a las requeridas en los puntos más desfavorables cuando la demanda aumenta.

Por tanto, la regulación de los grupos de presión, por ejemplo mediante el empleo de bombas de paralelo a régimen nominal junto con otras de velocidad variable, resultan soluciones muy interesantes (Ortega et al. 2001) desde el punto de vista energético. Permiten por un lado ajustar el gasto de agua al adaptar el sistema a la curva de la demanda de la red, las bombas trabajan más próximas a su punto de funcionamiento óptimo con la consecuente mejora de la eficiencia energética además de evitar el exceso de presión y disminuye el número de bombas a instalar dado el juego que se establece entre ellas.

1.2.5. Implicaciones energéticas del riego a la demanda y del riego programado

Las necesidades de agua de los cultivos vienen determinadas por una serie de parámetros ambientales como la temperatura, la humedad relativa y del suelo, la radiación, etc. Los métodos basados en el riego a la demanda consisten en medir todos estos parámetros en cada instante y relacionarlos con la cantidad de agua que se debe suministrar al cultivo. Aquí reside la dificultad y la causa de que muchos de los métodos a la demanda estén hoy en día en desuso; la imposibilidad de contemplar todos los parámetros que intervienen. Limitando su uso sobre todo al riego bajo cubierta, que permiten un mayor control de los parámetros ambientales (Alarcón y Moreno, 2003). Los denominados métodos de riego a la demanda, consisten en activar y adecuar el riego de acuerdo a los procesos evapotranspirativos que sufren los cultivos. Cabe

destacar, que el riego a la demanda, siempre que esté bien diseñado, asegura un óptimo estado de nutrición hídrica y mineral del cultivo, ya que posee la gran ventaja de que aporta agua al cultivo cuando sus necesidades fisiológicas así lo requieren. Lo que, además, supone un ahorro de agua y fertilizantes.

Cabe diferenciar pues entre la dosis y la frecuencia de riego. De modo general se puede afirmar que lo adecuado es fijar las dosis de riego, e ir ajustando las necesidades hídricas con las frecuencias de riego, que vendrán determinadas por la capacidad de retención de agua del suelo. Superar esta capacidad supondrá un drenaje excesivo y un lavado excesivo de nutrientes. Y aunque teóricamente siempre interesan dosis pequeñas, esto supone varios inconvenientes, ya que se incrementa la frecuencia de riego y por consiguiente el gasto energético, la mano de obra o el riesgo de fallos.

Por otro lado, la frecuencia de riego se puede ajustar de modo horario, con los riesgos que esto conlleva dado que en períodos de tiempo climáticamente anormales se puede obtener un exceso de aporte o un déficit de agua. Por tanto, dado que las necesidades hídricas de los cultivos pueden variar de un día a otro, o incluso dentro del mismo, puede perder sentido efectuar programaciones previas a la demanda actual del cultivo.

Ahora bien, desde el punto de vista energético, las implicaciones de realizar el riego a la demanda son mucho mayores, ya no tanto por la frecuencia sino por el caudal demandado. Cuanto mayor sea su variación menor es el rendimiento no sólo del grupo de bombeo sino de todo el sistema. Todo el sistema debe diseñarse para poder abastecer en el caso más desfavorable, es decir cuando la demanda de todos los cultivos sea máxima y simultánea, cuestión que conlleva a redes y grupos de presiones sobredimensionadas y por consiguiente ineficientes.

El riego programado permite acotar mucho más el funcionamiento de las bombas, lo que posibilita que éstas se diseñen y funcionen cercanas a los puntos de máximo rendimiento. En cualquier caso, lo que sí queda patente, independientemente del tipo de suministro, es la necesidad de diseñar sistemas de bombeo con variadores de frecuencia, considerando que las presiones pueden no ser fijas ni dependientes de la localización del nudo más desfavorable, sino que puede que dependan del caudal demandado en cada momento, y por tanto deben controlarse a través de los puntos de la curva resistente de la instalación.

1.2.6. Eficiencia energética y contratación del suministro eléctrico

La electricidad que pagan generalmente los regadíos se caracteriza por tener una alta potencia contratada y un consumo muy desigual, notablemente variable según la época del año. Después de las continuas reformas energéticas, con el aumento del coste del término de potencia en un 115% en la última reforma y más del 450% de los últimos cuatro años, el término de potencia representa más de la cuarta parte de la factura eléctrica. Con respecto al término variable, el término de la energía pese a su reducción del 65% en la última reforma, apenas supone un

impacto real en los regantes, que sólo lo apreciarían durante los meses de máximo consumo, es decir julio y agosto.

Con esta realidad económica sobre las tarifas eléctricas, queda claro que una gestión energética eficiente debe convertirse en una prioridad para los regantes y dentro de esta gestión hay un bloque que debe ser contemplado, y es la contratación más adecuada del suministro eléctrico. Es obvio que la prioridad de cualquier sistema desde el punto de vista energético debe ser reducir el consumo sin afectar a la calidad del servicio, ahora bien, una vez que el sistema alcanza su punto óptimo se debe buscar aquella configuración de la factura eléctrica que pueda favorecer un menor coste.

Se trata pues de crear el mejor juego entre los turnos de riego (si existieran) y las potencias contratadas para cada tarifa y periodo, teniendo en cuenta las posibles penalizaciones por exceder de la potencia contratada, y sobre todo que éste es el término que más pesa en la factura.

En cualquier caso, siendo conscientes del continuo movimiento en las tarifas (sirva como ejemplo la Figura 1-11), de los cambios de políticas energéticas y de la variabilidad de este complejo mundo, es difícil establecer y definir un modelo estándar a seguir. Lo que sí es imprescindible es ser conscientes del potencial ahorro económico que puede suponer la adecuada contratación y programación del riego, toda una estructura financiera que sin duda vale la pena estudiar y valorar hasta llegar a la situación óptima.

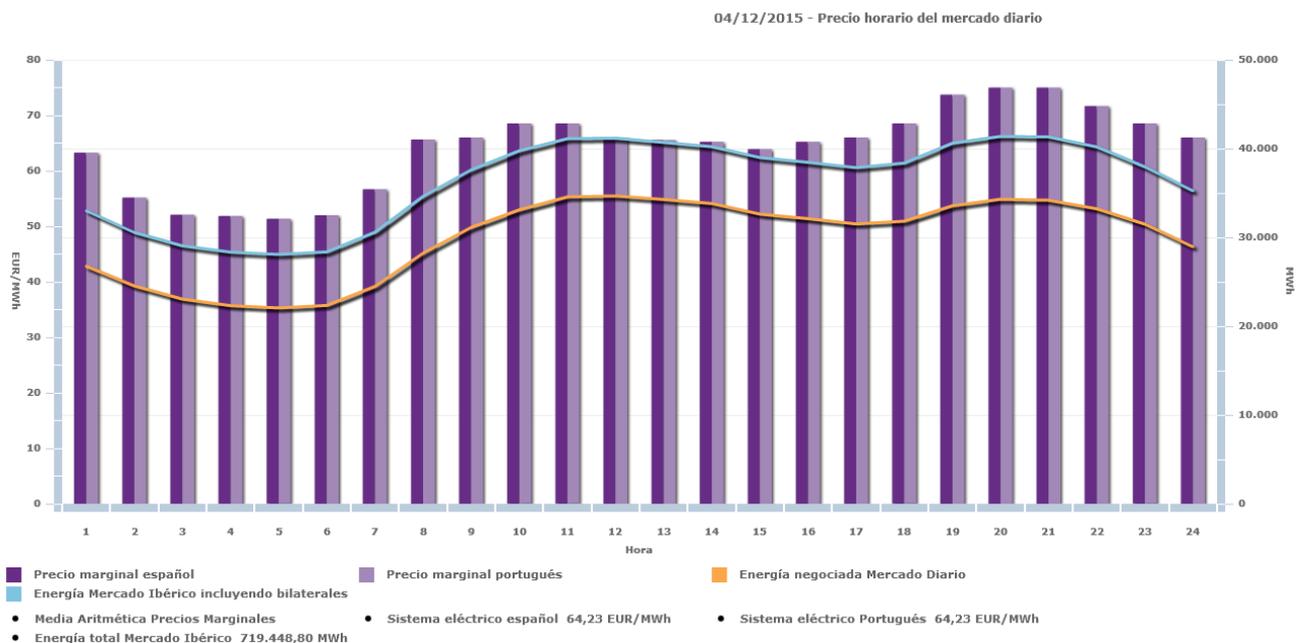


Figura 1-11: Ejemplo de fluctuación del precio horario del mercado eléctrico diario (OMIE, 2015)

1.3. Proceso de mejora de la eficiencia energética de una red a presión

El primer paso para mejorar la eficiencia en una red a presión es ser consciente de que existe un margen de mejora relevante. Los agricultores son muy sensibles al aumento de los precios de la energía, pero no siempre son conscientes de que la mejora de la eficiencia de sus sistemas podrían reducir sus costes por diez (Bustamante, 2014). Está dentro de su alcance mejorar la eficiencia del sistema con inversiones simples donde la relación coste-beneficio es generalmente muy alto. La falta de conciencia es un impedimento clave y puede ser resuelto rápidamente con un sistema simple y preciso de diagnóstico, que es el primer paso de la metodología que se presenta en este trabajo, y que es independiente del uso que se le vaya a dar al agua, pues los principios hidráulicos no cambian por tratarse de sistemas urbanos o de riego.

El diagnóstico propuesto (cuyos fundamentos se describen en el tercer capítulo y del que a continuación se da una primera visión muy general) se basa en una nueva métrica. Los indicadores de rendimiento han sido ampliamente utilizados para medir la eficiencia de las bombas o volúmenes circulantes por una red de agua. En el diagnóstico se propone un indicador global para todo el sistema. De hecho, se trata de una simple relación entre la energía mínima requerida, E_{uo} (embebida en el agua que se suministra a los usuarios) y la energía consumida, $E_{sr,p}$; suma de la energía aportada por la bomba (conocida a partir de las facturas eléctricas) y la energía gravitacional $E_{sr,n}$ (o natural). Este rendimiento global real, η_{ar} , puede compararse con un rendimiento ideal η_{ai} , con el mismo numerador, E_{uo} , siendo el denominador la energía ideal mínima requerida por el sistema E_{si} , (correspondiente a un sistema sin ningún tipo de pérdidas).

Por tanto, como valor de referencia inicial se establece el concepto de energía ideal, que ignora todas las posibles pérdidas, ya sean por fugas, por fricción o por rendimiento de los grupos de presión. Este valor se convierte en referencia para el sistema, pues es ideal. Una vez que se han determinado todos los parámetros de energía ideales, se puede calcular una primera eficiencia del sistema, $\eta_{ai} = E_{uo}/E_{si}$, como la relación entre la energía mínima requerida por los usuarios y el total de energía entregada al sistema. Este indicador representa el valor más alto posible de la eficiencia energética del sistema, que nunca podría llegar a alcanzarse ya que ha sido obtenido en condiciones ideales.

El siguiente paso es examinar la energía real que se está suministrando al sistema. A partir de esta energía real se puede calcular el rendimiento real del sistema, η_{ar} , como la relación entre la energía requerida por los usuarios, E_{uo} , y la energía total real suministrada, E_{sr} . La diferencia entre ambos rendimientos ($\eta_{ai} - \eta_{ar}$) es el teórico margen de mejora posible de la eficiencia energética de la red, ya que cuantifica la diferencia entre el sistema real y el sistema ideal. Su valor da una idea clara sobre los márgenes de mejora existentes, sobre todo cuando la información se completa con un indicador que mide la energía topográfica del sistema, E_{ti} , igual al exceso de energía generada por las irregularidades del terreno. De hecho en un sistema ideal plano $E_{ti}=0$.

Sin embargo, como se ha comentado, la situación ideal es inalcanzable, por lo tanto esa diferencia jamás podrá salvarse. En otras palabras, el valor más alto posible de la eficiencia energética real no puede ser la eficiencia ideal, η_{ai} , sino un nuevo valor, $\eta_{ar,o}$, que contemple a partir de la situación ideal las posibles pérdidas razonables que pueden asumirse (fricción, fugas, bombas y otros). Una vez estimado este valor del rendimiento objetivo, la diferencia entre éste y el rendimiento real dará una mejor aproximación del margen de mejora existente en el sistema concreto con las características propias que posee. No se trata de comparar el estado actual del sistema cuantificado por η_{ar} con la unidad como suele hacerse, sino con el máximo alcanzable por ese sistema (la mejor versión de sí mismo) pues no es lo mismo un sistema que deba suministrar a usuarios muy altos y muy bajos que una red prácticamente plana, por supuesto la primera requerirá más energía, pero no por ello debe permitirse ser ineficiente.

El rendimiento real, obviamente tiene un límite superior (e inalcanzable), el rendimiento ideal (o teórico), pero también está sujeto a factores externos al sistema como el precio del agua y el de la energía que, de algún modo, pueden considerarse condiciones de contorno del problema. Al fin y al cabo la decisión de adoptar o no una mejora se basa en análisis coste – beneficio. Este último depende mucho de los precios del agua (sobre todo el variable) y de la energía. Del mismo modo que desde el punto de vista económico todos los sistemas tienen un nivel óptimo de fugas (Environment Agency et al., 2012) es razonable suponer que también existe un nivel óptimo de pérdidas de energía. Los precios del agua urbana y de riego dentro de un mismo país varían tanto como lo hacen entre el norte y el sur de Europa, y aunque más uniformes dentro de un mismo país también varían los precios. El análisis de estos precios y su influencia en la eficiencia (agua y energía) es importante para tener una visión global de ambos mundos tan estrechamente ligados.

1.3.1. Conceptos del proceso de mejora de la eficiencia energética de los sistemas de agua a presión

La clave para abordar problemas complejos es hacerlo con un enfoque multidisciplinar, que incluya perspectivas económicas, ambientales y sociales. Hasta hace unos años esto era poco común, el agua estaba ligada a la ingeniería civil más de lo que lo estaba a la ingeniería mecánica, eléctrica o energética. Hoy el nexo agua-energía requiere la integración de todos los puntos de vista. Nada nuevo teniendo en cuenta que en los años 30, con el concepto del agua para producir energía en su estado más alto (la presa Hoover fue construida con una hidroeléctrica de 1.345 MW) los cálculos de golpe de ariete en tuberías presurizadas fueron vitales para garantizar el éxito de la construcción. Por otro lado, en una colaboración sin precedentes, ASME y ASCE (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos y Civiles, respectivamente), organizaron el congreso de Chicago 1933, que establecería la base de los cálculos. Hoy en día este enfoque multidisciplinar es aún más necesario porque los problemas tienen que incluir las perspectivas económicas, ambientales y sociales, que son mucho más

complejas. Expertos económicos, medioambientales e incluso nuevas metodologías de auditorías se deben agregar al enfoque del ingeniero clásico.

El principal objetivo es optimizar la eficiencia del agua y de la energía, el punto de partida son las ecuaciones de continuidad y de energía aplicadas a un volumen de control. Este análisis se puede extender a cualquier sistema (desde un sector a toda la red), la única condición es que los flujos de masa y energía, entrantes y salientes sean conocidos. Se pueden establecer los balances globales del sistema y a raíz de éstos realizar las correspondientes auditorías. La auditoría energética, que exige una auditoría hídrica previa, especifica la energía suministrada al usuario, así como la que pierde en estaciones de bombeo, en fricción, en fugas y en otros componentes del sistema. Estos balances globales, diagnóstico y auditorías, proporcionan una visión general de dónde se desperdicia la energía, que es esencial para identificar las estrategias de ahorro. Conocer los flujos de entrada y salida de masa y energía del volumen de control, es muy simple. La estrategia más común es la sectorización para controlar las fugas, ya que permite detectar qué partes de la red están en peor estado, los medidores de caudal aguas arriba proporcionan información sobre el volumen de agua que se inyecta y los contadores de los usuarios proporcionan el flujo de salida. Dado que los flujos de energía (variables en el tiempo) se calculan multiplicando el caudal por la presión, su evaluación es directa.

Es una buena práctica evaluar la energía suministrada al sistema a partir de la energía necesaria en el nudo más desfavorable, ya que proporcionar más energía (más presión) de la que se requiere en este punto supone una pérdida absurda. Cuando este exceso de presión es una consecuencia de la topografía del terreno, en teoría se puede recuperar. Por otra parte la gestión de la demanda dirigida a reducir el consumo de agua, es la mejor estrategia posible de ahorro de energía. Las fugas son una doble pérdida, no sólo por la pérdida de energía embebida en el agua fugada, sino también porque las fugas implican un aumento del caudal circulante por la red, lo que aumenta las pérdidas por fricción.

Esta visión integrada de la ecuación de la energía, incluye tanto la energía de eje como la natural y se ha de referir al nudo más bajo del sistema, sólo de esta manera se puede cerrar el balance. El estándar para el análisis de redes, EPANET (Rossman, 2000), sólo incluye cálculos de energía de eje lo que refleja las limitaciones del análisis. En otras palabras, de acuerdo con EPANET, en un sistema sin bombas, sólo con energía natural, no hay necesidad de un análisis energético, un enfoque erróneo que las técnicas de diseño de redes actuales todavía mantienen. Aunque las nuevas propuestas de diseño incluyen los costes ambientales (UE, 2008) generados por las emisiones de gases de efecto invernadero, GEI, y por lo tanto, el coste de la energía de bombeo también se incluye (Wu et al., 2010) sigue proporcionando un punto de vista energético parcial.

En cualquier caso, este es un gran avance en el enfoque tradicional de diseño óptimo de la red (Savic y Walters, 1997), cuyo único objetivo era minimizar el coste de la inversión y de la energía de eje. Estos análisis parciales en los que no se incluye la energía natural ha dado lugar a los

diseños tradicionales (sistemas alimentados desde un depósito que requiere proporcionar siempre la máxima energía de bombeo), energéticamente ineficientes. Esta nueva visión global que busca una solución hidráulica óptima con costes bajos de inversión y bajo consumo energético, representa un cambio radical en la forma de concebir el diseño de redes, se trata de minimizar al máximo posible la energía topográfica y por tanto la optimización de la energía. Sólo mediante la inclusión de esta visión se puede obtener una perspectiva global del sistema.

1.3.2. Necesidad de diagnosticar la eficiencia energética de las redes a presión

Llegando ya al final de este primer capítulo, conviene insistir en la etapa más relevante del proceso de mejora energética previamente descrito. Es el diagnóstico del sistema en su conjunto y no sólo de una parte (por ejemplo, la estación de bombeo). Los fundamentos ya se han sintetizado describiendo brevemente el papel de los tres rendimientos energéticos del sistema (ideal, real y objetivo). Ahora se trata de subrayar la importancia de referirse al rendimiento global, a diferencia de lo que viene siendo tradicional, el rendimiento de una parte. Conviene, una vez más, insistir en la conocida estrategia medioambiental, *think globally, act locally*.

Mejorar los rendimientos de las bombas siempre ha sido importante, y cada vez está más presente debido principalmente al constante aumento de los costes de energía (Pérez-Urrestarazu y Burt, 2012; OJEU, 2012; Papa et al, 2013). Pero poca atención se ha dedicado a la evaluación de la eficiencia energética desde un enfoque global del sistema hasta ahora. El funcionamiento eficiente de los sistemas presurizados (Lingireddy y Wood, 1998; Ulanicki et al, 2007; Giustolisi et al, 2013; Carriço et al, 2013) también está atrayendo una atención considerable, así como el cálculo de la energía integrada en las fugas de agua (Colombo y Karney, 2002; Cabrera et al, 2010) e incluso el uso de indicadores de rendimiento energético para evaluar algunos aspectos de estos sistemas (Pelli y Hitz, 2000; Duarte et al, 2009). Sin embargo, el punto de partida debería ser establecer métricas objetivas que proporcionen una visión global de la eficiencia del sistema y, sobre todo, de los márgenes de mejora existentes en cada sistema concreto.

El primer paso para mejorar la eficiencia es ser consciente de que existen márgenes de mejora. La falta de consciencia es un impedimento clave y puede resolverse si se plantea un sistema simple y preciso de diagnóstico. Tal como se ha comentado, realizar la auditoría energética de una red no es un proceso sencillo ni rápido, además si se desea que los resultados obtenidos sean válidos se requiere de un conocimiento exhaustivo de la red, una auditoría hídrica previa y en muchos casos la elaboración de un modelo matemático calibrado del sistema. Un proceso complejo y laborioso que ni mucho menos está al alcance de todas las comunidades de regantes ni tan siquiera de todas las compañías de agua (públicas o privadas). Así pues, lo que se plantea a continuación es una fase previa a ese trabajo, un diagnóstico. El objetivo de este diagnóstico es proporcionar información al gestor de la situación actual de su sistema desde el punto de vista energético, pero comparándolo con su propio sistema en el mejor estado posible. Es decir, una

valoración objetiva del margen de mejora del sistema con todas las particularidades que éste tiene. Y por otro lado, ayudar a priorizar actuaciones de mejora.

El diagnóstico realizado ayudará al gestor a detectar sus puntos débiles de manera que éste pueda enfocar sus esfuerzos hacia donde sean más necesarios o hacia donde más beneficio, económico o ambiental, le vaya a aportar. El diagnóstico le puede ayudar a determinar si el problema de su ineficiencia se encuentra en el grupo de presión, en las pérdidas de agua o en la propia configuración del sistema, por ejemplo. Y es que para qué destinar recursos a cambiar la bomba por otra de mayor rendimiento, si el problema reside en el entramado de tuberías y se puede mejorar simplemente con una sectorización. O para qué implementar un costoso proceso de regulación cuando es posible que el mayor margen de mejora resida en la gestión de la demanda, es decir, en suministrar a los hidrantes el volumen y la presión estrictamente necesarios, sin excesos y con la mejor secuenciación posible.

1.3.3. Enfoque general y metodología

Se propone un proceso de mejora de la eficiencia energética de un sistema a presión, que incluye el diagnóstico global de dicho sistema, el concepto de energía topográfica y el estudio conjunto de la energía natural y de eje. El método se divide en cuatro etapas: diagnóstico, auditoría, análisis de coste-beneficio y toma de decisiones. Todas las fases se encuentran divididas en dos columnas: las energías requeridas y las topográficas. Este proceso, ilustrado en la Figura 1-12, se describe a continuación:

- **1.I. Diagnóstico** (columna de la izquierda, energía requerida). La importancia de conocer el punto de partida (eficiencia ideal, η_{ai} , y eficiencia real, η_{ar}) ya ha sido mencionada. Esta etapa incluye la estimación de $\eta_{ar,o}$, se trata del rendimiento alcanzable que se puede establecer como objetivo final con la reducción del nivel de pérdidas (en las bombas, las fugas, la fricción y otros). La diferencia entre $\eta_{ar,o}$ y η_{ar} , es una buena referencia del margen de mejora del sistema.
- **1.D. Diagnóstico** (columna de la derecha, energía topográfica). Se calcula el porcentaje de energía topográfica de un sistema en relación con el valor teórico total θ_{ti} . En función de su valor, se debe explorar la posibilidad de disminuirlo. Para poder modificar el valor de la energía topográfica se requiere una modificación de la configuración del sistema. Si no fuera posible su reducción, la tercera etapa incluye la recuperación de parte de esta energía usando PATs (Pumps As Turbine, es decir, Bombas que trabajan como turbinas) y/o la posibilidad de minimizar su impacto con VRP.
- **2.I. Análisis** (columna de la izquierda, energía requerida). Si la diferencia entre $\eta_{ar,o}$ y η_{ar} es pequeña, se puede suponer que el sistema es eficiente en términos de energía y no es necesario entrar en la etapa de análisis. Si la diferencia entre ambas eficiencias es considerable, significa que existe margen de mejora desde el punto de vista energético, entonces se debe acometer primero la auditoría hídrica y a continuación la auditoría

energética (Cabrera et al., 2010). Éstas cuantificarán las ineficiencias, la clave para abordar la siguiente etapa.

- **2.D. Análisis** (columna de la derecha, energía topográfica). La disminución del valor de θ_{ti} requiere la reestructuración de la red, una opción que generalmente es compleja de implementar. Debido a que se debe satisfacer la demanda a la presión requerida en el punto más alto, se eleva la presión por encima de lo estrictamente necesario en el resto de la red, por tanto en estos casos se debe analizar la posibilidad de recurrir a diferentes configuraciones de suministro. Por ejemplo, desacoplar los puntos más altos del sistema disminuirá el valor de la energía topográfica, y por tanto mejorará la eficiencia.
- **3-4.I. Evaluación de acciones** (columna de la izquierda, energía requerida). Las auditorías realizadas identificarán las partes más vulnerables de los sistemas (cuantificando las pérdidas de energía debidas a fugas, fricción, estaciones de bombeo u otros). A partir de esta etapa se pueden identificar las medidas más adecuadas para mejorar la eficiencia. Éstas estarán dirigidas a maximizar los beneficios y minimizar los costes. Se puede tratar de medidas operacionales o estructurales. Las intervenciones operacionales son aquellas que no requieren apenas inversión, y que pueden mejorar la eficiencia del sistema mediante el ajuste de los puntos de operación. La estrategia más común sería modificar el punto de funcionamiento de las bombas, tanto para los casos urbanos (Kurek y Ostfeld, 2014) como para riego (Lamaddalena y Khila, 2012). Otra medida operativa típica es la reducción de fugas. Por otro lado, las medidas estructurales implican cambios importantes en el sistema, tales como la instalación de nuevas bombas o sustitución e instalación de tuberías. El objetivo es valorar las acciones más convenientes, teniendo en cuenta los resultados de las auditorías e identificar qué acciones son las mejores, en términos de energía ahorrada y coste, para cada sistema específico.
- **3-4.D. Evaluación de acciones** (columna de la derecha, energía topográfica). La recuperación de la energía topográfica se puede realizar a través de PATs. Se requiere un análisis en tres etapas. En primer lugar, la elección de las tuberías en las que se podrían instalar (por ejemplo a partir de la definición de una potencia mínima); en segundo lugar el cálculo de la cantidad de energía que puede ser producida. Por último, definir las especificaciones de funcionamiento (Carravetta et al., 2013) para cumplir con las necesidades de los niveles de servicio del sistema. La mayoría de veces no es viable la instalación de PATs por lo que se recurre a VRP con el objetivo, no de recuperar, sino de disipar energía.

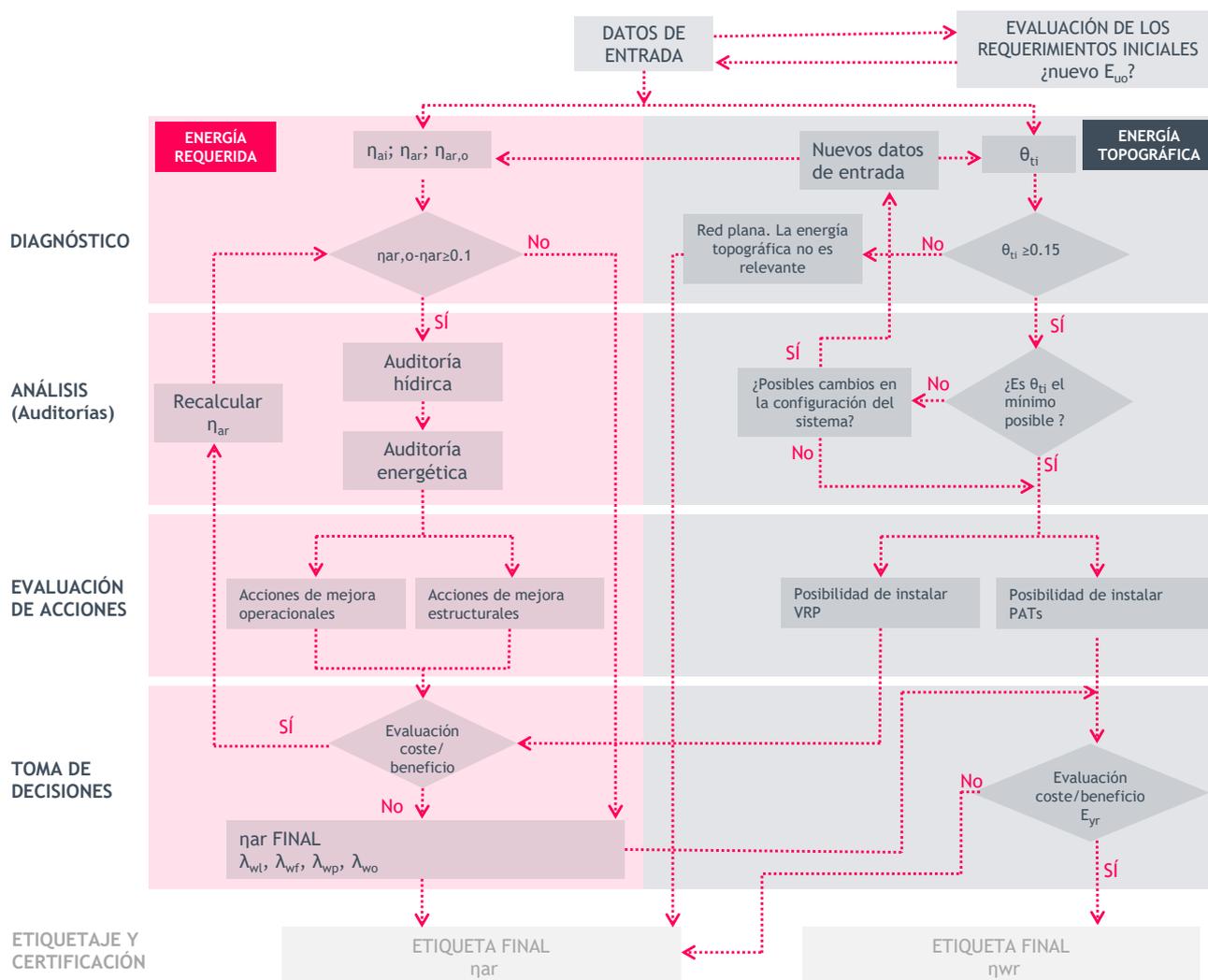


Figura 1-12: Diagrama de flujo de la metodología.

- 5. **Etiquetaje y certificación.** La última etapa es la fase de la certificación. Igual que una lavadora o incluso un edificio dispone de una etiqueta de certificación energética que verifica su eficiencia, los sistemas de agua a presión también pueden aspirar a ese etiquetaje que permita a las empresas concesionarias de los suministros así como a los ciudadanos conocer si su sistema de agua es muy eficiente (A) o por el contrario el uso que hace de ambos escasos recursos (agua y energía) es inadecuado (G). Este último punto, aunque pertenece a la metodología propuesta no forma parte del proceso de mejora como tal, y por este y otros motivos (se requiere la experiencia de todos los agentes implicados) no se presenta en este documento.
- 0. **La evaluación de los requisitos iniciales.** El diagrama de flujo de la Figura 1-12, establece la energía mínima requerida por los usuarios (resultado de multiplicar el volumen exigido a la presión de servicio), E_{uo} , como punto de partida. El objetivo final de

todo el proceso es suministrar esta energía de la manera más eficiente posible. Pero existen maneras de reducir E_{uo} , por ejemplo mediante la instalación de goteos que requieran presiones de servicio más bajas, la reducción de la demanda mediante la instalación de dispositivos de bajo consumo o el suministro de agua con diferentes niveles de presión. Incluso el uso de agua de lluvia es una manera de reducir E_{uo} (una vez analizadas las implicaciones energéticas de su reutilización (Ward et al., 2011)). Por tanto el primer paso, y por este motivo esta medida se encuentra fuera del proceso de mejora, es verificar el punto de partida, si el punto de partida (volúmenes y presiones demandadas) no es el óptimo, antes de comenzar a proponer soluciones y mejoras, lo primero es reducirlo.

1.4. Antecedentes. Sobre la necesidad de unificar terminología, indicadores, métricas y procedimientos de los análisis energéticos globales

La necesidad de la eficiencia y el desarrollo sostenible de los últimos tiempos requieren ser mucho más eficaces en el uso de dos recursos estratégicos: el agua y la energía. Por esta razón, están proliferando análisis con propuestas e indicadores orientados a mejorar la eficiencia energética del transporte de agua a presión. Los primeros avisos notables alertando de tal necesidad llegan a finales del pasado siglo. Peter Gleick es el primero en subrayar la relevancia del nexo agua energía en su vertiente *energy for water* (Gleick, 1994). Poco después Burgi certifica el cambio de orientación de la política del agua, desde la visión del desarrollo a la visión de la gestión (del *water development* al *water management*) bien representada por los objetivos del Bureau of Reclamation (Burgi, 1998).

La llegada del siglo XXI, con el imparable crecimiento de la población y la necesidad de minimizar el impacto del cambio climático, ha ratificado el cambio de directrices hacia la gestión eficiente. Un cambio que precisa de nuevos indicadores, métricas y procedimientos para valorar y mejorar la eficiencia (EPA, 2008). Los primeros trabajos se centraron en mejorar la eficiencia de una parte del sistema, generalmente las estaciones de bombeo. Un ejemplo claro es el trabajo de Brion y Mays, (1991), centrado en resolver por medio de programación no lineal a gran escala el problema de definir el funcionamiento óptimo de operación de las estaciones de bombeo en sistemas de distribución de agua, salvando dificultades de trabajos anteriores relacionadas con los métodos de resolución (enfoque de diferencias finitas en lugar de enfoque analítico) o la limitación del tamaño del problema cuando se recurre a programación dinámica. Otros trabajos más prácticos a modo de guía de usuario o manual de buenas prácticas, como el presentado por Walski en 1993, "*Tips for Saving Energy in Pumping Operations*", que plantea cuestiones tan trilladas a día de hoy como que el coste de capital debe ser minimizado o que debe evitarse el bombeo en horas pico.

A principios de década empiezan a surgir trabajos con una visión más global del problema, ya no centrados en elementos concretos del sistema sino en la distribución en su conjunto. Uno de los

trabajos más citados, Pelli y Hitz (2000), ya plantea dos indicadores que evalúan el consumo de energía de un sistema de suministro de agua. El primero evalúa la distribución espacial de los usuarios y de las fuentes de agua, por tanto incluye la topografía como un factor condicionante en la eficiencia del sistema. El segundo indicador, el indicador de calidad, engloba características del sistema como la eficiencia de las bombas, la ubicación de los puntos de captación o las pérdidas de agua en la red.

Con el paso del tiempo los análisis abordan la eficiencia del conjunto del sistema, y una gran cantidad de trabajos se centran en ofrecer diferentes indicadores energéticos o metodologías para realizar auditorías energéticas (p.e. Duarte et al., 2009; Moreno et al., 2010; Gay y Leon, 2012; Pardo et al., 2013; Mamade et al., 2014; Nogueira-Vilanova y Perrella-Balestieri, 2015; Hashemi et al., 2015) o en aplicar las métricas y auditorías propuestas a casos de estudio (Scanlan y Fillion, 2015). Por supuesto ligado al uso de la energía están las emisiones de gases de efecto invernadero, y en esta línea surgen una serie de trabajos cuyo principal objetivo es evaluar y reducir las emisiones, pero que, al fin y al cabo, pasan por reducir el consumo de energía. Por tanto es ir un paso más en el planteamiento del mismo problema (Boulos y Bros, 2010).

Todos estos trabajos y por supuesto el trabajo que aquí se desarrolla, de uno u otro modo, intentan valorar, cuantificar o catalogar la eficiencia del conjunto desde enfoques distintos que convendría unificar o, al menos, ordenar. Porque la lista seguirá creciendo con artículos publicados en revistas de perfiles distintos, dado que la preocupación por mejorar la eficiencia del uso del agua y de la energía cada vez se extiende más. Los artículos que se han comentado a lo largo de este punto son sólo una muestra.

Se requiere pues, iniciativas como la desarrollada por Alegre et al., (2006), con los indicadores de desempeño para los sistemas de distribución de agua. Trabajos que definan un sistema de indicadores único y globalmente aceptado, de forma que todos los abastecimientos puedan medirse por la misma métrica.

En España, una iniciativa similar se está comenzando a poner en práctica pero únicamente desde la óptica del riego, se trata de un grupo de Grupo Focal (MAGRAMA, 2016) para innovación en materia de regadío, energía y medio ambiente. Este grupo formado por un total de 22 expertos pone de manifiesto la necesidad de crear estrategias comunes de cara a la reducción del consumo energético y al aumento de la eficiencia tanto hídrica como energética. Recurriendo a un análisis de la situación actual del regadío, del consumo eléctrico de éste y del precio de la energía, de las emisiones de GEI asociadas al riego, así como de las consecuencias que los sistemas de regadío tienen sobre la fauna y la flora de los lugares, establece un diagnóstico del marco actual del estado del regadío en España, así como un listado de los principales problemas a resolver y las oportunidades a aprovechar. Lo mejor de este grupo, es que no se queda ahí, sino que ofrece un banco de conocimiento sobre innovaciones, es decir una serie de mejoras ante problemas concretos. El único inconveniente de esta iniciativa es la

limitación al riego, pues hidráulicamente las redes son iguales independientemente del uso final del agua.

Y no es de extrañar que estas iniciativas surjan en este país, pues España es líder en investigaciones sobre regadío. En una jornadas celebradas por el Ministerio de Economía y Competitividad en 2012 (The Water JPI. Joint Programming Initiative Water Challenges for a Changing World), se presentó la evolución de las publicaciones científicas sobre agua en la última década (Gilarranz, 2012). Se evidenció que Europa ha superado a Estados Unidos en publicaciones sobre agua a partir del año 2000, situándose como líder mundial por delante de EE.UU y muy por delante de países como China, Japón o India. Dentro de Europa España es el segundo país con más publicaciones sobre el tema (15%) sólo por detrás de Reino Unido (18,5%), con la diferencia de que mientras en UK desciende gradualmente sus publicaciones España las aumenta a un elevado ritmo. Por último, si se desagregan los estudios por temas dentro de las publicaciones en el mundo del agua, España es el primero en temas como la desalación y los regadíos, la gestión de las sequías y el tratamiento de aguas, bajando a posiciones más bajas (4ª, 5ª y 6ª) en cambio climático, soporte a políticas e inundaciones, respectivamente.

Estas cifras sólo tratan de poner de manifiesto todos los avances científicos y la alta preocupación por el tema del agua que se tiene en España, si bien no es de extrañar por la situación hídrica del país.

1.5. Justificación y objetivos

El formidable y rápido desarrollo del riego a presión, con todas sus implicaciones energéticas, evidenció la necesidad de optimizar el gasto ligado a la energía. Y con esa evidencia surgieron una serie de iniciativas meritorias como la ya descrita del IDAE, y muchas otras que se han descrito en el punto anterior. Sin duda supuso un paso al frente importante. La necesidad de generalizar el diagnóstico y el posterior análisis del transporte de agua a presión, cualquiera sea su uso, evidencia la necesidad de enfocar el problema desde una perspectiva mucho más física e hidráulica que la aproximación inicial descrita en el protocolo del IDAE. Una manifiesta necesidad porque también las redes urbanas de agua a presión se diseñaron originalmente pensando mucho más en la garantía de suministro que en el uso eficiente de la energía.

Por esto, el presente trabajo aborda de manera general la mejora de la eficiencia energética de los sistemas de suministro de agua a presión. Para ello se establecen unos conceptos que permitirán la generalización del proceso de diagnóstico y análisis con independencia del uso del agua. Esta propuesta proporciona nuevos procesos y soluciones dentro del marco del análisis global del agua y la energía. Las auditorías globales proporcionan una base para establecer acciones económica y medioambientalmente eficientes. Mejorar la eficiencia energética de los sistemas hidráulicos a presión es una cuestión de creciente interés. La eficiencia energética en los sistemas de presión (riego y urbanos) sólo es posible mediante la vinculación del agua y la

energía y realizando las auditorías hídricas y energéticas basadas en la ecuación de continuidad y de la energía aplicadas a todo el sistema (como un volumen de control). Esto sólo se puede hacer con un análisis global seguido de la desagregación del destino de la energía y la determinación de los usos finales. La metodología integral propuesta tiene en cuenta las mejoras disponibles en el subsistema, sin perder los efectos de interacción que pueden amplificar, reducir e incluso revertir los resultados locales. El protocolo propuesto concreta una serie de objetivos específicos a medida que se completa cada una de sus fases:

- Se desarrolla un proceso de diagnóstico simple que permite al gestor, con muy pocos datos de partida, conocer el estado del sistema. El diagnóstico se realiza sobre el sistema como conjunto y no sólo a una parte del mismo. El objetivo es obtener una serie de indicadores que permitan poder compararlo con el mejor estado que éste podría alcanzar.
- Estudio en profundidad de los flujos de agua y de energía (auditoría hídrica y energética) que aportarán una visión precisa de las principales ineficiencias del sistema. Para completar ambas etapas se han desarrollado una serie de herramientas que permiten obtener los resultados que corresponden a cada una.
- Análisis y revisión de las diferentes medidas estructurales y operacionales que pueden contribuir a mejorar la eficiencia energética en el transporte de agua a presión. Se presentan una serie de casos prácticos que permiten clarificar y ponen de manifiesto las bondades de las mejoras propuestas en cada etapa.

Esta metodología estima que la energía se puede reducir hasta en un 60%. Ya existen estudios (Cabrera et al., 2014) validados en casos reales que han logrado importantes ahorros a través de:

- Ajuste de presiones a las necesidades reales, evitando que los puntos más desfavorables se suministren con más energía que la necesaria, los resultados muestran ahorros de hasta un 15%.
- Reducción de la energía en pérdidas locales en las estaciones de bombeo, hasta un 5% de ahorro.
- Turnos de riego programados, de esta manera el caudal se mantiene más constante para cada turno, lo que permite que las bombas trabajen más cerca de los puntos óptimos de funcionamiento, 25% de ahorro.
- La división de la red en sectores, para ajustar la presión por cotas, el 20% de ahorro. O en otras palabras, la reducción de la energía topográfica que equivale a mejorar la eficiencia alcanzable. En las nuevas redes (con menos de diez años), las fugas tienden a ser pequeñas y los rendimientos de las bombas elevados, siempre que trabajen cercanas a su punto óptimo de funcionamiento. En redes más viejas, los ahorros pueden ser incluso más elevados, porque las mejoras anteriores se pueden incrementar mediante la reducción de fugas (representan hasta el 20-30% del ahorro energético) o porque se puede modificar el punto de funcionamiento de las bombas (la UE estima que una media del 20-30% de potencial ahorro en esta etapa, DOUE, 2010). La reducción de fugas y el

aumento de la eficiencia de bombeo pueden conducir a un ahorro del 60%. Cabe señalar que la disminución de las fugas también significa ser más eficiente tanto por la energía que no se pierde embebida en el agua fugada como porque circula menos agua por las tuberías reduciendo las pérdidas por fricción. El potencial ahorro tanto energético como de agua es significativo.

Éstos son sólo unos ejemplos de potenciales ahorros, sobre ellos se volverá más adelante y justificará tanto con casos prácticos como con estudios.

1.6. Estructura del documento

Este documento se ha estructurado en cuatro partes bien diferenciadas, coincidiendo cada de ellas con las fases del proceso de mejora propuesto (Figura 1-12), y conforman un total de siete capítulos.

La primera parte es la justificación y motivación de este estudio, de la que forma parte este primer capítulo en el que se ha analizado, a través de la breve historia de la modernización del regadío, la clara necesidad de establecer estrategias para mejorar la eficiencia de los sistemas de agua a presión, independientemente de su uso. Dentro de esta justificación se engloba también el Capítulo 2, dedicado a la relación existente entre el agua, la energía y el cambio climático. A lo largo de éste se aporta una visión global de las emisiones de gases de efecto invernadero ligadas al ciclo urbano del agua, no sólo a las etapas de abastecimiento (captación, depuración, transporte y distribución) también a las de saneamiento (drenaje, tratamiento y vertido). Este segundo capítulo además de aportar una visión general sobre el reto que supone el cambio climático, es una síntesis del proyecto WaCCliM (Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation), financiado por la Cooperación Internacional Alemana (GIZ) y dirigido por la IWA (International Water Association). La participación en este proyecto ha dado lugar a la creación de la herramienta ECAM (Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring tool), una herramienta de libre distribución que permite a las compañías de agua (abastecimiento y/o saneamiento) evaluar por ellas mismas sus operaciones en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y eficiencia energética.

La segunda parte, y siguiendo con el proceso de mejora mostrado y explicado en esta introducción, se presenta el diagnóstico energético. El Capítulo 3, describe ampliamente el diagnóstico propuesto (Cabrera et al., 2014). Se desarrolla en detalle el significado de cada término energético y de cada indicador planteado, además de presentar una serie de casos prácticos que clarifican cada idea. Paralelamente a este trabajo se ha desarrollado la herramienta EAGLE (Energy Assessment of Global Pressurized Systems), que con unos pocos datos, permite diagnosticar las condiciones energéticas en las que trabaja un sistema concreto de transporte de agua a presión. Fundamentada en los conceptos expuestos en este tercer capítulo, se trata de una herramienta de libre acceso cuyo objetivo es permitir a las empresas, independientemente del destino final de su agua (urbana o de riego) obtener por si mismas una

visión global del estado de su sistema desde el punto de vista energético (el manual de esta herramienta se adjunta en el Anexo 1).

La tercera fase del proceso, consiste en la realización de las auditorías, y para ello el Capítulo 4 desarrolla en profundidad los conceptos tanto de auditoría hídrica como de auditoría energética. La primera parte de este cuarto capítulo consiste en una revisión global del estado de las redes desde la perspectiva de las pérdidas de agua y de la inconveniencia de éstas desde cualquier óptica (social, medioambiental y económica). Junto a esta breve descripción de las pérdidas de agua (tanto reales como aparentes) se presentan los métodos más utilizados para realizar las auditorías y las estrategias definidas, amplia y universalmente, para la reducción de las pérdidas de agua. La segunda parte del capítulo se destina a la auditoría energética, ésta desarrollada en 2010 (Cabrera et al., 2010) ha sido objeto de una profunda revisión y ampliación, con el objetivo de incluir los nuevos términos del proceso de mejora de la eficiencia. Además se realiza una vasta crítica al módulo energético de EPANET, reconociendo que es el estándar mundial para la modelación y la simulación hidráulica, se establece y justifica la necesidad de actualización de éste para incluir las funciones necesarias para el análisis energético tal como se han descrito, pues siendo éste el programa más utilizado por los sistemas de agua a presión, su módulo energético presenta además de errores, muchas posibles mejoras (Gómez et al., 2015b). De nuevo, conscientes de las limitaciones de EPANET desde el punto de vista energético, en paralelo a este trabajo se ha desarrollado un software que permite la realización de la auditoría energética a partir del modelo matemático de una red (ITAEnergy). Su potencial así como su manual de uso se adjuntan en el Anexo 3.

La última fase de la metodología propuesta es el estudio de las posibles acciones de mejora (operacionales o estructurales) y su análisis coste-beneficio. A esta última fase se dedican los Capítulos 5 y 6. El primero de ellos describe ampliamente una de las medidas propuestas, la sustitución de los depósitos de regulación por inyección directa. Tal cual se ha dicho, el rendimiento ideal (eficiencia máxima e inalcanzable del sistema) está condicionado a la configuración de éste, por tanto una distribución distinta podría suponer un aumento del límite superior de eficiencia (Gómez et al., 2015a). Por último el Capítulo 6, se basa en la descripción detallada de todas las estrategias propuestas como acciones de mejora, agrupadas en dos bloques, medidas operacionales y medidas estructurales. Se propone para cada grupo un total de cuatro estrategias. Todas las acciones se acompañan de una estimación factible del ahorro, además, algunas de ellas ya han sido aplicadas en varios abastecimientos reales, por lo que es posible valorar el gasto energético y económico antes y después de la aplicación de la medida.

Por último el Capítulo 7 es una síntesis de todo lo presentado con una descripción del trabajo que resta por hacer y las herramientas que faltan por desarrollar, para que cualquier abastecimiento por sí mismo sea capaz de reducir su gasto energético, y aumentar la eficiencia de su sistema desde el punto de vista del consumo de agua y de energía.

Todo este trabajo está enfocado a plantear soluciones y propuestas concretas a los abastecimientos, pero es con la colaboración de todos los agentes implicados ciudadanos, empresas, investigadores y gobiernos, la única forma de revertir la situación actual y de lograr la mitigación del cambio climático y el desarrollo sostenible. La Ministra del Clima y el Medio Ambiente y Viceprimera Ministra de Suecia, la Dra. Åsa Romson, en la Semana Mundial del Agua de 2015, lo indicó: "Si no gestionamos adecuadamente el agua, y la gestión de los recursos hídricos no queda plenamente integrada en la agenda del cambio climático, los efectos del clima serán significativamente peores en nuestras sociedades: es un reto para todos los países".

Capítulo 2

Implicaciones ambientales

2.1. Introducción

Al ya comentado binomio agua-energía cabe añadirle un tercer factor, el cambio climático. El ciclo del agua, desde la fuente (superficial o subterránea) hasta su retorno al medio natural, consume energía. Cada etapa del ciclo (captación, tratamiento, transporte, distribución, utilización, depuración y vertido al medio natural) tiene una necesidad específica de energía (kWh/m^3), un valor que depende de las circunstancias de cada caso (la disponibilidad y calidad del agua en origen, la topografía del terreno, etc.). Sumando toda la energía consumida, la cantidad total es muy importante, tal cual se ha visto y se detallará en posteriores capítulos.

El consumo de esa energía genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que alteran los patrones del clima y la lluvia, los países con mayor escasez de agua pueden ver sus recursos hídricos reducidos hasta en un 40% (Milly, 2008). Esto obliga, cada vez con mayor frecuencia, a recurrir a agua energéticamente más consuntiva, como la desalinización de agua de mar, lo que directamente supone aumentar el consumo de energía, realimentando y cerrando el círculo (Figura 2-1). Se requiere pues, implantar cuanto antes políticas de ahorro que mejoren la garantía de suministro. Y es que ahorrar agua es ahorrar energía y, en definitiva, minimizar las emisiones de GEI.

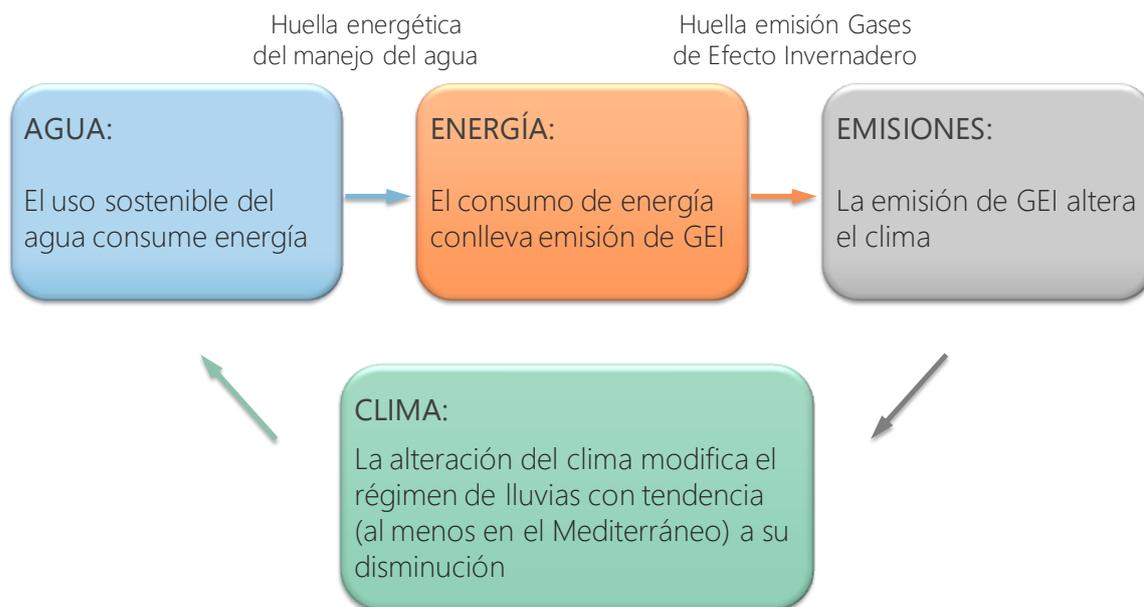


Figura 2-1: Interconexiones Agua – Energía- Clima

Es importante, pues, conocer la huella energética del agua (HEA) de cada una de las etapas del ciclo integral. Y aunque de modo aproximado por la dificultad de realizar un cálculo exacto entre la relación de los tres agentes del trinomio agua-energía-cambio climático (hay matices que concretar), es importante poner cifras. Y no sólo a cada una de las etapas gestionadas por la compañía distribuidora, también hay que asignarla a los usos finales (gasto energético asociado al agua en las viviendas de los usuarios) pues a esta fase corresponde el mayor gasto de energía. En el caso del uso del agua en los hogares, el consumo energético está directamente relacionado con el calentamiento de ésta, por lo que no es de extrañar que la mayor relación kWh/m³, se dé precisamente en los usos finales. La comparación es inmediata, y aunque con matices, se puede estimar que transportar 100 litros durante 1 km supone un consumo energético aproximado de 0,002 kWh, mientras que elevarlo 50 metros consume diez veces más, 0,02 kWh, y calentarlo de 15°C a 45°C (un salto térmico normal) supone aproximadamente 5 kWh (250 veces más que elevarlo). A la vista de estas simples aproximaciones, es obvio que el gasto energético en calentar agua frente al gasto de transportar o elevar la misma cantidad es muy superior. Que no existan demasiados estudios concretos y exhaustivos sobre este proceso reside principalmente en que este consumo se reparte entre todos los usuarios, mientras que el coste del suministro de agua reside en un único agente. Calcular el consumo energético asociado a los usos finales de un abastecimiento requiere del conocimiento del comportamiento de los usuarios, no sólo cuando consumen agua sino a qué la destinan, dado que únicamente el agua que se caliente será la que requiere aporte de energía. Y para ello se requieren estudios nada sencillos, pues exigen la monitorización de muchos usuarios y en condiciones concretas pues el instrumento de medición debe ser lo bastante preciso como para registrar todos los

consumos. Y por supuesto la capacidad de tratar y analizar la ingente cantidad de datos que se pueden generar.

En cualquier caso, estudios de este tipo están proliferado con el objetivo de crear modelos de consumo de agua, dado que por un lado permiten conocer mejor los hábitos de consumo de los usuarios, esto permitirá por ejemplo estimar los consumos tanto de agua como energéticos con el objetivo de ser más eficientes (con ello se podría dar respuestas a consultas típicas como: ¿qué es más eficiente, el uso del lavavajillas o lavar a mano?; o si realmente ahorran los dispositivos de bajo consumo o simplemente el usuario deja abierto el grifo más tiempo). Estos estudios además permiten crear modelos de predicción de la demanda, lo que desde el punto de vista de las ampliaciones y mejoras de la red es imprescindible, pues pueden predecir el tamaño de las infraestructuras hidráulicas, evitando despilfarros económicos y de recursos en obras monumentales sobredimensionadas o adelantarse a la obsolescencia de las existentes.

El objetivo de este capítulo es poner de manifiesto la relación existente entre el suministro de agua y las emisiones de gases de efecto invernadero, es decir cómo están contribuyendo las compañías de agua tanto de abastecimiento como de saneamiento al cambio climático. Se presenta para ello de forma simplificada un proyecto llevado a cabo con el objetivo de medir y mitigar las emisiones de GEI asociadas a las compañías de agua (WaCCliM). Y más concretamente se presenta la herramienta (ECAM) que permite, basándose en la metodología desarrollada en el proyecto, medir las emisiones de GEI de las que es responsable una compañía de agua por el hecho de dar servicio a la población.

2.2. Evolución del cambio climático

Según uno de los últimos informes publicados por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014), una de las causas del cambio del sistema climático es la influencia humana. Las recientes emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia. Los cambios recientes del clima han tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales. El calentamiento del sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no tienen precedentes. La atmósfera y el océano se han calentado, las cantidades de nieve y hielo han disminuido, y el nivel del mar se ha elevado. Las emisiones de gases de efecto invernadero antropogénico han aumentado desde la era preindustrial, impulsadas en gran medida por el crecimiento económico de la población y ahora son más altas que nunca. Esto ha llevado a que las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso sean las más altas de los últimos 800.000 años.

Los efectos de estas emisiones causadas por la actividad humana, junto con las de otros conductores antropogénicos, se han detectado en todo el sistema climático y ya se ha elevado al nivel de *muy probable* el hecho que hayan sido la causa dominante del calentamiento observado desde mediados del siglo XX.

En las últimas décadas, los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y a través de los océanos. Los impactos son debidos al cambio climático, independientemente de su causa, lo que indica la sensibilidad al cambio del clima. Algunos de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos observados, y que se han relacionado con la influencia humana, incluyen una disminución de la temperatura en frío extremo, un aumento de la temperatura en tiempos cálidos, un aumento de los niveles extremos del mar y un aumento en el número de eventos de precipitaciones intensas en varias regiones.

2.2.1. Futuro en el cambio climático, riegos e impactos.

La emisión continua de gases de efecto invernadero provocará un mayor calentamiento y cambios más duraderos en todos los componentes del sistema climático, además del aumento de la probabilidad de impactos graves generalizados e irreversibles para las personas y ecosistemas. Limitar el calentamiento requiere reducciones sustanciales y sostenidas de gases de efecto invernadero, que junto con la adaptación, pueden limitar los riesgos del cambio climático. Aunque las proyecciones de emisiones de gases de efecto invernadero varían en un amplio rango, dependiendo tanto del desarrollo socio-económico como de la política climática, la acumulación de éstas determinará en gran medida el calentamiento global que se experimentará a finales del siglo XXI y más allá.

Se prevé, que durante el siglo XXI, las olas de calor ocurran con más frecuencia y duren más tiempo, y que los eventos extremos de precipitación sean más intensos y frecuentes en muchas regiones. Los océanos continuarán calentándose y acidándose, y el nivel global medio del mar aumentará. El cambio climático amplificará los riesgos existentes y creará nuevos riesgos para los sistemas naturales y humanos. Los riesgos, que se distribuyen de forma desigual, son generalmente mayor para las personas y comunidades menos favorecidas de los países a todos los niveles de desarrollo. Muchos aspectos del cambio climático y los impactos asociados continuarán durante siglos, incluso si las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero se detienen. Los riesgos a cambios abruptos o irreversibles aumentan a medida que lo hace la magnitud del calentamiento.

2.2.2. Caminos de futuro para la Adaptación, Mitigación y Desarrollo sostenible

Adaptación y mitigación son estrategias complementarias para reducir y gestionar los riesgos del cambio climático. Reducir sustancialmente las emisiones en los próximos decenios puede reducir los riesgos climáticos en este siglo y más allá.

La toma de decisiones eficaces para limitar el cambio climático y sus efectos pueden ser consideradas desde una amplia gama de enfoques que evalúen los riesgos y los beneficios esperados. Es imprescindible reconocer la importancia de los gobiernos, la dimensión ética, la

equidad, los juicios de valor, evaluaciones económicas y diversas perspectivas y respuestas al riesgo y la incertidumbre.

Sin los esfuerzos de mitigación adicionales a los existentes hoy en día, e incluso con la adaptación, el calentamiento, a finales del siglo XXI, dará lugar a un riesgo muy alto de impactos graves, generalizados e irreversibles a nivel mundial (*alta confianza*). La adaptación puede reducir los riesgos de impactos del cambio climático, pero hay límites a su efectividad, especialmente con mayores magnitudes y tasas de cambio climático. Desde una perspectiva a más largo plazo, en el contexto del desarrollo sostenible, aumenta la probabilidad de que las medidas de adaptación más inmediatas también mejoren las opciones y la preparación para el futuro

Existen múltiples vías de mitigación que pueden limitar el calentamiento a niveles por debajo de 2°C en relación con los niveles preindustriales. Estas vías requieren reducciones sustanciales de emisiones en las próximas décadas y cerca de cero emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero antes de fin del presente siglo. La implementación de tales reducciones plantea retos tecnológicos, económicos, sociales e institucionales.

Muchas de las opciones de adaptación y mitigación pueden ayudar a abordar el cambio climático, pero ninguna opción única es suficiente por sí misma. La aplicación efectiva depende de las políticas y la cooperación a todas las escalas, y se pueden mejorar a través de respuestas integradas con otros objetivos sociales. Éstas incluyen medidas institucionales eficaces, la innovación e inversiones en tecnologías ecológicamente racionales y la elección de infraestructuras, actividades económicas, comportamientos y estilos de vida sostenibles.

Las Naciones Unidas en su portal sobre su labor sobre el cambio climático indica que un dólar de los EE.UU. invertido en medidas preventivas puede ahorrar hasta siete dólares en gastos de socorro en el futuro, siendo ésta sólo alguna de las cifras que propone (UN, 2016).

Las opciones de mitigación están disponibles en todos los sectores principales. La mitigación puede ser más rentable si se utiliza un enfoque integrado. Esto es, combinar medidas para reducir el uso de energía y la intensidad de los gases de efecto invernadero, descarbonizar el suministro de energía, reducir las emisiones netas y aumentar los sumideros de carbono en sectores terrestres.

Las respuestas de adaptación y mitigación dependerán de las políticas y medidas a través de múltiples escalas: internacional, regional, nacional y subnacional. Las políticas de apoyo al desarrollo de tecnologías, difusión y transferencia, así como la financiación de las respuestas al cambio climático, pueden completar y mejorar la eficiencia de las políticas que promueven directamente la adaptación y la mitigación.

Tal como propone el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, PNACC, mientras que las acciones de mitigación requieren una respuesta conjunta y coordinada a nivel internacional, las acciones e iniciativas de adaptación deben ser definidas e implementadas a nivel nacional o

subregional, pues los impactos y las vulnerabilidades son específicos de cada lugar (MAGRAMA, 2006).

El cambio climático es una amenaza para el desarrollo sostenible. Sin embargo, hay muchas oportunidades para vincular la mitigación, la adaptación y la búsqueda de otros objetivos sociales a través de respuestas integradas. Todas estas causas, relaciones y perspectivas de futuro son sólo algunas de las conclusiones que se presentan en el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, concretamente en el Informe de síntesis para responsables políticos del 2014 (IPCC, 2014).

2.2.3. Relación cambio climático - ciclo del agua

Las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la combustión de combustibles fósiles causan un aumento de la temperatura en la tierra. Los efectos de este calentamiento global incluyen un aumento en el nivel del mar y un cambio en los patrones de precipitaciones. Como consecuencia, la escasez de agua, las inundaciones y la erosión ocurren con mayor intensidad y frecuencia. Estos impactos en el cambio climático son una amenaza para la vida humana, la vivienda, el suministro de agua potable, las cosechas y la producción. El sector del agua debe adaptarse al cambio climático, a fin de garantizar un adecuado abastecimiento en el futuro.

Al mismo tiempo, el suministro de agua potable y el tratamiento de aguas residuales también contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero. Las compañías de agua son, por lo general, energéticamente muy consuntivas (10%-35% de sus costes operativos totales).

Las pérdidas de agua, por ejemplo, conducen a un consumo más alto de energía, y las emisiones de metano y óxido nitroso de las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden aumentar aún más la huella de carbono del sector del agua. Con la actualización de las tecnologías y de los procesos de gestión de las compañías de agua en sistemas más eficientes energéticamente, así como la recuperación de energía y de nutrientes en las aguas residuales, hay excelentes oportunidades para la mejora del balance de carbono en las empresas de abastecimiento y de aguas residuales, por ejemplo mediante la reutilización de efluentes tratados en cultivos. Por lo tanto el sector del agua tiene una excelente oportunidad de contribuir a mitigar el cambio climático.

Las inversiones en eficiencia energética y en producción de energía en sistemas de agua urbana pueden ser extremadamente rentables. Bien planeadas, estas inversiones tienen tiempos de amortización de sólo unos pocos años. A modo de ejemplo, la mejora en el proceso de una planta de tratamiento pueden reducir el consumo energético, para ello se puede adecuar el funcionamiento de los equipos a las necesidades reales de tratamiento por medio de sistemas de regulación de frecuencia en los motores y otra instrumentación específica, o poner en marcha operaciones basadas en técnicas y algoritmos de aprendizaje previo y evolución de parámetros.

Por otro lado, recurrir a equipos de alta eficiencia puede llegar a reducir de 1,07 a 0,82 kWh/kg/DQO, lo que puede suponer una reducción de 200 toneladas de CO₂ al año. Recurrir a energías alternativas, es decir a la cogeneración, esto es aprovechar el biogás para la generación de energía eléctrica, puede permitir la reducción de la huella de carbono en más de 350 toneladas de CO₂ al año. Pero el autoabastecimiento de energía no sólo contribuye a la reducción de las emisiones sino que además puede suponer un ahorro económico importante. Éstos son sólo algunos ejemplos de las posibles medidas que pueden ser implementadas en las distintas etapas del ciclo de agua para reducir las emisiones de GEI.

Afrontar el reto genera un doble beneficio: reducir los costes de operación al mismo tiempo que se reduce la huella de carbono generada por cada empresa, contribuyendo a la reducción de emisiones producidas de forma general en todo el país.

2.3. Diseñando soluciones para mitigar el cambio climático. El proyecto WaCCliM.

El objetivo de los siguientes puntos es presentar la herramienta ECAM, *Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring tool*. Esta herramienta ha sido concebida para que los servicios de agua potable y aguas residuales puedan evaluar por ellas mismas sus operaciones en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y eficiencia energética. La herramienta ECAM se ha desarrollado dentro del marco del proyecto WaCCliM (Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation). El principal objetivo de este proyecto como parte de la Iniciativa por el Cambio Climático (Internacional Climate Initiative (ICI)) y con proyección hasta 2019, es mostrar cómo el sector del agua puede contribuir a mitigar el cambio climático apoyando a los servicios de agua en la identificación de procesos y tecnologías que minimicen su huella de carbono. El proyecto está financiado por la Cooperación Internacional Alemana GIZ (Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) y dirigido por la IWA (International Water Association), que ha delegado el desarrollo de las bases del proyecto en el Núcleo de Ingeniería Sanitaria del LNEC (Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil, Portugal) y en el ITA (Grupo y Tecnología del agua de la UPV). La metodología implementada en la herramienta considera el rendimiento global de todo el sistema, así como el desempeño de cada una de las seis etapas del ciclo urbano del agua. La herramienta también evalúa el nivel del servicio, de manera que permite el control sobre las medidas adoptadas por el abastecimiento, evitando poner en peligro la calidad del servicio prestado debido a las posibles acciones acometidas para la reducción de GEI.

Los niveles de servicio y de rendimiento energético se calculan sobre la base de indicadores de desempeño publicados por la IWA para abastecimiento y saneamiento (Matos et al., 2003; Alegre et al., 2006), y otros indicadores adicionales o definidos ex profeso. Los requerimientos de energía se traducen en emisiones de GEI utilizando el mix energético del país. Las emisiones de óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄) que se pueden producir durante las operaciones propias de

los servicios, se evalúan con la metodología adaptada por el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

El fundamento de análisis y la metodología que se ha desarrollado durante el proyecto, y en la que han participado numerosos expertos de diferentes grupos y nacionalidades, han sido aplicadas en servicios piloto de tres países distintos: Tailandia, México y Perú. Esto ha permitido un proceso de retroalimentación, ampliación y corrección del sistema de indicadores creado para incluir a las empresas de aguas en la mitigación del cambio climático.

WaCCliM se relaciona con las comunidades internacionales del agua y el clima, con los gobiernos nacionales y las asociaciones de servicios públicos de agua potable y aguas residuales en torno, en primer lugar, a los tres abastecimientos piloto (México, Perú y Tailandia). Junto con sus socios, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú y el Ministerio de Recursos Naturales y Medio Ambiente de Tailandia. El principal compromiso del proyecto con estos tres abastecimientos es asegurar que estas empresas reduzcan las emisiones asociadas a sus procesos reduciendo al mismo tiempo sus costes de operación, manteniendo o incluso mejorando sus servicios. Para lograr esto, los abastecimientos piloto se apoyan en expertos del proyecto que llevarán a cabo estudios de base, propuestas de mejora reales y formación específica.

A nivel nacional, el proyecto trabaja con agentes políticos y asociaciones nacionales de los países socios para mejorar las condiciones de financiación y aplicación de las medidas de reducción en el sector del agua. En el plano internacional, WaCCliM seguirá desarrollando y ampliando el conocimiento sobre el agua y la mitigación del cambio climático a través de conferencias, grupos de expertos, directrices técnicas y recursos online. La aplicación efectiva ayudará a abogar por mejorar los mecanismos de financiación y los incentivos políticos para replicar el éxito del proyecto en los países socios y en otros lugares.

2.4. La herramienta ECAM. Metodología de evaluación y seguimiento

El proceso de creación de ECAM ha permitido que las bases de análisis, la metodología y el sistema de indicadores converjan. ECAM ofrece a los servicios de agua una herramienta que engloba todos los estudios previos y que les permite valorar por ellas mismas y en base a los datos que tienen disponibles su contribución a la mitigación del cambio climático. Además les ayuda a identificar prioridades de cara a la inversión en medidas para reducir su gasto energético y por tanto, también, sus emisiones.

La herramienta es de dominio público (www.iwa-network.org/WaCCliM/) y se ha concebido para que sea un instrumento útil y manejable, de manera que cualquier abastecimiento pueda utilizarla para cuantificar, valorar y monitorizar las emisiones asociadas a su servicio, además de

obtener una visión clara y objetiva de sus problemas principales. De esta forma será más sencillo establecer una hoja de ruta en las medidas a acometer.

Tanto la herramienta como la metodología propuesta pretenden convertirse en el instrumento de trabajo de empresas de agua de cualquier país que deseen controlar las emisiones asociadas a su servicio. Con este objetivo ha sido concebida y desarrollada, englobando estudios previos y opiniones de expertos internacionales en la materia.

El objetivo principal de la herramienta es permitir la identificación de las potenciales áreas de mejora en las empresas de servicios de agua, en particular en lo que respecta al ahorro energético. Esta misma herramienta será utilizada para realizar el seguimiento del verdadero impacto de las mejoras establecidas. Es posible estimar las emisiones de GEI, tanto las emisiones indirectas a través del consumo de energía eléctrica como las directas, de forma general para el ciclo urbano del agua y en particular para cada una de sus etapas.

La herramienta permite la consecución de dos objetivos principales, por un lado el seguimiento del progreso en la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero, y por otro la garantía de que los niveles de calidad de suministro se mantienen sin verse comprometidos. Aunque a partir del seguimiento de las emisiones y la comparación con respecto a las emisiones de referencia, es fácilmente reconocible si el primer objetivo se cumple, es importante destacar que los métodos de evaluación de GEI no están directamente relacionados con los indicadores de calidad de servicio. Por lo tanto, la metodología no sólo establece indicadores relacionados con las emisiones de GEI sino también una serie de indicadores de la calidad de servicio que deben tenerse en cuenta cuando se analizan los resultados de las emisiones tanto directas como indirectas. Por ejemplo, las emisiones por metro cúbico de agua tratada pueden incrementarse porque el nivel de tratamiento crece, lo cual no es un problema si el tratamiento inicial era insuficiente. Las emisiones por metro cúbico consumido pueden incrementarse también si la presión que se les estaba ofreciendo a los usuarios era insuficiente y ésta se ha corregido a lo largo del proyecto. Si estos aspectos no se tuvieran en cuenta a lo largo del sistema de evaluación puede parecer que las medidas de mejora no han funcionado, cuando en realidad lo que se ha hecho es mejorar el servicio. Lo mismo es aplicable en el sentido inverso, es decir, si se mejora la evaluación no porque se mejore la situación con respecto a las emisiones asociadas o al consumo energético, sino porque se ha disminuido los niveles de servicio.

2.4.1. Concepto del sistema

WaCCliM se refiere a todo el ciclo urbano del agua, con la excepción de los usos finales y de la reutilización del agua que no se tiene en cuenta. La Figura 2-2 muestra los límites que se definen en la metodología a la hora de hacer referencia a cada uno de los volúmenes de control. Así el grupo más grande se refiere al sistema de captación de agua, que engloba al sistema urbano de agua y éste al servicio de abastecimiento y al servicio de saneamiento.

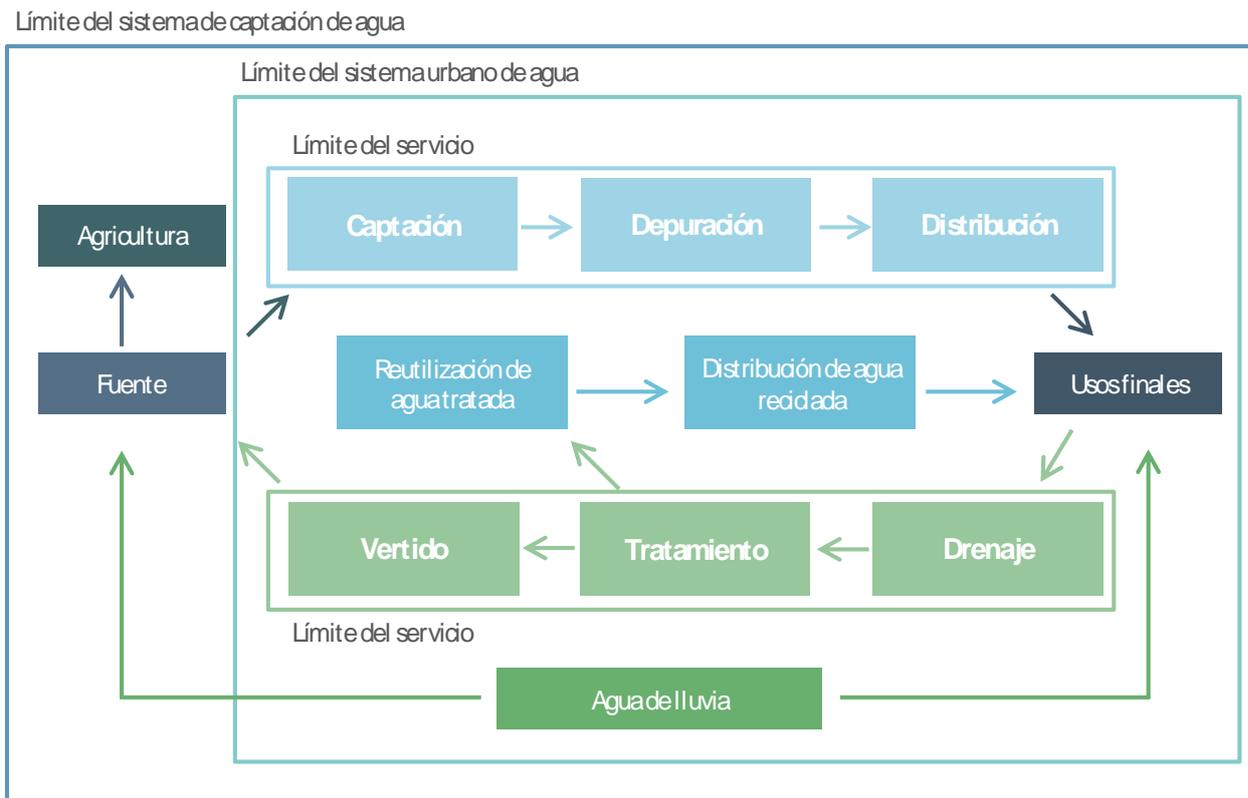


Figura 2-2: Límites del sistema urbano del agua

Las emisiones de GEI que corresponden a cada una de las etapas del ciclo del agua dependen en gran medida de las características de cada etapa, y por esto, tan importante es mantener una visión global de todo el ciclo como poder observar cada una de las etapas por separado. Por este motivo, documentar el contexto en el que se encuentra el sistema es primordial. Por ejemplo, en un ciclo urbano cuya agua provenga de plantas de desalación, la intensidad energética en la etapa de tratamiento puede superar los 4 kWh/m³, mientras que si el suministro de agua se realiza desde un pozo, puede requerir hasta diez veces menos. Si por ejemplo el agua proviene de una fuente natural de buena calidad, la intensidad energética de la etapa de tratamiento es prácticamente nula. Del mismo modo, los tratamientos de aguas residuales también pueden contemplar una amplia variedad de situaciones energéticas dependiendo de las características del tratamiento y de los requisitos de descarga de los efluentes.

En conclusión, la huella energética se calcula para cada una de las etapas que al fin y al cabo supone calcular la global. Las instalaciones o subprocessos dentro de cada etapa también pueden ser evaluadas de forma individual y siempre comparando con los valores de referencia vinculados a las características de cada etapa, una serie de cifras aproximadas que sirven para activar alarmas. Es importante establecer los valores de partida de la evaluación del sistema de indicadores, de manera que sea posible observar cómo éste va evolucionando con la implementación de medidas de mejora.

Por último, consideradas las etapas como independientes, se debe examinar todo el ciclo del agua y las conexiones entre las etapas. Los cambios en una de las etapas pueden influenciar en la energía consumida de otra, y por tanto en las emisiones de GEI, a modo ilustrativo se incluyen varios ejemplos:

- La gestión del agua de lluvia: la eliminación del agua de lluvia de las alcantarillas (sistema separativo) reduce los requerimientos de bombeo de las aguas residuales y de las depuradoras.
- El efluente tratado en agricultura: los nutrientes de aguas residuales tratadas no tienen que ser eliminados para proteger el medio acuático reduciendo la demanda de energía de tratamiento.
- Reciclar las aguas grises en los hogares: se requiere en estos casos suministrar menos agua depurada reduciendo por tanto las exigencias del bombeo de éstas. Del mismo modo se descarga menos agua residual, reduciendo el bombeo de aguas residuales.

El rendimiento de cada etapa permite identificar las etapas menos eficientes, y por tanto aquéllas a las que se debe prestar más atención.

Las etapas de ciclo urbano del agua: 1. captación y transporte de agua; 2. depuración; 3. distribución; 4. drenaje; 5. depuración y 6. vertido de aguas residuales. Éstas están representadas en la Figura 2-3. Estas etapas pueden estructurarse en dos grupos en función de la necesidad energética. Un primer grupo se corresponde con las cuatro etapas de bombeo del ciclo urbano del agua (captación y transporte de agua, distribución, drenaje y vertido de aguas residuales). En estas etapas toda la demanda de energía se debe a la necesidad de mover el agua de una etapa a otra. La caracterización del rendimiento desde el punto de vista energético de estas etapas es muy sencilla en el caso de tuberías simples, y más compleja cuando se trata de redes de distribución.

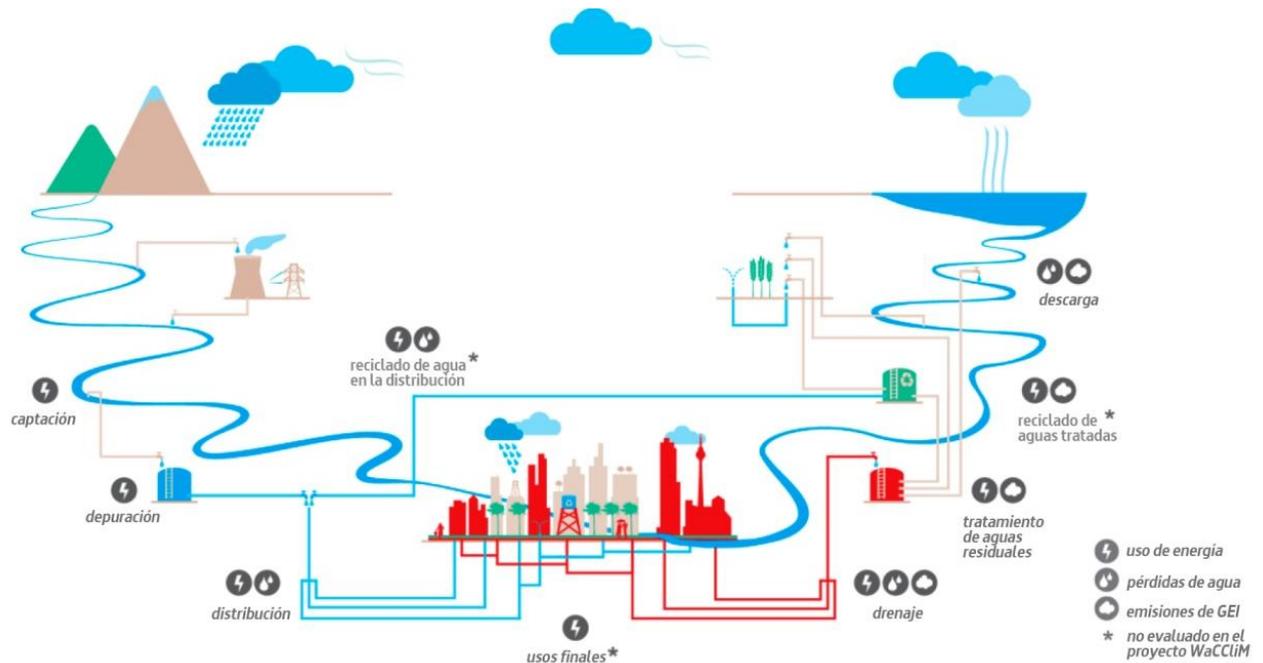


Figura 2-3: El ciclo urbano del agua (Fuente: IWA. WaCCliM Methodology Factsheet)

Un segundo grupo se corresponde a las etapas de tratamientos (depuración y tratamiento de aguas residuales) del ciclo del agua. Ambas etapas más complejas que el resto debido a sus diferentes procesos que también incluyen energía de bombeo. Por ejemplo, en la plantas de tratamiento de aguas residuales existen posibles acciones para minimizar la energía consumida, como la optimización de los procesos de digestión anaeróbica, la implementación de cogeneración, opciones de energía renovable in situ, entre otras (USEPA, 2013). Los puntos de referencia para cada uno de estos procesos son los que ayudarán a identificar las posibles ineficiencias.

2.4.2. La evaluación de la metodología

La metodología propuesta se basa en evaluar la eficiencia energética de cada una de las etapas, a partir, en primer lugar de los datos que generalmente están disponibles.

La variable principal es la verdadera energía consumida en las etapas que requieren bombeo o en los procesos incluidos en las etapas de tratamiento. Ésta debe ser comparada con la energía mínima ideal estrictamente necesaria para hacer el mismo trabajo pero sin pérdidas (Cabrera et al., 2014; Mamade et al., 2014), siempre desde la base de unos estándares de calidad fijados inicialmente. Por lo tanto, entregar una presión por debajo de la mínima establecida o efluentes con una calidad inferior a la reglamentaria, a pesar de que requieren un consumo inferior de energía, son escenarios inaceptables. Los niveles de servicio para las diferentes etapas del ciclo urbano deben estar establecidos y verificados, con anterioridad a la realización de cualquier análisis de la eficiencia energética. Aquellos sistemas que no estén cumpliendo con las normas

establecidas, deben en primer lugar alcanzar los requerimientos, una vez alcanzados ya estarán en disposición de fijar objetivos y estrategias para reducir energías.

La siguiente fase es la evaluación de la eficiencia energética de cada una de las etapas. Obtener la intensidad energética de cada etapa y de cada instalación o proceso, dentro de ese escenario de cumplimiento de requerimientos mínimos de calidad y el posterior diagnóstico, comparando este valor real con el valor ideal. Esto permite obtener advertencias en el caso de que alguna de las etapas sea ineficiente. Para entender mejor lo anterior, se presenta un ejemplo sencillo correspondiente a la etapa de transporte:

La energía necesaria para elevar 100 metros un volumen de agua de 1 m³ es exactamente 0,2725 kWh/m³. 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). Si el agua se bombea de un pozo, una elevación de 100 metros y el valor resultante de los indicadores en este caso fuera 0,7 kWh/m³, es evidente que existe posibilidad de mejora.

La evaluación de la etapa de distribución es un poco más compleja porque las ineficiencias pueden deberse no sólo a bajos rendimientos en las estaciones de bombeo, también a la existencia de fugas, a la fricción en las tuberías o a otras causas, por ejemplo elementos de ruptura de presión. Al igual que antes, se requiere fijar unos valores de eficiencia ideales (teóricos) y conocer la eficiencia real del sistema, para poder cuantificar los márgenes de mejora.

En algunos casos, cada etapa se puede dividir en subetapas más pequeñas, incluso en unidades elementales. Por ejemplo, un sector de una red puede ser considerada como una subetapa de la etapa de distribución, y éste puede dividirse en estaciones de bombeo, tuberías, válvulas reductoras de presión, etc. Del mismo modo, cada planta de tratamiento se puede dividir en procesos unitarios. El sistema de indicadores es el mismo para cada etapa o subetapa.

Por otro lado, los valores de referencia pueden ser el resultado de precisos cálculos basados en procesos físicos o bien consecuencia de análisis estadísticos sobre procesos complejos. Especialmente en el segundo caso los valores de referencia no deben ser interpretados como un dogma, sino como una llamada de atención sobre el sistema. Una vez que las ineficiencias se han localizado en las instalaciones individuales pertenecientes a una etapa, se debe realizar un análisis coste-beneficio para evaluar la viabilidad de las posibles acciones de mejora a realizar.

La última fase debe ser buscar hechos que expliquen los resultados del diagnóstico. Por ejemplo, el bajo rendimiento en la etapa de distribución se puede atribuir a muchos factores, tales como exceso de presión entregada a los usuarios, existencia de fugas o ineficiencias en los bombeos. En cualquier caso aunque a partir del simple diagnóstico no se pueden establecer soluciones concretas, sí que se obtiene un análisis cualitativo de la situación que permite al gestor centrar sus esfuerzos y medios técnicos en evaluar aquellas instalaciones que el diagnóstico presenta como problemáticas.

Por tanto como resultado final, la implementación de ECAM ofrece a los servicios el resultado de un sistema de indicadores relacionados tanto con la eficiencia de sus etapas o procesos como con las emisiones de GEI asociadas a todo su sistema.

2.4.3. Enfoque del Ciclo integral del agua

La metodología presentada se basa en un enfoque holístico para identificar globalmente las áreas de mejora evaluando las diferentes etapas del ciclo urbano del agua. La metodología propuesta, si bien posee un gran número de beneficios, no está exenta de limitaciones, principalmente porque requiere de un proceso de crecimiento y retroalimentación que le permita avanzar y ampliar su enfoque.

Beneficios:

- Los abastecimientos pueden evaluar su eficiencia.
- Se establece un punto de partida o de referencia del estado actual para los abastecimientos en términos tanto de emisiones de gases de efecto invernadero, como de consumo de energía y niveles de servicio.
- La misma metodología se puede establecer para diversos servicios a nivel nacional, lo que permite establecer un mismo sistema de calidad (benchmarking) nacional.

Limitaciones:

- El método no establece acciones concretas de mejora. Se requiere de un estudio complementario y posterior una vez que se ha identificado el área a mejorar por medio de la metodología propuesta.
- Una buena evaluación depende de la calidad de los datos recogidos.
- Se requiere de una monitorización continua de los datos para evaluar las mejoras.
- No se considera la variación del mix energético dentro de un mismo país ni la discriminación horaria en la tarifa energética.

El uso de la herramienta en los tres países piloto (México, Perú y Tailandia) para el conocimiento de su estado actual y la evaluación de las medidas establecidas para reducir su consumo energético y sus emisiones directas, permitirá conocer mejor las debilidades de la herramienta. Se trata por tanto de un proceso continuo de mejora con el objetivo de que ésta se convierta en la herramienta de referencia para aquellos servicios de agua que desean contribuir en la mitigación del cambio climático.

2.4.4. Cálculo de las emisiones

ECAM se centra en los servicios de agua potable y aguas residuales, por lo que sólo se consideran las emisiones relacionadas con la misión de estos servicios; entregar agua potable a los usuarios, y recoger y tratar las aguas residuales de los hogares conectados.

Hay tres tipos de emisiones de GEI, llamadas "scopes" por el IPCC. Se distinguen (Figura 2-4):

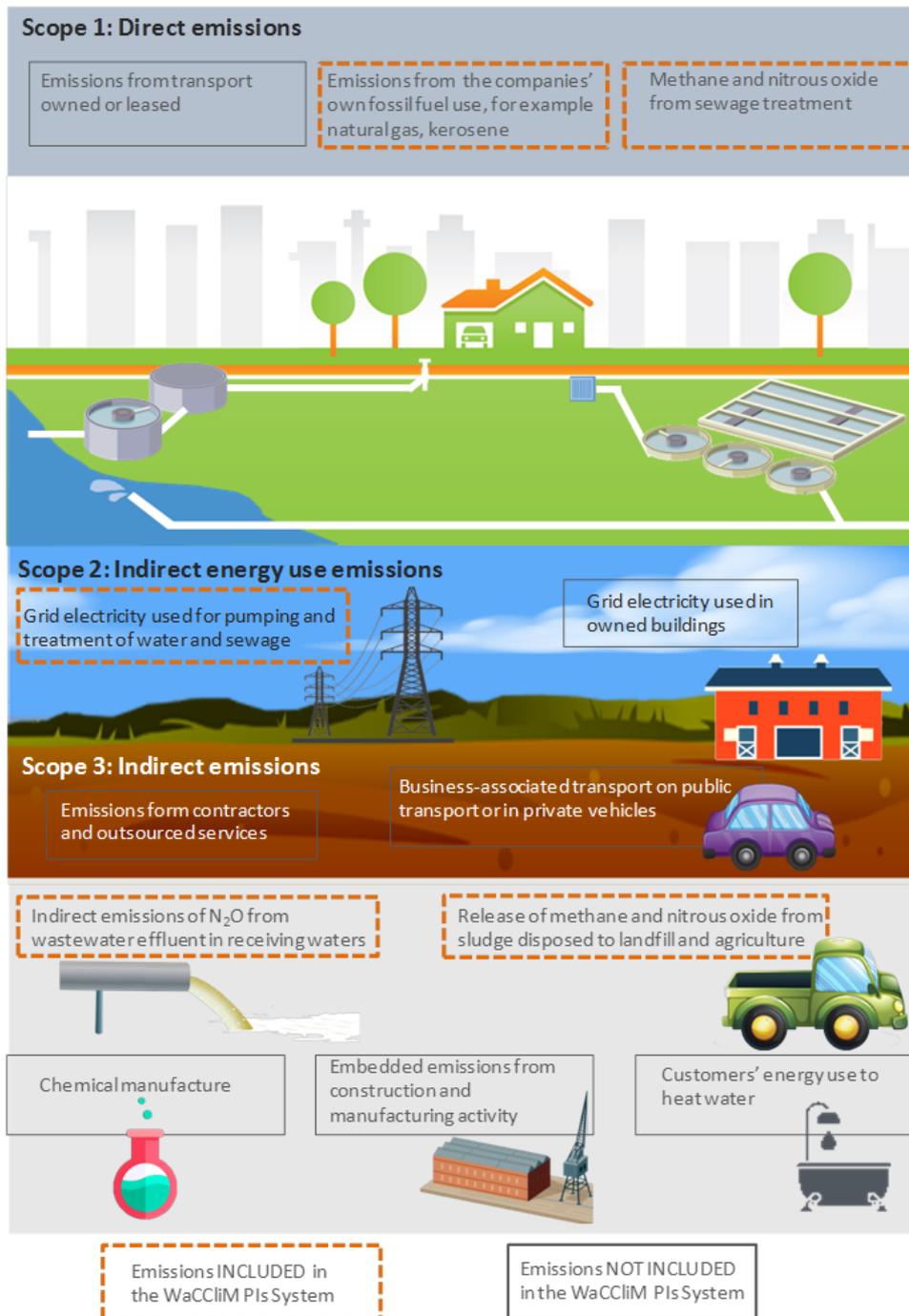


Figura 2-4: Emisiones GEI en la industria del agua (adaptada de OFWAT, 2010)

Scope 1 - las emisiones directas de GEI que se producen dentro de los límites del servicio de abastecimiento o aguas residuales. Éstas incluyen las emisiones producidas en las instalaciones por la combustión en sus motores, la operación de los camiones utilizados

para el mantenimiento de la red y las instalaciones, así como las emisiones directas de metano o el óxido nitroso en el alcantarillado y tratamiento de las aguas residuales.

Scope 2 - emisiones de GEI indirectas asociadas al consumo de electricidad en la red. Éstas representan las emisiones de gases producidos en la generación de la energía consumida (comprada) y son, por tanto, dependientes de la composición de la mezcla de combustible de la energía importada (mix energético).

Scope 3 - todas las otras emisiones indirectas, que son consecuencia de los servicios prestados pero que provienen de fuentes que no son propiedad, no son controladas o se encuentran fuera de los límites de la empresa de agua o aguas residuales. Estas emisiones incluyen las derivadas de la utilización de productos químicos, materiales utilizados para la construcción, el transporte de lodos a su sitio de disposición, y las emisiones de óxido nitroso y metano a partir de la descarga de aguas residuales tratadas o no tratadas.

Evaluación de emisiones directas (Scope 1.)

Existen una serie de **emisiones directas** asociadas al ciclo urbano del agua:

- Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O procedentes de la combustión de combustibles fósiles en las instalaciones fijas. Éstas pueden incluir los motores de los generadores y los motores para el proceso de conducción y/o equipos de bombeo en el tratamiento del agua y las instalaciones de bombeo. Estas emisiones se basan en los factores de emisión por defecto para el tipo de combustible y el consumo de combustible según las directrices del IPCC.
- Las emisiones de CH₄ procedente de las alcantarillas: El metano es un potente gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global de 34 CO₂-equivalentes, equivalente a un horizonte temporal de 100 años según indica el IPCC (2013). El metano se puede producir en las alcantarillas a través de la conversión de carbono por arqueas metanógenas en condiciones anaeróbicas, y luego es liberado a la atmósfera a través de los pozos de registro y los puntos de descarga atmosférica. Aunque las emisiones de metano comúnmente se han medido tanto en los sistemas por gravedad (Graff et al., 2012), como en sistemas a presión (Guisasola et al., 2008), el riesgo de la producción tiende a ser mayor en los colectores a presión ya que en general no hay aire para difundir el oxígeno en la fase líquida y promover condiciones aeróbicas. La producción de metano también está directamente relacionada con el tiempo de retención de las aguas residuales en condiciones anaeróbicas. Aunque el IPCC (2006) indica que las alcantarillas subterráneas cerradas, que son la mayoría, no contribuyen significativamente a las emisiones de CH₄, algunos estudios han demostrado lo contrario (Guisasola et al., 2008). Un estudio determinó que las emisiones de gas metano de las

aguas residuales pueden suponer más de un 12% de las emisiones de GEI procedentes de una EDAR. Sin embargo, todavía no hay ningún método convencional para estimar estas emisiones que pueda ser fácilmente implementado por un abastecimiento.

- Las emisiones de CH₄ procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales: Las emisiones de metano por el tratamiento biológico de aguas residuales pueden incrementar un 12% la huella de carbono de la EDAR y son debidas al metano disuelto que se produce y transporta desde el sistema de recogida hasta los reactores aeróbicos (Daelman et al., 2013a).

La metodología del IPCC contempla todos ellos, excepto el metano generado en las alcantarillas. Incluye un factor de emisión de N₂O para el tratamiento de las aguas residuales relacionado con la población, sin embargo se empieza a aceptar el hecho de que pueda estar relacionado con las condiciones operativas (Porro et al. 2014b). Por ejemplo, niveles de oxígeno disuelto demasiado bajos pueden llevar a la producción de N₂O de desnitrificación por bacterias amonio oxidantes, AOB (Bock et al., 1995; Chandran et al., 2011; Kampschreur et al., 2009). Por lo tanto, estas estrategias deben ser consideradas para minimizar las emisiones de GEI en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Evaluación de Emisiones indirectas (Scope 2)

Las **emisiones indirectas derivadas del consumo de energía** en el ciclo urbano del agua.

El consumo de energía eléctrica en el conjunto del sistema es principalmente para el bombeo de agua (para elevar y/o transportar, distribuir, recoger y verter). Pero, los procesos asociados a la potabilización y tratamiento de aguas residuales también usan energía. En el tratamiento del agua, las necesidades de energía son muy dependientes de los siguientes parámetros:

- La calidad del agua bruta
- Los requisitos del agua tratada
- El tipo de tratamiento (Silva y Rosa, 2014)
- El diseño de la planta (los requerimientos de elevación de agua en la planta son muy variables y, en muchas ocasiones, se necesita bombeo complementario)
- Capacidad de tratamiento

Históricamente las plantas de tratamiento de agua no han sido grandes consumidores de energía (la filtración pasiva y los tratamientos químicos tradicionales, como la cloración son modestos consumidores de energía), pero las nuevas regulaciones en la calidad del agua y un agua bruta más contaminada, requieren tecnologías energéticamente más intensivas como el uso de membranas, ozonización y tratamientos ultravioletas.

En las plantas de tratamiento de aguas residuales, las características del agua que llega a la planta y el nivel del tratamiento requerido (primario, secundario, terciario o eliminación de

nutrientes) son los principales condicionantes de la demanda de energía. Los principales consumidores de energía en la EDAR son las bombas y los aireadores, seguidos de la energía necesaria para estabilizar y deshidratar o secar los lodos. También pueden afectar a la demanda de energía los equipos de control y en algunos casos la desinfección con luz ultravioleta y la ozonización. El control de olor cuando se implementa, también puede suponer una cantidad significativa de energía para el servicio, debido a las grandes cantidades de aire que debe ser movido a través de las unidades de tratamiento de olores.

Al final, se requieren medidores eléctricos y de agua para determinar tanto el consumo de energía (kWh) como la intensidad energética (kWh/m³), que es el primer nivel de cada etapa. Además, en la potabilización y tratamiento de aguas residuales, también se deben conocer una serie de detalles adicionales de los procesos.

Conocidos los kWh consumidos en cada etapa y de forma global, es posible calcular las emisiones de CO₂ asociadas a este consumo energético a través del factor de emisión. Este factor de emisión cuantifica los kilogramos de dióxido de carbono emitidos por cada kWh de electricidad generada a partir de combustibles fósiles, según las directrices del IPCC (2006). Para el cálculo del factor de emisión los kWh producidos por energías libres de carbono no se tienen en cuenta. Dentro de este tipo de energías se engloban, las fuentes renovables de electricidad como la energía hidroeléctrica, eólica o solar y por otro lado la energía nuclear. El factor de emisión tiene en cuenta la contribución media anual de las diferentes fuentes por lo que depende no sólo del país, sino también del año.

Este mix energético, como también se conoce al factor de emisión, debe ser fijo durante toda la evaluación con el fin de identificar la reducción asociada a las medidas implementadas independientemente de los cambios en el valor del mix energético.

Evaluación de otras emisiones indirectas resultantes de las operaciones sobre el terreno (Scope 3)

Existen **otras fuentes de emisiones indirectas** de GEI resultantes de las operaciones sobre el terreno:

- Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O por el transporte de lodos: Estas emisiones están relacionadas con el consumo de combustible de los vehículos que transportan los lodos fuera de las plantas de tratamiento. Pueden estar directamente relacionadas con el rendimiento de las operaciones debido a que el nivel de deshidratación de los lodos antes de su eliminación condicionará su cantidad. La cantidad influye en el número de viajes que se requieren fuera de la planta de tratamiento y por tanto en las emisiones de CO₂ durante el transporte.
- Emisiones de N₂O en la descarga del efluente a las aguas receptoras: Las emisiones de óxido nitroso (N₂O) pueden producirse como emisiones directas provenientes de las

plantas de tratamiento, o como emisiones indirectas provenientes de las aguas residuales después de la eliminación de los efluentes en vías fluviales, lagos o en el mar.

El método para la estimación de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O procedentes de la combustión in-situ, como por ejemplo de los generadores o accionamientos, se basa en las directrices del IPCC (2006). Para estimar las emisiones de CO₂, se aplica la ecuación presentada en el correspondiente capítulo del IPCC, condicionada por la cantidad de combustible consumido y un factor de emisión que depende del tipo de combustible. La ecuación para estimar las emisiones de CH₄ y N₂O se basa de nuevo en la cantidad y tipo de combustible consumido.

La metodología para estimar las emisiones de N₂O debidas a los efluentes de agua proveniente de fuera de las instalaciones se basa, de nuevo, en las directrices del IPCC (2006). Las ecuaciones correspondientes se cuantifican el nitrógeno del efluente y un factor de emisión de N₂O por defecto (0,005 kg N₂O-N / kg N). La incertidumbre de este factor de emisión es bastante alta. Sin embargo, esta fuente de emisiones de GEI puede estar directamente relacionada con el rendimiento de la EDAR (eliminación de nitrógeno), por lo tanto proporciona un medio de control de los rendimientos en comparación con las reducciones estimadas de GEI.

2.4.5. Información general de las emisiones de GEI incluidas en ECAM

Debido a la disponibilidad acotada de datos, y a las limitaciones de las metodologías generales para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero, cuando los datos específicos no están disponibles, ECAM trata de representar el mayor número de emisiones como sea posible, manteniendo el foco en la evaluación de aquellas emisiones que permitan a las empresas, por sí mismas, valorar el impacto de las medidas operacionales y tecnológicas aplicadas.

ECAM está diseñada para asistir a los servicios públicos en la evaluación de su rendimiento. El objetivo principal es proporcionar información útil para apoyar el diagnóstico y el primer paso hacia una estrategia de mejora. Por lo tanto, la metodología se centra en el uso de la energía y las emisiones de gases de efecto invernadero que se asocia directamente con las operaciones de estos servicios. Este enfoque asegura que la metodología es útil para el servicio, pero por diferentes razones prácticas (universalidad y sencillez), no cubre todas las emisiones de gases de efecto invernadero que se dan en el ciclo urbano del agua y que se han comentado anteriormente. La siguiente figura (Figura 2-5) muestra las emisiones de GEI asociadas al ciclo urbano del agua que están o no están incluidas en la herramienta.

	Captación	Depuración	Distribución	Drenaje	Tratamiento	Vertido
Scope 1. Emisiones directas						
Emisiones del parque de vehículos de mantenimiento	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Emisiones de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O procedentes de la combustión de combustibles fósiles en las instalaciones fijas	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Emisiones de CH ₄ procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales				✗	✓	
Emisiones de N ₂ O procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales:				✗	✗	
Scope 2. Emisiones indirectas						
Emisiones indirectas derivadas del consumo de energía	✓*	✓	✓*	✓**	✓	✓**
Scope 3. Otras emisiones indirectas						
Emisiones procedentes de la fabricación de los productos químicos utilizados		✗			✗	
Emisiones procedentes de la construcción de los materiales utilizados	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Emisiones de N ₂ O y CH ₄ por la descarga de aguas residuales sin tratamiento				✓		
Emisiones de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O por el transporte de lodos					✓	
Emisiones de N ₂ O en la descarga del efluente a las aguas receptoras						✓
	✗ Emisiones no cuantificadas en la herramienta aunque existan			✓ Emisiones cuantificadas en la herramienta		
Leyenda	* A no ser que la captación y distribución del agua se realice por gravedad			** A no ser que el drenaje y el vertido de las aguas residuales se realice por gravedad		

Figura 2-5: Emisiones de GEI por scope y etapa en la que se cuantifica en la herramienta ECAM

Se deben tener en cuenta dos consideraciones diferentes en el alcance de dos indicadores:

- Indicador de "Emisiones totales por población servida (kg CO₂e / serv Pop.)", que tiene por objeto vincular las emisiones a la población que recibe el servicio. En este caso no se consideran las emisiones de la descarga de aguas residuales brutas. Este indicador tiene por objeto impulsar mejoras a corto plazo, y se utiliza únicamente para la presentación de informes del proyecto WaCCliM.
- Indicador de "Emisiones totales por habitante (kg CO₂e / inhab.)", que tiene por objeto vincular las emisiones a la zona de servicio de la empresa. En este caso se incluyen las emisiones de la descarga de aguas residuales brutas. Este indicador tiene por objeto impulsar mejoras a largo plazo, incluyendo el aumento de la cobertura de tratamiento de aguas residuales.

La población servida está definida para el sistema de aguas residuales como la población que está conectada al sistema de alcantarillado y tratamiento antes del vertido.

La población residente se define para el sistema de aguas residuales como la población residente dentro de la zona de servicio, ya sea conectada a la red de alcantarillado o no.

Las aguas residuales que no se recogen no están incluidas, ya que se desconoce si se tratan in-situ o se descargan al medio sin tratamiento.

2.4.6. Consideraciones finales

Es importante destacar varias consideraciones:

- Las emisiones de gases de efecto invernadero no sólo dependen de la eficiencia del sistema, del mix energético y de la calidad del servicio, sino también del uso del agua. Las emisiones en los usos finales del agua son, con mucho, las más elevadas del ciclo urbano. Por eso cuando se estiman las emisiones generadas por todo el ciclo urbano del agua, la demanda de agua per cápita es una cuestión clave, y la gestión de la demanda una potente herramienta. El consumo de agua por habitante, que puede ser fácilmente cuantificado, debe ser parte de un primer análisis que advierta si procede la implantación de políticas de reducción de consumo. No tiene sentido buscar la eficiencia en todo el sistema para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero, con una demanda diaria por habitante de 400 litros, por ejemplo.
- En materia de medio ambiente, es importante tener una perspectiva global, por lo tanto se deben tener en cuenta las interrelaciones entre las diferentes etapas del ciclo urbano del agua desde la perspectiva de los potenciales ahorros de energía y de GEI. La gestión del agua de lluvia recogida, el uso del agua reciclada (para riego), o el recircular las aguas grises en los hogares, son opciones que como mínimo deben ser consideradas.

La Figura 2-6 muestra la visión global del cálculo de las emisiones que deben ser consideradas en el ciclo urbano del agua, y que implementa la herramienta.

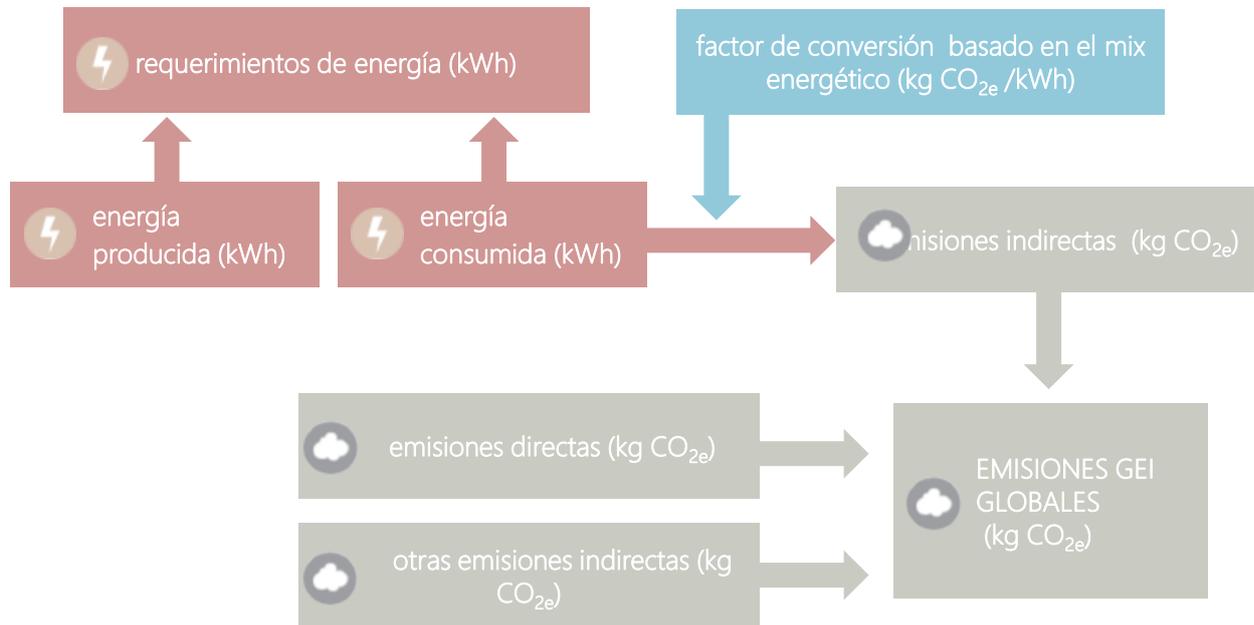


Figura 2-6: Resumen del enfoque para el cálculo de las emisiones globales de GEI

2.4.7. La estructura de la herramienta ECAM

ECAM se estructura en base a los tres scopes definidos anteriormente. En el caso del scope 2 (emisiones indirectas derivadas del consumo de energía eléctrica) se debe evaluar el consumo de energía para poder calcular las emisiones de GEI de la totalidad del servicio, tanto de abastecimiento de agua como de aguas residuales. Por tanto, dentro de este scope, se evalúa la eficiencia energética de las seis etapas del ciclo urbano del agua. Cada etapa o cada sub-etapa (entendiendo por sub-etapa cada sector, estación de bombeo o planta de tratamiento individual) es evaluada a partir de los indicadores.

La Figura 2-7 muestra cómo se estructuran las diferentes partes de la herramienta para evaluar el rendimiento energético y las emisiones de GEI. Cada etiqueta se corresponde con cada una de las hojas de cálculo de la herramienta.

1. **Niveles de servicio o indicadores de contexto**, que proporcionan información útil para caracterizar el sistema, pero que no evalúan directamente la eficiencia energética y las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que ayudan a explicar el valor del indicador de desempeño (por ejemplo el porcentaje de volumen tratado con un tipo de proceso concreto sobre el total).

2. **Indicadores clave**, que son los indicadores que evalúan directamente los objetivos de la herramienta en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y eficiencia energética (por ejemplo, la energía estándar consumida, o la eficiencia del sistema de distribución).

3. **Indicadores complementarios**, son indicadores que proporcionan una visión de los procesos que tienen lugar en cada etapa del sistema y proporciona también información útil. Permiten realizar una evaluación más a fondo de la eficiencia, de manera que sea más sencillo detectar a qué se pueden deber las ineficiencias (por ejemplo las pérdidas de agua por unidad de longitud, o la capacidad de utilización de una planta de tratamiento).

Las instrucciones sobre cómo introducir los datos y el uso de la herramienta se muestran en la primera página de ésta. Además, en cada pestaña, las variables a introducir y los indicadores calculados se describen al pinchar en el símbolo "?". La lista de todos los indicadores y variables que forman el sistema de indicadores puede consultarse en los documentos del proyecto WaCCliM disponibles en su página web (www.iwa-network.org/WaCCliM/).

2.4.9. Emisiones no consideradas en la herramienta

Por último, se identifican a continuación una serie de emisiones que no han sido consideradas en la herramienta a pesar de ser parte del ciclo urbano del agua y se justifica el motivo por el cual no se han considerado.

- Emisiones de los usuarios finales:

El uso de energía por los usuarios finales para calentar agua es una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo del agua. Los usuarios finales también tienen un impacto en el uso de la energía total en el ciclo urbano del agua a través de un consumo excesivo de agua, así como del tipo de residuos (micro-contaminantes) que descargan y que influyen en el tratamiento requerido de las aguas residuales. Estas emisiones asociadas a los usuarios no se incluyen en la metodología dada la dificultad de identificar el uso final que hace el usuario tanto del agua que recibe como de la energía asociada a ella, y por otro lado porque estas emisiones no son responsabilidad directa de la empresa gestora. Sin embargo, desde una perspectiva más amplia, ésta es una etapa clave hacia la neutralidad energética del ciclo del agua urbana.

- Emisiones de CH₄ de alcantarillas:

Ya se ha comentado anteriormente las emisiones de metano que se pueden producir en los sistemas de alcantarillado, y a pesar de los recientes estudios que se están realizando sobre este tema y que confirman que estas emisiones pueden suponer un alto porcentaje de las emisiones del ciclo, no se han tenido en cuenta debido a que todavía no hay métodos convencionales para su estimación, y que puedan ser fácilmente implementados por una empresa de agua.

- Las emisiones de N₂O de alcantarillas:

El óxido nitroso es otro potente gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global de 298 CO₂-equivalentes. Aunque algunos estudios han informado que las emisiones de N₂O en las alcantarillas pueden ser significativas (Short et al., 2014), las condiciones que conducen a estas emisiones todavía no se comprenden bien, además el IPCC tampoco las considera.

- Las emisiones de CO₂ procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales:

El IPCC considera que estas emisiones son biogénicas en la naturaleza y por lo tanto no contribuye al aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera. El carbono biogénico es el carbono que se emite durante el ciclo natural del carbono, como consecuencia directa de la descomposición de la materia orgánica y no de la quema de combustibles fósiles.

- Las emisiones de N₂O de tratamiento:

Aunque se sabe que se producen emisiones de óxido nitroso (N₂O) en el tratamiento biológico de aguas residuales y éstas pueden comprender una parte significativa de las emisiones de GEI en la EDAR, no están incluidas en la ECAM, por dos razones:

- El factor de emisión por defecto establecido en las directrices del IPCC se basa en un estudio realizado en EE.UU. y no tiene por qué ser representativo de otras estaciones depuradoras de aguas residuales.
- El factor de emisión por defecto establecido en las directrices del IPCC se basa en la población; por lo tanto, no refleja los efectos de mejora en las operaciones y las medidas de reducción de gases de efecto invernadero cuando éstas se aplican.

Sin embargo, las emisiones de N₂O pueden ser evaluadas de forma cualitativa y pueden ser controladas y monitorizadas junto con otras medidas de reducción de GEI para verificar la mitigación del riesgo N₂O, o por lo menos que el riesgo no aumenta significativamente como resultado de las medidas propuestas.

La investigación internacional está trabajando en la definición de un mejor factor de emisión de N₂O para la EDAR y en una futura versión de ECAM sería posible incluirlo. Es importante no ignorar estas emisiones, por su elevado potencial de calentamiento global.

Con el fin de aumentar la conciencia sobre la importancia de estas emisiones, en la herramienta se calcula su equivalente de CO₂, usando el factor genérico de emisión del IPCC para las emisiones de N₂O en la EDAR de 3,2 g N₂O / persona / año, pero la cantidad calculada no se agrega a las emisiones totales, ya que puede no ser representativa dada la gran variabilidad observada en diversas campañas de medición en todo el mundo.

2.5. Conclusiones

Se ha presentado ampliamente la Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool, ECAM, que ha sido creada con el objetivo de que las empresas gestoras que deseen contribuir a mitigar los efectos del cambio climático tengan a su disposición una herramienta útil, de fácil manejo y que ofrezca resultados directos de evaluación.

Es obvio y está comprobado (a nivel de *muy probable* (IPCC, 2014)) que las emisiones antropogénicas son las causantes del cambio climático, es decir, que los procesos que el ser humano lleva a cabo en su día a día son los que están causando la modificación en el clima. Entre estas emisiones antropogénicas, el hecho de que las personas tengan agua de calidad disponible en el grifo de su casa y la necesidad de que sea tratada para devolverla al medio natural una vez que ha sido descargada, son procesos que contribuyen al calentamiento global.

Las empresas de agua deben ser conscientes de esta realidad y trabajar para disminuir las emisiones debidas a su servicio. Siendo conscientes de que el cálculo de estas emisiones no es sencillo, se deben poner a disposición de quien las requiera herramientas válidas y compactas que sí lo sean. Ya es bastante complicado que empresas, gobiernos y sociedad se pongan de acuerdo en las medidas de mitigación y adaptación necesarias, y en el momento actual ya imprescindibles, por lo que todos los estudios y herramientas que puedan facilitar la confluencia de decisiones deben ser una prioridad de los investigadores en el sector del agua.

Capítulo 3

Fase de diagnóstico energético

3.1. Introducción

El concepto de eficiencia, lograr más con menos, domina el siglo XXI. La eficiencia se convierte en un objetivo cada vez más importante año tras año. El transporte y la distribución de agua a presión exigen una cantidad significativa de energía, por lo que la eficiencia en este campo es un objetivo aún más necesario. Sin embargo, el logro de la eficiencia requiere una evaluación inicial de la situación global en la que se encuentra el sistema, y el consiguiente reconocimiento de los principales ahorros potenciales de energía, teniendo en cuenta la tecnología disponible y el marco económico actual.

Se requiere pues, una herramienta que integre las relaciones entre agua y energía, que sea capaz de realizar un diagnóstico que permita cuantificar los posibles ahorros en los sistemas presurizados de riego y agua urbana, y que favorezca la identificación de las necesidades a partir de los resultados obtenidos de cada sistema. En la actualidad la evaluación del sistema no se lleva a cabo a nivel global, sino teniendo en cuenta sus diferentes partes por separado; por ejemplo con los análisis de la eficiencia en las estaciones de bombeo. Pero, los mayores ahorros de energía se pueden lograr a través del análisis global del sistema, por lo que la integración de todas las partes y el estudio del sistema como un conjunto, es la clave de este diagnóstico.

Es esencial establecer puntos de referencia para la eficiencia energética de los sistemas presurizados de transporte de agua, designados en ocasiones como PWTS (Pressurized Water Transport Systems), mediante la definición de requerimientos energéticos mínimos realistas que tengan en cuenta las circunstancias particulares de cada sistema, tales como los patrones de consumo de demanda de agua, las fuentes de energía disponibles, los estándares de servicio requeridos y las características topográficas de la red.

La comparación de la energía y el consumo de agua actual con los requisitos mínimos de energía, aportarán una medida de los márgenes de mejora existentes. A lo largo de este capítulo se presentan tres nuevos indicadores para ayudar en dicha evaluación: el rendimiento ideal, el rendimiento real y el rendimiento objetivo. Los dos primeros indicadores, eficiencia ideal y real del sistema, se basan en los valores de la energía mínima requerida por los usuarios, la cantidad mínima de energía a suministrar a la red (dado su comportamiento ideal) y la energía consumida real. El tercer indicador, la eficiencia energética objetivo, se estima mediante el establecimiento de un límite ambicioso pero alcanzable de pérdidas de energía causadas por la ineficacia del sistema (entre otras, las pérdidas en las estaciones de bombeo, las pérdidas por fugas y las pérdidas por fricción). En resumen, la información proporcionada por estos tres indicadores puede contribuir significativamente al aumento de la eficiencia de los sistemas:

- la eficiencia real cuantifica el rendimiento real del sistema;
- la eficiencia energética objetivo ofrece una meta realista de hasta dónde podría llegar el sistema si se minimizasen las pérdidas
- el rendimiento ideal proporciona el máximo, e inalcanzable, nivel de eficiencia limitada por la energía topográfica relacionada con los desniveles topográficos de la red concreta que se está diagnosticando.

El indicador de eficiencia real proporciona información sobre el desempeño real del sistema, y se utiliza junto con la eficiencia ideal para comparar la situación actual con la mejor e ideal situación posible, por tanto la diferencia entre ambos rendimientos puede entenderse como el margen de mejora posible de la eficiencia de la red, ya que cuantifica las diferencias entre el sistema real y el sistema ideal. El nivel ideal de eficacia está limitado por la energía topográfica que depende de la topografía del sistema.

La aplicabilidad y utilidad de estos indicadores se demostrará con su aplicación a dos casos prácticos. El objetivo del primero es evaluar cómo se comportan estos indicadores frente a diferentes situaciones de un mismo sistema. El segundo caso práctico es un caso real de una red de riego en la que ya se ha aplicado el diagnóstico propuesto y se pueden evaluar sus resultados, una vez implementadas ciertas mejoras.

Una vez que se conoce el diagnóstico y si los márgenes de mejora son significativos, se puede considerar la segunda etapa de evaluación. Esta segunda fase consiste en analizar dónde se pierde la energía por medio de un sistema de auditorías (Cabrera et al., 2010). Estas auditorías permiten identificar con suficiente precisión las mayores ineficiencias del sistema (fugas, fricción, bombas, etc.) y por tanto hallar las mayores bolsas de ahorro. Con el análisis global completado, el foco se debe centrar en aquellos aspectos o soluciones que presenten la mejor relación coste –beneficio. Si la eficiencia objetivo y el diagnóstico apenas difieren, no es necesario llevar a cabo esta segunda etapa.

Por último, se debe explorar la posibilidad de recuperar parte de la energía topográfica del sistema (ésta se definirá más adelante). Esto se puede llevar a cabo ya sea mediante la instalación de bombas capaces de trabajar como turbinas, PAT, (Carravetta et al., 2012), o mediante la disipación de energía en válvulas reductoras de presión (PRV), esta última práctica está más extendida. Ambas funcionan reduciendo el exceso de presión para reducir las fugas de agua en la red y al mismo tiempo el estrés en las tuberías, aumentando con ello su vida útil.

El proceso de mejora presentado parte del diagnóstico (rendimiento ideal frente al rendimiento real actual) como una herramienta orientada a alcanzar la máxima, con las actuales tecnologías disponibles y teniendo en cuenta tanto los costes del agua como los de la energía.

3.2. Hipótesis de partida

La Figura 3-1 representa el perfil parcial de un PWTS con los puntos más característicos del sistema: la estación de bombeo, los nudos (h y l) de cota más alta y más baja (z_h y z_l), un nudo genérico j de cota z_j y el nudo de menor presión, llamado nudo crítico (c). Para establecer el balance de energías que permita la definición de las actuaciones y la evaluación de la eficiencia energética global del sistema, el nudo del sistema con la elevación más baja se elige como el origen para las energías gravitacionales (Cabrera et al., 2010). Entonces, $z_l = 0$.

3.2.1. Sistema ideal sin exceso de presión

Un sistema ideal es aquél en el que no hay pérdidas de carga por fricción o fugas (además se desprecia el término cinético de la energía, una práctica común en el análisis de redes a presión), por tanto en un sistema ideal se cumple la igualdad $h = c$, es decir el nudo crítico coincide con el nudo más alto. Se considera que no hay exceso de presión, ya que la presión en el punto crítico, p_{ci} es igual a la presión de servicio requerida p_o (véase la Figura 3-1). Entonces se cumple $p_{ci} = p_{hi} = p_o$. Cabe subrayar que en los casos reales, éste puede no ser el caso (ver Figura 3-3).

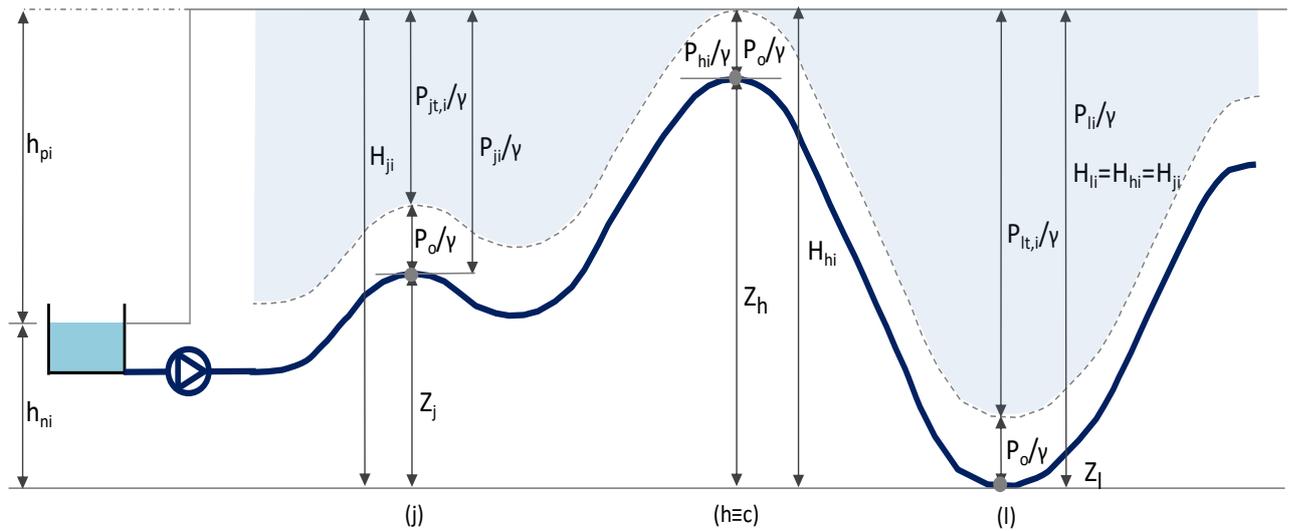


Figura 3-1: Sistema ideal de agua a presión (perfil sin exceso de energía).

La aplicación de la ecuación de continuidad para el sistema mostrado en la Figura 3-1 (y durante un período de tiempo de flujo constante dado) es sencilla. El volumen inyectado en total de la estación de bombeo V es igual (en ausencia de pérdidas de agua) a la suma de las demandas de todos los nudos de consumo ($V = \sum v_j$). Por otro lado la energía suministrada en ese período es:

$$E_{si} = \gamma V H_{hi} = \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{p_{ji}}{\gamma} \right] = \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{p_0}{\gamma} + (z_h - z_j) \right] = E_{uo} + E_{ti} \quad (3-1)$$

Dónde H_{hi} es la altura piezométrica en el nudo más alto (igual en todos los nudos en el caso ideal). Además:

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

$$E_{ti} = \gamma \sum v_j (z_h - z_j) = \gamma \sum v_j \frac{p_{jt,i}}{\gamma} \quad (3-2)$$

Siendo γ el peso específico del agua, E_{uo} la energía mínima requerida por los usuarios y E_{ti} la energía topográfica del sistema ideal. Este último término depende de las irregularidades del terreno, de ahí el nombre sugerido. En la Figura 3-1, el área sombreada es proporcional a E_{ti} (área entre la línea horizontal superior y la línea discontinua). En una red plana, E_{ti} sería cero. Esta energía también representa la cantidad de energía que, en teoría, se podría recuperar mediante la instalación de PATs en cualquier nudo de consumo que sería v_j (el volumen consumido en el nudo j en el período de tiempo considerado) por la presión topográfica disponible $p_{jt,i}$. En realidad, la recuperación de toda esta energía es imposible. En muchos

sistemas, este exceso cuando se considera desde la perspectiva energética de los usuarios se disipa con VRPs, como se describe en el punto 3.4 más adelante.

Cuando la presión en el punto crítico es la requerida (tal como se detalla en la Figura 3-1), la energía suministrada es la misma que la energía requerida mínima o energía de base E_{bi} , por lo tanto:

$$E_{si} = E_{uo} + E_{ti} = E_{bi} \quad (3-3)$$

En un sistema ideal, sin fricción y para cualquier período de tiempo, la línea piezométrica (HGL), suma de la altura natural (o gravitacional), h_{ni} y la altura de la bomba (o carga dinámica total, TDH), h_{pi} , es constante e igual a $H_{hi} = H_{ji} = H_{li}$. Sin embargo, la energía suministrada total no lo es, ya que es proporcional a la correspondiente demanda de agua en cada período.

En un sistema real, las pérdidas por fricción dependen del caudal y de las fugas, y como resultado la altura suministrada (por lo general la altura de la bomba) debe ajustarse para satisfacer la demanda de cada período. Esto implica que en la estación de bombeo debe existir un sistema de control (como un variador de frecuencia, VFD). Los cálculos de balances de energía se realizan de forma estática por lo que son válidos durante breves períodos de tiempo (Δt). Por lo tanto, durante periodos de tiempo más largos (horas, días, meses o años), la energía suministrada total debe ser calculada por integración (Cabrera et al., 2010) - es decir, en período extendido de simulación (Rossman, 2000) -. Alternativamente, esta energía se puede evaluar mediante la adición de la energía de la bomba (factura eléctrica) y la energía gravitacional o natural, la $\gamma z_n(V + \Delta V)$, este último término asumiendo un nivel de aspiración de agua, z_n , constante.

Por último, hay que destacar que el tipo de energía suministrada (h_{pi} o h_{ni}) es irrelevante para evaluar un balance de energía. Después de todo, cada kWh es el mismo desde una perspectiva física independientemente de su origen.

3.2.2. Sistema ideal con el exceso de presión

La única diferencia entre los sistemas de las Figura 3-1 y Figura 3-2 es que en el segundo caso, la energía suministrada (presión) es ahora superior al valor estrictamente necesario. La Figura 3-2 muestra un valor de presión en el punto crítico superior a la requerida, p_o (p_{ei} representa el exceso de presión). Para distinguir este caso de los términos anteriores, la presión y la altura están representadas con un asterisco.

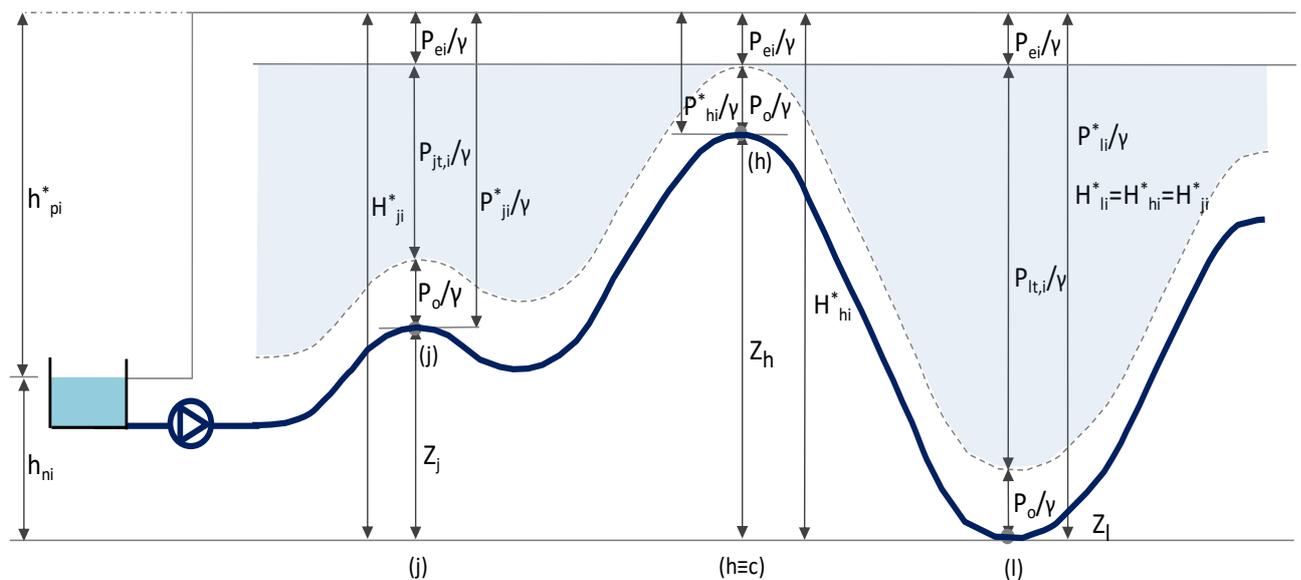


Figura 3-2: Sistema ideal de agua a presión (perfil con exceso de energía).

La presión más alta ($p_{hi}^* > p_o$) se debe al exceso de presión suministrada al sistema:

$$p_{ei} = p_{hi}^* - p_o, \quad E_{ei} = \gamma V \frac{p_{ei}}{\gamma} \quad (3-4)$$

En este caso la energía de entrada del sistema es:

$$E_{si} = E_{uo} + E_{ti} + E_{ei} \quad \text{con} \quad E_{si} > E_{bi} \quad (3-5)$$

E_{ti} es obviamente la misma que en el caso anterior (y proporcional al área sombreada), mientras que el exceso de energía E_{ei} (evitable en la mayoría de las veces) debe ser corregida con medidas operativas.

3.2.3. Sistema real

La energía que debe suministrarse, E_{uo} , permanece constante (Figura 3-3). Sin embargo, la energía topográfica del sistema E_{tr} (área sombreada) cambia, ya que está vinculada a la línea de carga hidráulica. La pérdida de energía, a la cual nos referiremos como energía global reducible, E_{rg} , es ahora diferente de cero, e incluye:

- Energía embebida en fugas (E_{rl}). Se trata de la energía que se pierde con el agua fugada. Además de la energía que realmente escapa a través de las pérdidas reales se deben incluir las pérdidas aparentes, como las debidas a la inexactitud de las mediciones, dando lugar a la aparente ineficiencia energética del sistema.
- Energía disipada por fricción (E_{rf}) en tuberías, válvulas y otros elementos.

- La pérdida de energía en las estaciones de bombeo (E_{rp}) debida a varias ineficiencias (pérdidas eléctricas, por fricción, en la bomba y operacionales).
- Otras pérdidas (E_{ro}), las debidas por ejemplo a las cámaras de rotura de presión y otros elementos que originen una caída de presión o una reducción puntual de ésta, que no estén contabilizadas en ninguna de las pérdidas anteriores.

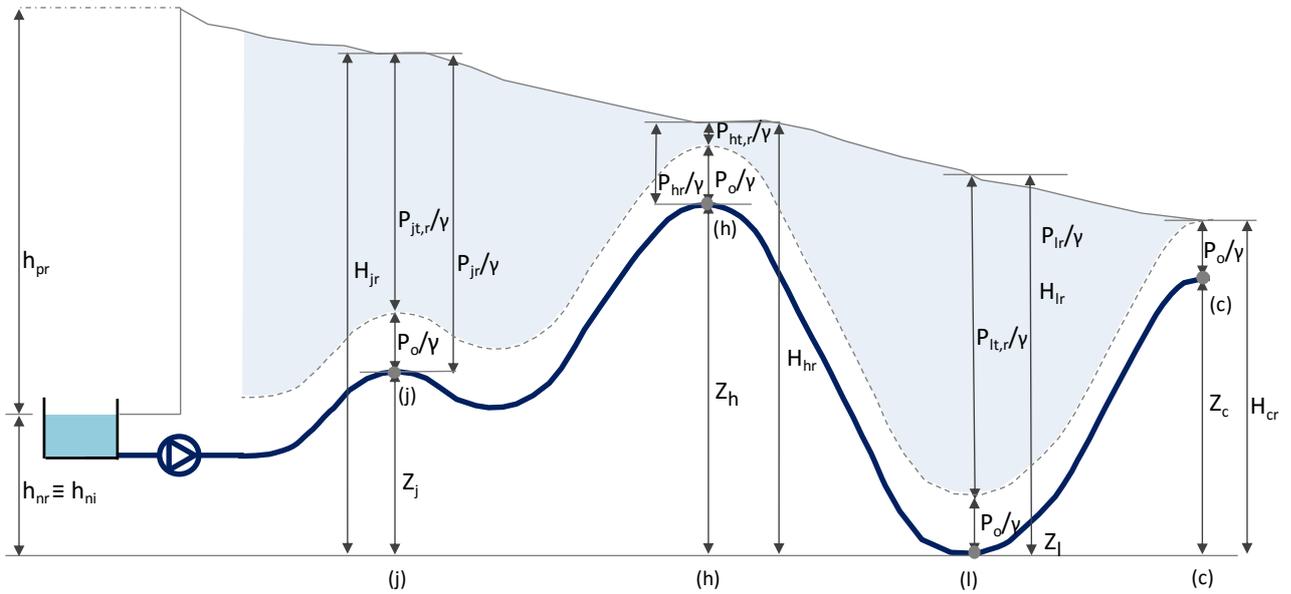


Figura 3-3: Sistema real de agua a presión (perfil sin el exceso de energía).

En resumen, la verdadera energía suministrada al sistema es:

$$E_{sr} = E_{uo} + E_{tr} + E_{rg} = (E_{uo} + E_{tr}) + (E_{rl} + E_{rf} + E_{rp} + E_{ro}) \quad (3-6)$$

Sin embargo, en un sistema real la energía mínima depende de su funcionamiento hidráulico y, por lo tanto, la definición de un término equivalente a E_{bi} no tiene sentido. En cualquier caso, este término representará el límite inferior que corresponde a un sistema real en el que las pérdidas tienden a cero. También debe tenerse en cuenta que la carga hidráulica ya no es una línea recta, porque las pérdidas de carga no son uniformes.

La ecuación (3-6) incluirá el excedente de energía si la presión en el punto crítico (el punto con la presión más baja en la red) excede la presión requerida. Entonces:

$$E_{sr} = E_{uo} + E_{tr} + E_{rg} + E_{er} = E_{uo} + E_{tr} + E_{rg} + \gamma(V + \Delta V) \left(\frac{p_{cr}^* - p_0}{\gamma} \right) \quad (3-7)$$

Siendo ΔV las pérdidas totales de agua en el sistema y E_{er} la energía de exceso (que puede ser importante, ya que todo el volumen de entrada al sistema está sujeto a este exceso de presión).

3.3. La eficiencia energética de un sistema de agua a presión

A partir de los conceptos y balances de energía presentados anteriormente, la eficiencia energética de un PWTS puede enunciarse como la relación entre la energía mínima requerida por los usuarios y la energía suministrada real. Para introducir estos conceptos de forma progresiva, se analiza en primer lugar el caso ideal.

3.3.1. La eficiencia energética de un sistema ideal (con y sin recuperación de energía)

La energía mínima requerida (tanto en sistemas reales como ideales), es E_{uo} , mientras que la energía suministrada en un sistema ideal es E_{si} . Si se recupera una parte de la energía topográfica incluida en E_{si} , la eficiencia energética de los PWTS mejorará. Por lo tanto, parece razonable definir dos relaciones diferentes en función de este hecho, η_{wi} (con) y η_{ai} (sin recuperación).

En un sistema ideal, en el que toda la energía topográfica se recuperara, la energía útil total sería la suma de E_{uo} y E_{ti} , mientras que el rendimiento ideal sería igual a:

$$\eta_{wi} = \frac{E_{uo} + E_{ti}}{E_{si}} = 1 - \frac{E_{ei}}{E_{si}} \quad (3-8)$$

En este caso la única ineficiencia posible puede ser debida a un exceso de energía suministrada (E_{ei} , ecuación (3-4)). En el caso que $E_{ei} = 0$, el rendimiento sería uno ($\eta_{wi} = 1$), un valor utópico obtenido a partir de las suposiciones hechas bajo condiciones ideales.

En realidad, E_{ti} será en la mayoría de los casos parcial o totalmente perdida, ya que la recuperación de energía sólo tiene sentido económico en contadas ocasiones. Por tanto, el escenario más común es aquel en el que no existe recuperación. En este caso, la eficiencia, η_{ai} del sistema es igual a:

$$\eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} = 1 - \frac{E_{ti}}{E_{si}} - \frac{E_{ei}}{E_{si}} = 1 - \theta_{ti} - \frac{E_{ei}}{E_{si}} \quad (3-9)$$

Si no se proporciona exceso de energía, entonces $E_{ei} = 0$, η_{ai} y θ_{ti} , son complementarios con una suma igual a 1. El parámetro topográfico representa la fracción de la energía suministrada que se pierde (suponiendo que no hay energía recuperada) debido al exceso de presión que debe suministrarse por la propia configuración del sistema con el objetivo de garantizar que los nudos que se encuentran en puntos más elevados obtengan la presión mínima requerida (presión topográfica, $p_{jt,i}$ véase la Figura 3-1). Si θ_{ti} se acerca a su límite superior (se trata de un sistema con una topografía irregular), se debe considerar entonces la instalación de VRPs para reducir los niveles de presión minimizando las fugas y reduciendo la tensión en las tuberías. En tales

casos, sin embargo, debería considerarse previamente la posibilidad de introducir cambios físicos en el sistema para reducir E_{ti} (dividiendo el sistema en diferentes sectores de presión, por ejemplo). En las redes planas ideales, θ_{ii} es cero y η_{wi} es irrelevante.

En general, estas actuaciones confirman un resultado obvio: cuando las pérdidas de energía son cero, la energía mínima suministrada es E_{bi} y la recuperación de toda la energía topográfica (E_{ti}) da como resultado un valor de rendimiento igual a 1 (ecuación (3-8)). Sin recuperación de energía topográfica y con $E_{ei} = 0$, el rendimiento máximo es uno menos la fracción de energía topográfica en el sistema (ecuación (3-9)).

3.3.2. La eficiencia energética de un sistema real

El análisis del sistema ideal permite establecer los valores máximos de los rendimientos. Los sistemas reales comparten con los ideales, el numerador de la eficiencia energética (E_{uo}), mientras que cambia el denominador para incluir las pérdidas de energía. Entonces (véase la ecuación (3-7)) se convierte en:

$$\eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{Sr}} = 1 - \frac{E_{tr}}{E_{Sr}} - \frac{E_{er}}{E_{Sr}} - \frac{E_{rg}}{E_{Sr}} = 1 - \theta_{tr} - \theta_{er} - \lambda_{rg} \quad (3-10)$$

Donde las energías y las pérdidas reducibles se expresan en base a la unidad (θ para las energías mientras λ para pérdidas). Si estas pérdidas se dividen en diferentes términos, la contribución de cada uno de ellos a las ineficiencias del sistema puede verse más clara a través de la expresión:

$$\eta_{ar} = 1 - (\theta_{tr} + \theta_{er} + \lambda_{rl} + \lambda_{rf} + \lambda_{rp} + \lambda_{ro}) \quad (3-11)$$

El análisis de la eficiencia de un sistema debe comenzar por el cálculo de η_{ar} . El numerador E_{uo} se conoce y el denominador E_{Sr} se calcula, tal como se ha mostrado anteriormente, a partir de la energía consumida por la bomba (por ejemplo, a través de la factura eléctrica), más la energía suministrada por gravedad (natural) que depende de las características del sistema, pero que únicamente requiere del conocimiento del volumen inyectado y de la cota de la fuente. El valor global de E_{Sr} se puede conocer, pero no sus componentes (segundo miembro de la ecuación (3-11)). La determinación del valor de cada uno de sus componentes requiere una auditoría del sistema, tal cual se verá en el capítulo siguiente. Una vez conocida la contribución de cada término se pueden seleccionar las estrategias más adecuadas para mejorar el rendimiento del sistema concreto.

3.3.3. La eficiencia energética objetivo

La diferencia entre el rendimiento ideal, y el rendimiento real, $\eta_{ai} - \eta_{ar}$, proporciona una primera estimación del margen de mejora del sistema. Dado que este diagnóstico se refiere a la situación óptima, es decir al mejor escenario posible, η_{ai} debería ser también calculado haciendo $E_{ei} = 0$, dado que es una energía innecesaria que debería tender siempre a cero. Por tanto, η_{ar} ya ha sido calculado y η_{ai} puede determinarse fácilmente a partir de las ecuaciones (3-1), (3-2) y (3-9).

Conocida la diferencia entre ambos rendimientos, el siguiente paso es determinar el potencial margen de mejora. O, en otras palabras, lo cerca que el segundo término puede llegar al primero a través de las medidas de mejora que posteriormente se deberán verificar que mantienen una relación coste-beneficio aceptable. Se introduce por tanto un nuevo valor de referencia ($\eta_{ar,o}$) que representa la eficiencia del sistema alcanzable o eficiencia objetivo, que verifica $\eta_{ai} > \eta_{ar,o} > \eta_{ar}$. Este nuevo rendimiento se puede estimar a partir de la ecuación (3-10) (asumiendo que $E_{er} = 0$), teniendo en cuenta que el numerador es una invariante del sistema mientras que el denominador está dado por la ecuación (3-6) (siendo la energía recuperada cero). Reducir al mínimo las pérdidas de energía implica reducir lo máximo posible los cuatro términos reducibles (E_{rl} , E_{rf} , E_{rp} y E_{ro}) y valorar qué fracción de la energía topográfica, E_{tr} , se puede aprovechar. Por lo tanto, el rendimiento objetivo se puede identificar por los cinco términos $E_{tr,o}$, $E_{rl,o}$, $E_{rf,o}$, $E_{rp,o}$ y $E_{ro,o}$. La suma de todos estos valores estimados, y teniendo en cuenta la ecuación (3-7), aproxima el valor de $E_{sr,o}$:

$$E_{sr,o} = (E_{uo} + E_{tr,o}) + E_{rg,o} = (E_{uo} + E_{tr,o}) + (E_{rl,o} + E_{rf,o} + E_{rp,o} + E_{ro,o}) \quad (3-12)$$

Cuantas más ineficiencias se eliminen del sistema, $E_{sr,o}$ se acercará más a E_{si} (ecuación (3-1)).

En la ecuación (3-12), el primer término E_{uo} es un invariante del sistema, mientras que la energía topográfica real objetivo ($E_{tr,o}$) depende del nuevo nivel de pérdidas y, por tanto, de las nuevas presiones calculadas para el escenario más eficiente:

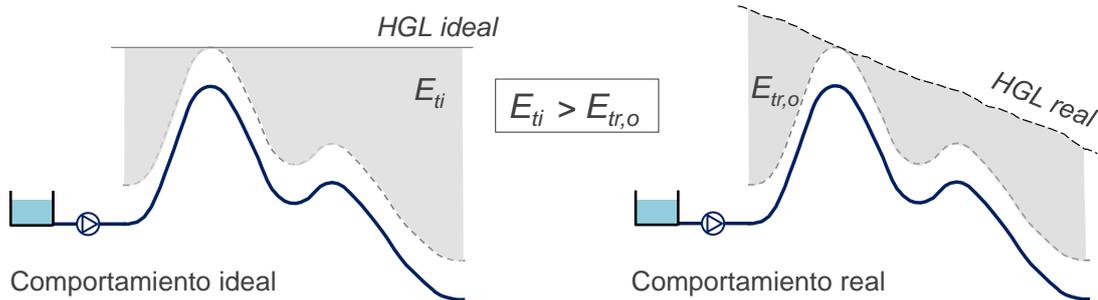
$$E_{tr,o} = \gamma \sum v_j \left[\frac{p_{jt,r}}{\gamma} \right]_o \quad (3-13)$$

Los valores de las presiones en la red se pueden determinar con un modelo matemático ajustado para el nuevo nivel de pérdidas, esto permitirá obtener las presiones complementarias ($p_{jt,r}$)_o. Por otro lado, E_{ti} puede calcularse directamente a partir de la ecuación (3-2). Ambos valores son muy similares, pudiéndose suponer:

$$E_{tr,o} - E_{ti} = \gamma \sum v_j \left(\left[\frac{p_{jt,r}}{\gamma} \right]_o - \frac{p_{ji,r}}{\gamma} \right) \rightarrow 0 \quad (3-14)$$

Esta diferencia tendrá un signo positivo o negativo dependiendo de la topografía del sistema, la situación del punto crítico y las condiciones de trabajo. En una red plana, la diferencia siempre será positiva. Con el fin de proporcionar la presión de servicio hasta el nudo más alejado (en este caso, el nudo crítico), la presión entregada en el punto de mayor altura tiene que ser mayor que la presión requerida ideal. En un sistema con un terreno irregular, no sólo dependerá de la topografía, sino también de la posición del punto crítico. En la Figura 3-4, el sistema a) tiene una diferencia negativa (ecuación (3-14)), mientras que para el sistema b) es positiva. En cualquier caso, estas diferencias siempre serán pequeñas. Por lo tanto, es razonable suponer $E_{tr,o} \approx E_{ti}$.

Sistema a)



Sistema b)

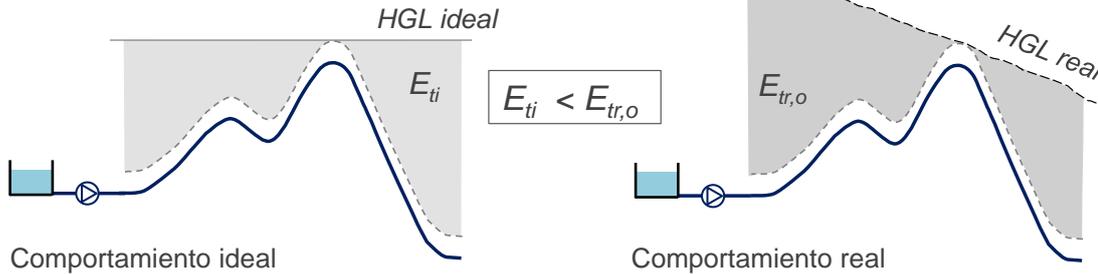


Figura 3-4: Comparación de E_{ti} y $E_{tr,o}$ dependiendo del perfil topográfico.

Teniendo todo esto en cuenta:

$$E_{sr,o} = (E_{uo} + E_{tr,o}) + E_{rg,o} \approx (E_{uo} + E_{ti}) + (E_{rl,o} + E_{rf,o} + E_{rp,o} + E_{ro,o}) \quad (3-15)$$

Y por lo tanto:

$$\eta_{ar,o} = \frac{E_{uo}}{E_{sr,o}} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} \frac{E_{si}}{E_{sr,o}} = \eta_{ai} \frac{E_{si}}{E_{sr,o}} \quad (3-16)$$

El rendimiento objetivo $\eta_{ar,o}$, depende del nivel objetivo de las pérdidas de energía. Lo que sigue son los criterios utilizados para evaluar los niveles aceptables de pérdidas de energía.

3.3.3.1. Energía reducible en fugas, $E_{rl,o}$

Se requiere una recuperación razonable del volumen total de las fugas ΔV_o , suma de las pérdidas Δv_{jo} en cada nudo durante un periodo de tiempo determinado. La pérdida de energía embebida en las fugas sería entonces:

$$E_{rl,o} = \gamma \sum \Delta v_{jo} \frac{p_{jr}}{\gamma} = \gamma \sum \Delta v_{jo} \left[\frac{p_o}{\gamma} + \frac{p_{jt,r}}{\gamma} \right] \approx \gamma \Delta V_o \left[\frac{p_o}{\gamma} + \left(z_h - \frac{z_h + z_l}{2} \right) \right] \quad (3-17)$$

Esta valoración implica concentrar todas las fugas en un nudo de presión media. Su valor puede ser estimado suponiendo un comportamiento ideal del sistema ($p_{jt,i}/\gamma = z_h - z_j$, véase la Figura 3-1). Esta aproximación es válida para valores de pérdidas de alrededor de 10% - 15%, pero para relaciones mayores podría introducir errores importantes en los cálculos. Para el propósito del análisis preliminar esto no es un problema; ya que se debe establecer un nivel objetivo de pérdidas menor de estos valores. En cualquier caso, el cálculo exacto de la energía embebida en fugas requiere una auditoría energética (Cabrera et al., 2010), ya que la ecuación (3-17) no tiene en cuenta, por ejemplo, las pérdidas adicionales por fricción en tuberías debido a que los caudales circulantes son más altos como resultado de que existen fugas. La ecuación (3-17) es adecuada, para la estimación de $E_{rl,o}$ y el cálculo posterior de $\eta_{ar,o}$.

3.3.3.2. Energía reducible debida a las pérdidas por fricción, $E_{rf,o}$

Esta es la estimación más incierta, especialmente en sistemas grandes con mallas, redundancias y flujos paralelos. Se requiere la asignación de una pérdida de energía promedio, relacionada con un recorrido medio supuesto del volumen total de agua movilizada. Este camino, que depende de la distribución de la demanda y de las fugas, es muy variable. Los puntos de consumo que están muy cerca de los puntos de suministro apenas tienen pérdidas. Por otro lado, los más alejados tienen pérdidas significativas. Por tanto se debe estimar un camino promedio L_{pm} , entre la estación de bombeo y los nudos de consumo, así como una pérdida de carga unitaria media J_m (m / km) para todas las tubería. Una vez más, ésta no es una estimación fácil. J_m es función del cuadrado de la velocidad de flujo (variable con el tiempo, con la demanda y las fugas).

Además, las pérdidas de carga localizadas $\Delta p_{rf,p}$ deben tenerse en cuenta. Es el caso de las pérdidas debidas a la presencia de filtros, válvulas, contadores, etc. Las pérdidas de carga en las válvulas reductoras de presión (VRPs) se considerarán más adelante.

Con estos supuestos, se tiene:

$$E_{rf,o} = \gamma(V + \Delta V_o) \left[(L_{pm})J_m + \frac{\Delta p_{rf,p}}{\gamma} \right] \quad (3-18)$$

3.3.3.3. Energía reducible en estaciones de bombeo, $E_{rp,o}$

Las estaciones de bombeo son generalmente responsables de un alto porcentaje de las pérdidas de energía. Sin embargo, la estimación de un valor razonable no es difícil (utilizando el rendimiento promedio η_{po} combinado del variador de frecuencia, motor, bomba, y el caudal y altura de la bomba correspondiente). Cuando la curva altura – caudal de la bomba está disponible, estas pérdidas son fáciles de calcular. De lo contrario, se pueden estimar utilizando la ecuación (3-19), en el que L_{pc} es la distancia entre la estación de bombeo y el punto crítico mientras z_n representa el nivel de aspiración de la bomba.

$$\begin{aligned} E_{rp,o} &= \gamma(V + \Delta V_o) h_{pr} \left(\frac{1}{\eta_{po}} - 1 \right) \\ &= \gamma(V + \Delta V_o) \left[L_{pc} J_m + \frac{\Delta p_{rf,p}}{\gamma} + \frac{p_o}{\gamma} + (z_c - z_n) \right] \left(\frac{1}{\eta_{po}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (3-19)$$

3.3.3.4. Otras pérdidas de energía reducibles, $E_{ro,o}$

Puede darse otro tipo de pérdidas en un PWTS. Por ejemplo, los tanques de rotura de presión (en perfiles muy irregulares se requieren cámaras para evitar depresiones en los puntos altos de las tuberías), pueden ser responsables de pérdidas importantes de energía, pero al igual que el exceso de energía inyectada al sistema, E_{er} , se deberían evitar. Otros elementos de rotura de carga, por ejemplo aljibes domésticos, son igualmente inconvenientes: en tal caso, el valor de la energía perdida (E_{ro}) se puede calcular multiplicando el volumen despresurizado por la presión perdida en el nudo de la entrega. En ausencia de ineficiencias:

$$E_{ro,o} = 0 \quad (3-20)$$

Estas estimaciones permiten calcular el valor del rendimiento de referencia u objetivo $\eta_{ar,o}$ (ecuaciones (3-15) y (3-16)).

3.4. Disipación y recuperación de energía (con VRP o PAT) en un PWTS

La línea de presión topográfica ($p_{jt,i}$ y $p_{jt,r}$) creada por las irregularidades del terreno es un factor inevitable (Figura 3-1 y Figura 3-3) que conduce a presiones más elevadas de las estrictamente necesarias en el sistema. Sin embargo, otros excedentes de presión, tales como p_{ei} y p_{er} , pueden ser evitables en la mayoría de los casos.

El exceso de presión en la red puede producir un considerable nivel de fugas (Giustolisi et al., 2008). Para reducirlas, normalmente se instalan VRPs tratando de limitar la presión en los nudos de consumo a un valor de servicio p_o . En este caso, parte de E_{tr} se disipa en las válvulas. Sin

embargo, a pesar de que la energía se disipa en las VRPs, la energía total demandada por el sistema disminuye ya que la cantidad de fugas es menor, lo que reduce el volumen consumido, la cantidad de caudal y las pérdidas por fricción. En resumen, E_{sr} disminuye porque disminuye E_{rl} y E_{rf} . Por otro lado, la energía disipada en la VRP es a expensas de E_{tr} (siempre que no exista exceso de presión) que, como se ha visto antes en la ecuación (3-14) y la Figura 3-4, se puede asumir constante siempre que la presión requerida p_o sea satisfecha. Por esta razón, como se comprueba en la Figura 3-5, estas pérdidas en la VRP no afectarán directamente a $\eta_{ar,o}$, simplemente cambian η_{wr} .

Sin embargo, desde un punto de vista energético, es mejor instalar turbinas o bombas trabajando como turbinas (PATs) para recuperar la energía, que disiparla con VRPs. Una primera aproximación para identificar tuberías candidatas en la que instalar este tipo de elementos de recuperación sería multiplicar el caudal medio en la línea k , \bar{q}_k , por el exceso de presión media en el nudo final j , $\overline{(p_{jr} - p_o)}$. Aquellas tuberías que verifiquen $\bar{q}_k \overline{(p_{jr} - p_o)} > P_{min}$ serían seleccionadas como candidatas potenciales para equiparlas con una estación de recuperación. La energía recuperada (parte de la energía topográfica inicial) se denomina E_{yr} (ver Figura 3-5).

La siguiente etapa consiste en decidir el sistema de regulación (Carravetta et al., 2013) que permita recuperar la máxima cantidad de energía sin comprometer la presión de servicio p_o en los nudos de consumo aguas abajo de la instalación. Sin embargo, en la práctica, sólo una pequeña parte de E_{tr} es recuperable.

El uso de turbinas en lugar de válvulas reductoras de presión (VRP) ha ganado mucha popularidad en los últimos años (Fontana et al., 2012) y debe convertirse, en un futuro, en una opción aún más viable. El objetivo es claro, implementar estaciones de recuperación de energía que mejoren la eficiencia energética global del sistema. En este caso, η_{wr} debe utilizarse como medida de rendimiento en lugar de η_{ar} .

3.5. La mejora de la eficiencia de un PWTS

La Figura 3-5, que ya se presentó en el Capítulo 1 y que se irá detallando en sucesivos capítulos, sintetiza el proceso de mejora de la eficiencia energética en un PWTS. Este diagrama de flujo tiene dos columnas o caminos que, en cierta medida, se desacoplan y al mismo tiempo son complementarios.

En uno de los caminos, la eficiencia real del sistema η_{ar} se estima y se compara con el valor de rendimiento objetivo $\eta_{ar,o}$. Al mismo tiempo, se calcula θ_{ii} . Si este valor es relevante (es decir $\theta_{ii} > 0,2$), entonces se debe contemplar la posibilidad de reducirlo a través, por ejemplo, de la subdivisión del sistema. Esta estrategia ha sido aplicada a uno de los casos de estudio que se presentan posteriormente, una red de riego ramificada. De hecho, una de las principales mejoras

es la subdivisión del sistema en tres zonas: una con elevación media, otra más alta y otra inferior, lo que implica la reducción de la θ_{ti} global.

Si el análisis económico de la propuesta no permite reducir el valor θ_{ti} del sistema (el ahorro de energía no es suficiente para justificar la inversión necesaria) y si su valor es lo suficientemente relevante ($\theta_{ti} > 0,2$), debe ser estudiada la posibilidad de implementar en el sistema ambas medidas VRPs y PATs. Para evaluar qué solución es mejor se requiere un análisis de coste-beneficio. En el caso de instalar alguna turbina con el objetivo de recuperar energía finalmente, la eficiencia del sistema se evaluará con η_{wr} , que tiene en cuenta la energía recuperada.

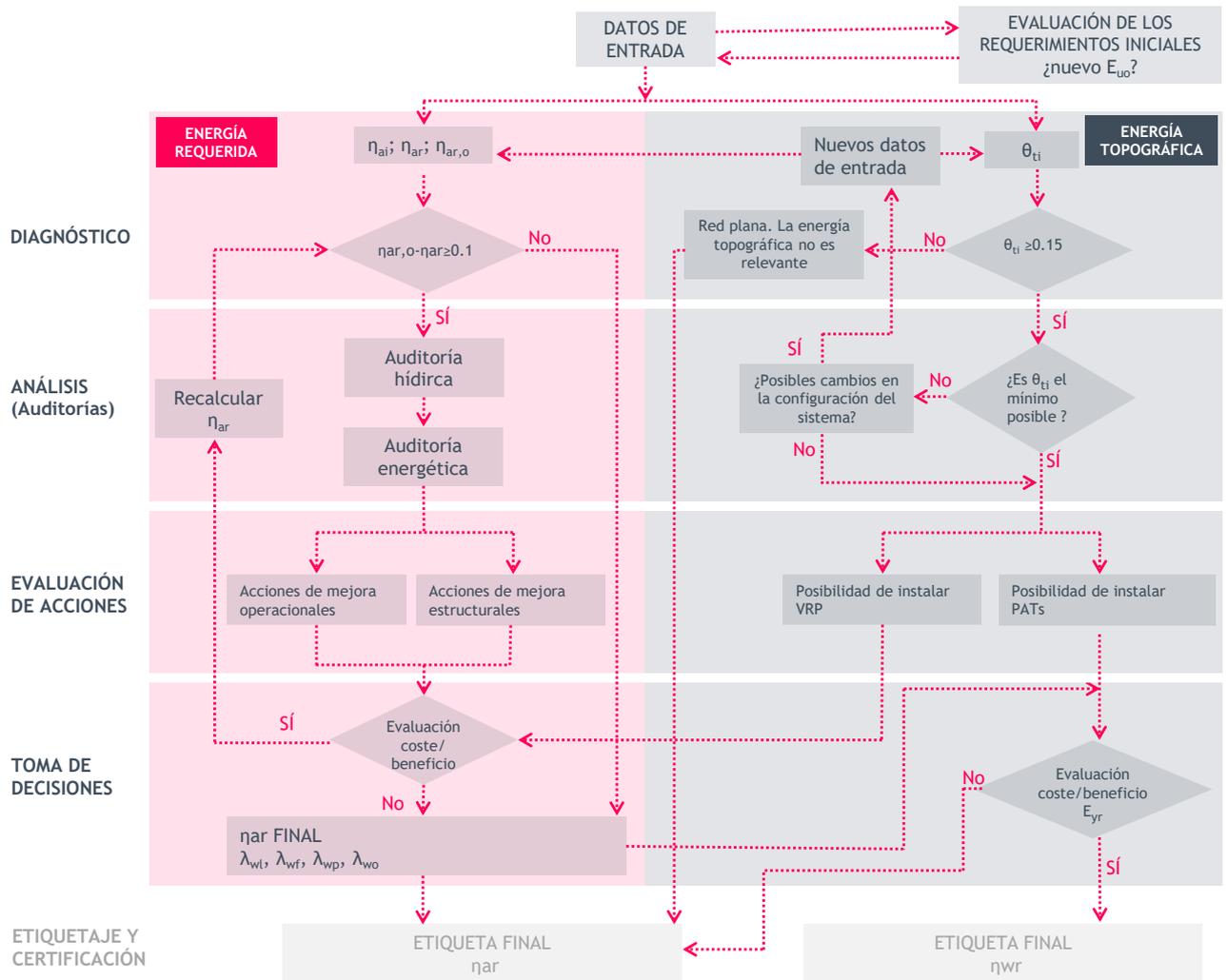


Figura 3-5: Diagrama de flujo para mejorar la eficiencia en PWTS. Diagnóstico

3.6. Síntesis del diagnóstico

La evaluación de la eficiencia del sistema se basa en tres indicadores η_{ai} (ecuación (3-9)), η_{ar} (ecuación (3-10)) y $\eta_{ar,o}$ (ecuación (3-16)), que se definen a partir de cuatro términos E_{Si}

(ecuación (3-1)), E_{uo} (ecuación (3-2)), E_{sr} - suma de la energía consumida por la bomba (factura eléctrica) y la energía gravitacional suministrada al sistema - y $E_{sr,o}$ (ecuación (3-15)). Todos ellos se refieren a un volumen de control (VC) previamente seleccionado e integrados en períodos significativos de tiempo para hacer más fácil el cálculo de E_{sr} (por ejemplo, un mes, un trimestre o un año). Cualquier VC puede ser considerado siempre que los flujos de masa y energía que pasan a través de la superficie límite (superficie de control, SC) sean conocidos en el período de tiempo especificado. Esto proporciona la evaluación global de la energía para el sistema en el tiempo y el espacio.

El punto más débil de este análisis es la estimación de la energía objetivo $E_{sr,o}$ (y, por lo tanto, $\eta_{ar,o}$), pero en general tiene poca relevancia para todo el proceso ya que el valor ($\eta_{ar,o} - \eta_{ar}$) sólo se utiliza para activar el siguiente paso (la fase de análisis con las auditorías correspondientes, ver la Figura 3-5). Desde un punto de vista de la ingeniería, las estimaciones subjetivas y las simplificaciones necesarias para determinar $E_{sr,o}$ tienen poca influencia sobre los resultados reales de los análisis. El factor clave en este análisis es el orden de magnitud del término $\eta_{ar,o} - \eta_{ar}$, un valor que, en términos absolutos, no es excesivamente sensible a las hipótesis formuladas. En cualquier caso, estos términos se pueden estimar con precisión a partir de la auditoría energética (Cabrera et al., 2010) que se explica en detalle en el siguiente capítulo, y por lo tanto, este valor se puede determinar de forma más exacta durante la segunda fase.

Esta evaluación global se basa en valores medios y no puede reflejar cualquier evolución temporal de las pérdidas del sistema, ni la influencia de su ubicación. Esto debe tenerse en cuenta, sobre todo si durante el período considerado, las bombas están trabajando bajo condiciones de flujo variable. En tales casos, mantener el rendimiento máximo en las bombas en todo momento se convierte en una tarea difícil; una cuestión que, por su relevancia, ha estado en la agenda de investigación durante muchos años (Ormsbee et al, 1989; Walski, 1993; Ulanicki et al, 2007; Papa et al, 2013).

En resumen, la evaluación propuesta proporciona una indicación global de la eficiencia del sistema, pero sólo con ligera información sobre dónde y cómo se pierde la energía. Las ineficiencias estructurales (debido a diseños inadecuados), así como las derivadas de las decisiones operativas se incluyen en η_{ar} .

Esta simple evaluación, que se puede realizar con una hoja de cálculo, identificará la existencia o no de un problema energético en un sistema. Para llevar a cabo la evaluación:

- Se debe definir un VC del sistema, pero el mismo enfoque podría ser utilizado para analizar subsistemas (a través de VC desagregados). En tal caso, estos subsistemas o Distritos Energéticos, DEA, pueden jugar (en términos energéticos) un papel similar al DMA (Distritos hidrométricos).
- Los flujos de agua y de la energía que entra en el VC deben ser conocidos.
- El agua suministrada a los usuarios y que abandona el VC debe ser conocida.

- La elevación de los nudos del sistema debe ser conocida y la presión de servicio, p_o , definida. En la práctica, este estándar de presión es realmente conocido por cada gestor del sistema.
- En el caso de no definir ninguna presión de servicio, p_o se debe definir como la presión mínima en el nudo crítico.
- El valor cero para la elevación referencia se le asigna al nudo más bajo ($z_l = 0$). De esta manera los términos de energía potencial se referenciarán a este nudo más bajo.
- El consumo de energía de eje (energía consumida por las bombas) para el sistema debe ser conocida (factura eléctrica), o poderse calcular (curvas de comportamiento de las bombas y punto de operación).

A partir de estos datos, se puede calcular η_{ai} y η_{ar} mientras que $\eta_{ar,o}$ se puede establecer como valor objetivo o de referencia. El uso de ciertas simplificaciones para establecer el rendimiento objetivo genera incertidumbre, sin embargo aunque este valor no pueda considerarse en la fase de diagnóstico como una referencia fija por el desconocimiento que entraña, sí proporciona un objetivo lo suficientemente cercano a la realidad como para generar un cambio y promover la eficiencia. Un ejemplo similar se puede encontrar en el ámbito de las pérdidas de agua, donde el IFE, Índice de Fugas Estructural (o ILI, de sus siglas en inglés), proporciona una medida que lejos de ser precisa ha cambiado la escena internacional para ayudar a promover la reducción de fugas (Lambert et al., 1999).

3.7. La herramienta EAGLE

De cara a facilitar la elaboración del diagnóstico energético de una red a presión por parte de los técnicos de una empresa de agua, se ha desarrollado la herramienta EAGLE (Energy Assessment of Global Pressurized Systems), una completa hoja de cálculo Excel automatizada que, con unos pocos datos, permite diagnosticar las condiciones energéticas en las que trabaja un sistema de transporte de agua a presión, fundamentada en los conceptos expuestos en el presente capítulo. El objetivo de esta herramienta es ofrecer un diagnóstico del estado de la red desde el punto de vista energético, pero haciéndolo de la manera más sencilla y directa posible, tratando en todo momento de solicitar la menor cantidad de datos y aportando tanto una visión global del estado de la red como de sus potenciales puntos de ahorro.

Se trata pues, de una herramienta de libre acceso y relativamente sencilla de utilizar que aporta un valor del margen de mejora entre lo que ocurre en la red y la mejor situación posible, por tanto se adapta a las características de cada sistema. Si el sistema concreto que se está analizando requiere, por sus características (topografía, demanda de agua concreta para el cultivo, deficiencia en el punto de suministro), de un aporte elevado de energía, esto debe ser tenido en cuenta, y no se debe valorar de igual manera que otra que por sus características sea mucho menos demandante de energía. Es por esto que la herramienta permite analizar cada sistema

concreto a partir de los datos básicos introducidos por el usuario. Además ésta posibilita al usuario obtener un valor del rendimiento objetivo a partir de las mejoras sobre las fugas, el rendimiento de los grupos de presión y la fricción que pueda acometer en su sistema. Junto con el rendimiento objetivo ofrece una valoración económica del ahorro de energía supuesto. En el Anexo I se detalla el funcionamiento y utilidad de la herramienta.

3.8. Casos de estudio

Para ilustrar el proceso de diagnóstico presentado y la interpretación de los distintos resultados obtenidos, a continuación se aplica el mismo a dos casos de estudio. A lo largo de ambos se destacan las distintas particularidades de cálculo de cada término, así como la comparación de diferentes resultados dependiendo de las posibles configuraciones del sistema.

Para ilustrar mejor el diagnóstico energético y su potencial estos dos ejemplos se desarrollan en el anexo junto con el manual de la herramienta EAGLE de manera más simplificada centrados en lo que el usuario de este tipo de herramienta requiere conocer para comprender cuál es el resultado del diagnóstico energético de su sistema y las valoraciones que éste le ofrece.

El primero de los casos prácticos, consiste en una red de abastecimiento de agua en alta. El objetivo de este primer caso es detallar el proceso de cálculo del diagnóstico, con el propósito de evaluar cómo se comportan las energías y los rendimientos ante diferentes configuraciones del sistema. El segundo caso consiste en una red de riego real, sobre la que ya se han implementado mejoras, de manera que se han podido verificar las hipótesis planteadas a lo largo del proceso de mejora propuesto. En este segundo caso, se hace hincapié en el porcentaje de energía topográfica, y cómo varía éste frente a diferentes disposiciones. En el Capítulo 6, sobre mejoras concretas para el aumento de la eficiencia energética de un PWTS, se volverá a recurrir a este ejemplo.

3.8.1. Caso práctico 1. Evaluación de los diferentes términos energéticos

Se presenta a continuación un caso real sobre el que han realizado varias simplificaciones. Una vez evaluado el escenario inicial, se plantean diferentes escenarios para contemplar cómo varían las energías ideales planteadas y sus respectivos rendimientos. Igualmente, se plantea un análisis de sensibilidad suponiendo diferentes grados de conocimiento o disponibilidad de datos del sistema.

Por un lado, dado que los balances hídricos suelen coincidir con periodos de lectura de los contadores (mensual, bimensual, trimestral o anual) y por otro, el hecho que se requiera el conocimiento de las facturas eléctricas de los abastecimientos que también suelen contemplar estos periodos, los análisis que a continuación se detallan se van a plantear en estos términos de tiempo.

3.8.1.1. Planteamiento del caso

Se trata de la red en alta de un conjunto de poblaciones abastecidas desde el mismo punto de captación. En el siguiente esquema y en la Tabla 3-1, se representa con un nudo de consumo cada una de las poblaciones abastecidas.

En este punto del diagnóstico, las longitudes y características de las líneas no se conocen. No hay que perder de vista que el objetivo del diagnóstico previo es poder realizarlo con la mínima información posible del abastecimiento. En la fase de auditorías, en el caso que se acometa, sí se precisan más detalles del abastecimiento.

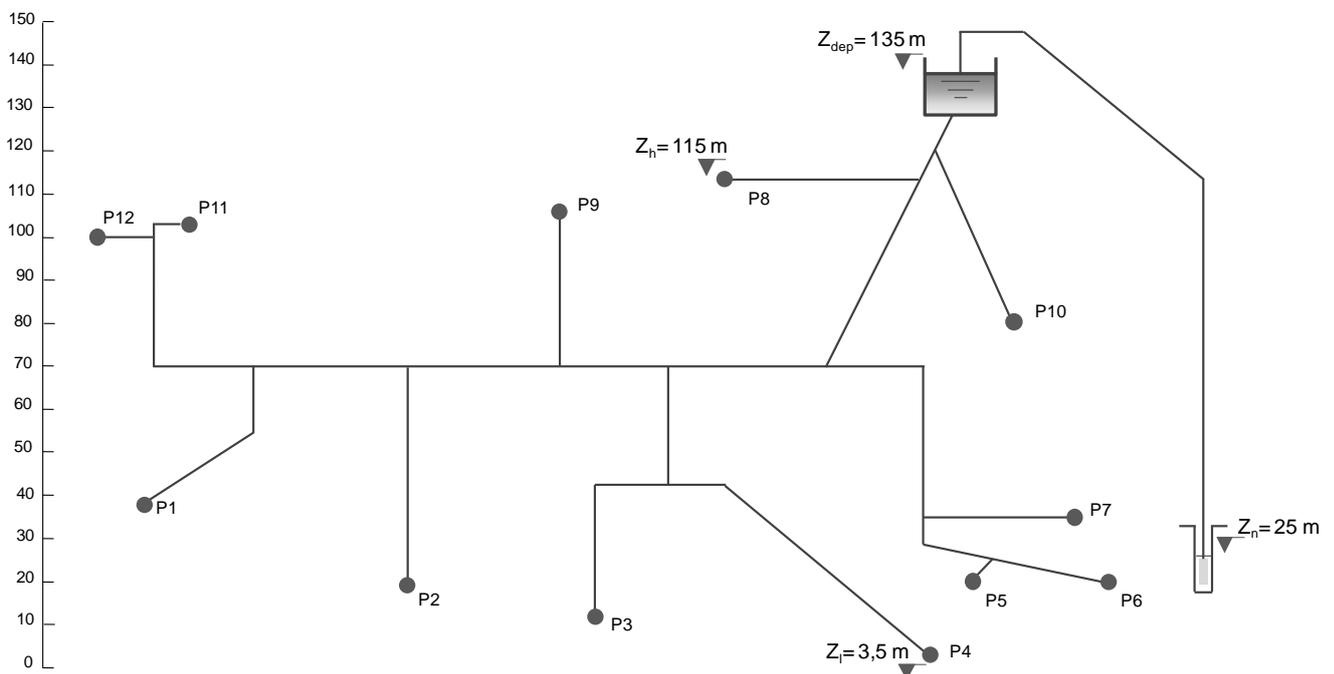


Figura 3-6: Esquema del sistema en alta, Caso 1.

El sistema consta de 12 nudos de consumo (poblaciones) y un pozo con el correspondiente grupo de presión que eleva el agua hasta un depósito de regulación en cabecera desde el que se abastece todo el sistema. Todo el consumo de cada una de las poblaciones se supone concentrado en un único punto a la cota de media del municipio. En el esquema anterior, Figura 3-6, se indican numéricamente la cota del nudo más alto, más bajo (que se convierte en la cota de referencia), la cota de aspiración de la bomba, y la cota media de la lámina de agua en el depósito de regulación. En la Tabla 3-1 se muestran las elevaciones para todos los nudos y la demanda base de cada nudo en $\text{m}^3/\text{año}$. Esta demanda base se asocia al volumen anual entregado a cada una de las poblaciones, a efectos del sistema en alta, se corresponde con volumen consumido por cada nudo, es decir este valor asume las pérdidas de agua en la red de cada municipio, pero no las pérdidas de agua en el sistema general de abastecimiento.

Tabla 3-1: Características de los nudos de la red

Nudo	Cota (m)	Demanda base (m ³ /año)	Nudo	Cota (m)	Demanda base (m ³ /año)
Población 1	37,5	589.024	Población 8	115	93.507
Población 2	20	635.788	Población 9	106	20.998
Población 3	12	148.497	Población 10	80	73.054
Población 4	3,5	235.106	Población 11	103	75.904
Población 5	25	219.202	Población 12	100	104.146
Población 6	20	226.000	Embalse	25	-
Población 7	35	363.828	Depósito	135	-

Por otro lado, se debe conocer el volumen inyectado en el sistema, para poder determinar el agua fugada, que en este caso es de 4.991.910 m³/año y la energía consumida por las bombas, que puede ser obtenida directamente de las correspondientes facturas eléctricas (3.306.607 kWh/año). Por último, la presión mínima de servicio, p_o , es de 20 mca. Además de este valor, se analizan otras presiones de entrega con el objetivo de poder evaluar distintos escenarios, con la intención de comprender mejor el concepto planteado de Energía de exceso.

Por tanto los datos básicos y mínimos que se requieren para realizar el diagnóstico son:

Tabla 3-2: Características básicas (mínimas conocidas) del sistema.

Cota mínima	z_l	3,5 m
Cota máxima consumo	z_h	115 m
Cota aspiración de la bomba	z_n	25 m
Cota del depósito	z_{dep}	135 m
Volumen entregado a los usuarios	V	2.782.054 m ³ /año
Volumen inyectado	V + ΔV	4.991.910 m ³ /año
Energía consumida por la bomba	$E_{sr,p}$	3.306.607 kWh/año
Presión mínima de servicio	$\frac{p_o}{\gamma}$	20 mca

3.8.1.2. Cálculo de energías y rendimientos

Continuando con el mismo desarrollo planteado en el proceso de diagnóstico, el primer paso es calcular las energías y rendimientos ideales:

$$E_{uo} = \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{p_0}{\gamma} \right] = \gamma \sum_1^{12} v_j [(z_j - 3,5) + 20] = 389.751,4 \text{ kWh/año} \quad (3-21)$$

$$E_{ti} = \gamma \sum v_j (z_h - z_j) = \gamma \sum_1^{12} v_j (115 - z_j) = 607.162,9 \text{ kWh/año} \quad (3-22)$$

$$\begin{aligned} E_{si} &= \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{p_0}{\gamma} + (z_h - z_j) \right] = E_{uo} + E_{ti} \\ &= \gamma \sum_1^{12} v_j [(z_j - 3,5) + 20 + (115 - z_j)] = 996.914 \text{ kWh/año} \end{aligned} \quad (3-23)$$

Para este primer escenario, si la presión mínima de servicio p_o , es 20 mca, la energía de exceso ideal es cero, pues $z_h=115$ m, y $p_o = 20$ mca, por lo que la altura ideal a suministrar (Figura 3-6) es $115+20 = 135$ mca, que coincide con la altura del depósito. En los siguientes escenarios se plantean situaciones diferentes.

A este respecto cabe destacar un par de cuestiones, en el caso ideal en el que no existen pérdidas de ningún tipo, la altura del depósito, y por tanto la altura disponible, puede coincidir con la altura mínima (cota del nudo más alto más presión mínima de servicio). No es así en el caso real. Con la existencia de pérdidas por fricción, por pequeñas que éstas sean, es indispensable que la altura del depósito sea mayor que la altura mínima, pues de no ser así no se podría garantizar la presión de servicio en el nudo más desfavorable. Por tanto, el caso ideal puede no contemplar exceso de energía, pero en la realidad esta situación es imposible, siempre deberá existir exceso de presión en cabecera por encima de la mínima que requiere la red. Pero no hay que perder de vista que las energías e indicadores ideales son inalcanzables.

A lo largo de este primer escenario del caso práctico, se supone una altura del depósito igual a la altura mínima requerida con la intención de evaluar las energías e indicadores presentados sin la existencia de energía de exceso ideal. Esto implica, que en el estudio del caso real se debería contemplar la insuficiencia en el cumplimiento de los estándares de servicio, pues previsiblemente el nudo más alto no alcanzará la presión de servicio. No es el objetivo concreto de este ejemplo profundizar en el estudio del caso real. Por otro lado, en el segundo escenario de este mismo caso práctico, se eleva el depósito de regulación para incluir el exceso de energía ideal. Por este motivo es interesante plantear este primer escenario sin exceso ideal de presión para poder compararlo con el caso en que sí exista exceso de energía ideal.

Por tanto, el rendimiento ideal del sistema es:

$$\eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} = \frac{389.751,4}{996.914} = 0,39 \quad (3-24)$$

Este valor, aunque no es demasiado alto, es inalcanzable, pues está calculado sobre el sistema ideal, es decir sin la existencia de ningún tipo de pérdidas. El sistema real, debe aspirar a este valor, que aun siendo inalcanzable fija el máximo rendimiento del sistema. La razón de que este valor sea tan bajo reside en el elevado valor de su complementario, es decir, el índice que determina el porcentaje de energía topográfica ideal, θ_{ti} :

$$\theta_{ti} = \frac{E_{ti}}{E_{si}} = \frac{607.162,9}{996.914} = 0,61 \quad (3-25)$$

En la siguiente figura, Figura 3-7, la línea inferior representaría el perfil longitudinal simplificado del sistema y la línea superior paralela a él, la altura mínima que se debe entregar a cada uno de los usuarios consecuencia de su cota (línea verde) y la presión mínima de servicio (valor fijo de 20 mca). El área sombreada más oscura representa la energía mínima requerida por los usuarios, E_{uo} ; mientras que el área sombreada más clara representa la energía topográfica ideal, E_{ti} . En este caso, $E_{ti} > E_{uo}$, y cuanto mayor sea esta diferencia menor será el valor del rendimiento ideal y por consiguiente mayor el valor de θ_{ti} .

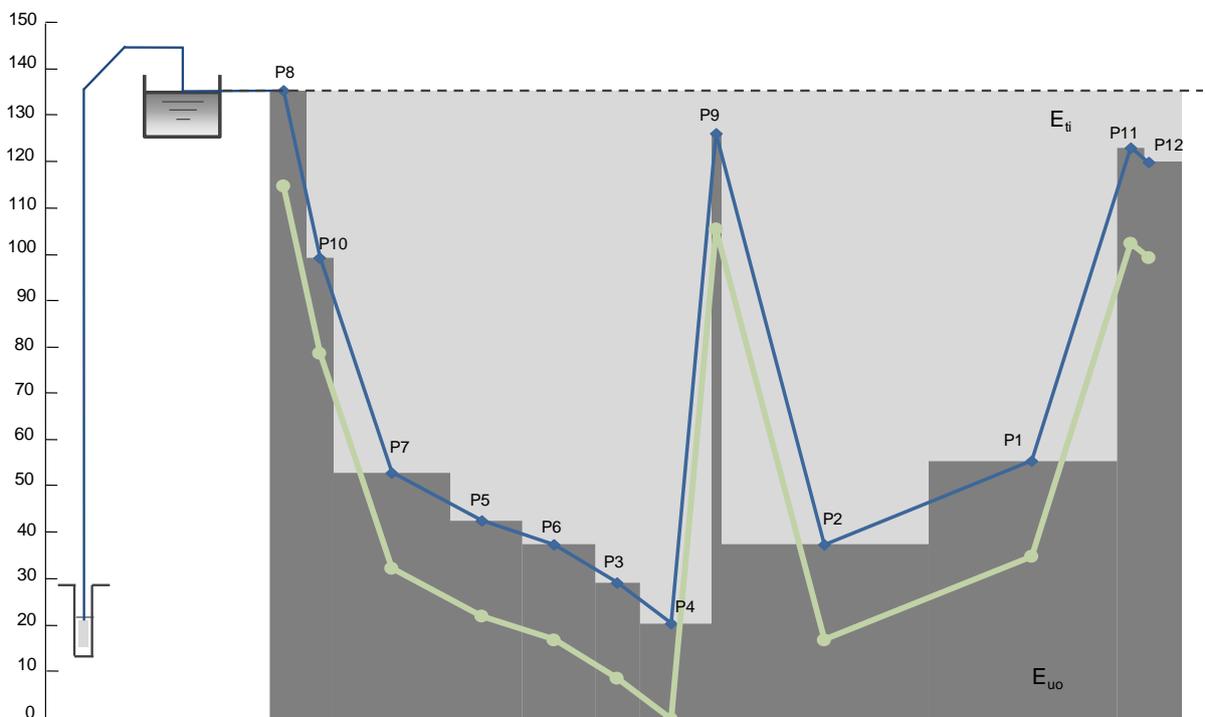


Figura 3-7: Esquema simplificado del perfil del sistema.

En la simplificación que se ha realizado del perfil longitudinal de la conducción, para poder calcular las áreas proporcionalmente a las energías calculadas, el eje x, es proporcional al volumen suministrado en cada uno de los nudos. En el sistema ideal, tal como se ha comentado, el nudo crítico siempre será el nudo más alto, independientemente de la longitud del recorrido crítico, pues no existen pérdidas de fricción, por tanto el nudo con menor presión es el nudo con mayor cota. Por este motivo, el eje x de la gráfica anterior representa los volúmenes consumidos y no la longitud de la conducción, que por otro lado es desconocida. De este modo, las áreas obtenidas son proporcionales a las energías, pues dependen del volumen consumido (eje x) y de la altura aportada (eje y).

Se calculan a continuación las energías y rendimientos reales, con el objetivo de comparar sus valores con los ideales.

La energía mínima requerida por los usuarios es la misma que en el caso del sistema ideal, condición indispensable, por otro lado, para poder comparar ambos rendimientos. La energía real suministrada en este caso, será la consumida por las bombas, más la energía natural aportada, estando ésta disponible por la propia elevación de la fuente.

Luego,

$$E_{sr,p} = 3.306.670 \text{ kWh/año (facturas eléctricas)}$$

$$E_{sr,n} = \gamma (V + \Delta V) (z_n - z_l) = \gamma \cdot 4.991.910 \cdot (25 - 3,5) = 292.463,5 \text{ kWh/año} \quad (3-26)$$

$$E_{sr} = E_{sr,p} + E_{sr,n} = 3.599.070,5 \text{ kWh/año}$$

Lógicamente en el sistema real existen fugas y pérdidas (tanto en la bomba como por fricción y otros elementos). Todas las pérdidas, aunque a priori se desconoce su discriminación, están contempladas en el término de energía real, pues la energía que la bomba debe aportar se emplea tanto para suministrar a los usuarios como para vencer las pérdidas, independientemente de donde estén o a que se deban. No es en este punto, donde hay que calcularlas o estimarlas, sino una vez que se han comparado los rendimientos y se ha verificado que el sistema es mejorable, es ahí donde primero se pueden estimar las causas de estas pérdidas y luego, acometer la auditoría energética para poder cuantificarlas con el objetivo de reducirlas.

El rendimiento real del sistema será:

$$\eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{sr}} = \frac{389.751,4}{3.559.070,5} = 0,11 \quad (3-27)$$

Esta es la primera comparación que debe ser realizada. El rendimiento real del sistema con respecto al rendimiento ideal de éste. Si ambos valores son cercanos, aquí acaba el proceso no sólo de diagnóstico sino de análisis, es difícil mejorar algo que roza el valor ideal, teniendo en cuenta que el rendimiento ideal es un máximo inalcanzable.

Ahora bien, en este caso el rendimiento real del sistema es 0,11, mientras que el ideal es más del triple, 0,39. Cabe destacar que para la obtención de ambos rendimientos no se requiere el modelo, y los datos mínimos necesarios son prácticamente los datos mínimos que se deben conocer en cualquier abastecimiento. En el caso de disponer todavía de menos información, también es posible realizar este diagnóstico suponiendo toda la demanda en un nudo con cota promedio. Para lo cual, los únicos datos que se requieren son el volumen total (consumido e inyectado), la energía consumida por la bomba (facturas eléctricas) y las cotas de los nudos más alto y más bajo. En el caso de suponer todo el consumo en un único punto promedio, los resultados obtenidos serían:

Tabla 3-3: Comparación de resultados en función del grado de detalle de los datos.

	Sistema 1	Sistema 2 (simplificado)
E_{uo}	389.751,4 kWh/año	574.887,4 kWh/año
E_{ti}	607.162,9 kWh/año	423.101,9 kWh/año
E_{si}	996.914 kWh/año	997.989,3 kWh/año
η_{ai}	0,39	0,58
E_{sr}	3.599.070,5 kWh/año	3.599.070,5 kWh/año
η_{ar}	0,11	0,16
η_{ai}/η_{ar}	0,39 / 0,11 = 3,54	0,58 / 0,16=3,62

El objetivo de esta comparación es comprender en qué medida es posible realizar simplificaciones y cómo afectan éstas al resultado ofrecido por el diagnóstico, dado que pueden existir abastecimientos que no posean los datos necesarios para un cálculo más detallado. Para este caso concreto, si bien la diferencia entre los rendimientos obtenidos (ideal y real) es aproximadamente un 30%, la diferencia entre ambos, que al fin y al cabo es el valor que ofrece una aproximación al margen de mejora que posee el abastecimiento, es aproximadamente un 2%. Por tanto se puede afirmar, que la simplificación realizada no afecta a las conclusiones obtenidas sobre el estado del sistema.

Sin embargo, esta aproximación depende en gran medida de las diferencias topográficas y sobre todo de la distribución de volúmenes existente para las distintas elevaciones. Ya que en este caso, esta simplificación supone considerar todo el volumen consumido en un punto de cota promedio $(115-3,5)/2 = 59,3\text{m}$. A la vista de la siguiente figura, se puede observar como la relación entre ambas zonas sombreadas (E_{uo} , E_{ti}) es similar a la relación existente en el sistema con más detalle (Sistema 1).

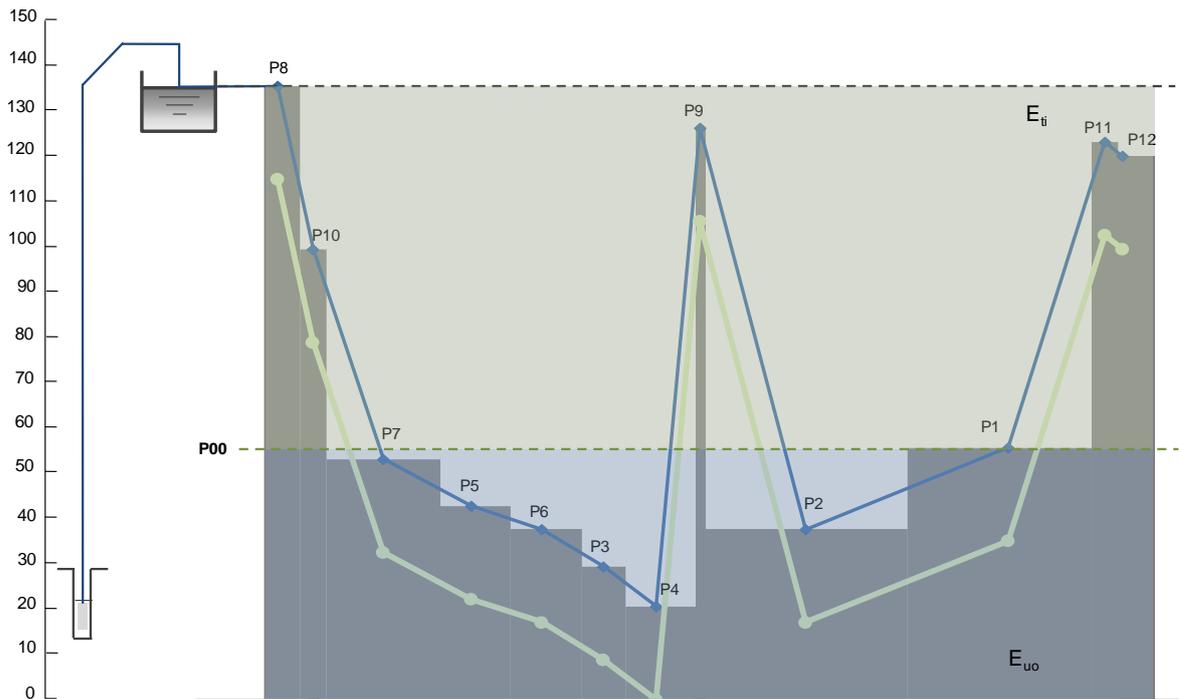


Figura 3-8: Relación entre E_{uo}/E_{ii} en el sistema simplificado y en el sistema con más detalle.

Esta relación entre ambos rendimientos no sería válida cuando existe un gran volumen demandado en uno de los extremos (más alto o más bajo) del sistema, ya que la suposición de considerar todo el volumen en un punto intermedio conllevaría a errores. No es el caso porque los mayores consumos se concentran en los nudos de elevaciones intermedias (P_1 y P_2), pero si la mayoría de consumo se concentra en las cotas altas de la red, entonces la cota promedio en la que se va a concentrar toda la demanda debería caracterizar el centro de masas del sistema en función de la demandada.

El siguiente paso es calcular el rendimiento real objetivo, para ello es necesario estimar las energías perdidas objetivo en este sistema concreto, es decir, el nivel de pérdidas de energía mínimo que puede alcanzarse efectuando posibles mejoras. Antes de acometer este cálculo, se compara los resultados obtenidos con un escenario diferente en el que sí existe energía de exceso (una configuración muy habitual) de manera que se pueda observar cómo varían los rendimientos calculados a esta configuración.

3.8.1.3. Cálculo de energías y rendimientos ante un nuevo escenario

La existencia de energía de exceso se debe al hecho de disponer más altura que la estrictamente necesaria, es decir, en el caso de sistemas con depósito de acumulación, si la altura disponible en éste es mayor que la cota del nudo más alto más la presión mínima de servicio ($z_h + p_0$). En el caso de sistemas en los que no exista depósito de acumulación, este

exceso de altura, y por tanto de energía, se controla con el propio funcionamiento de la bomba, ajustando la altura aportada a la estrictamente necesaria. Idealmente, este exceso sólo puede existir si existe depósito, pues el punto de funcionamiento de las bombas será exactamente el requerido y además con rendimiento 1, pues no existen pérdidas.

Se supone el sistema anterior, pero esta vez con exceso de energía. Para mantener los mismos valores de energía mínima, E_{uo} , y energía topográfica ideal, E_{ti} , se eleva el depósito ($z_{dep}= 150$ metros), únicamente para poder estudiar cómo influye el exceso de energía en los rendimientos ideales del sistema. Como consecuencia de la elevación del depósito se supone una mayor energía requerida en la bomba, por lo que se calcula la nueva energía entregada por la bomba proporcional a la nueva altura por simplicidad (3.757.508 kWh), manteniendo el mismo rendimiento, de forma que las ineficiencias detectadas sean sólo función del aumento de la altura requerida y no de la variación del rendimiento de la bomba.

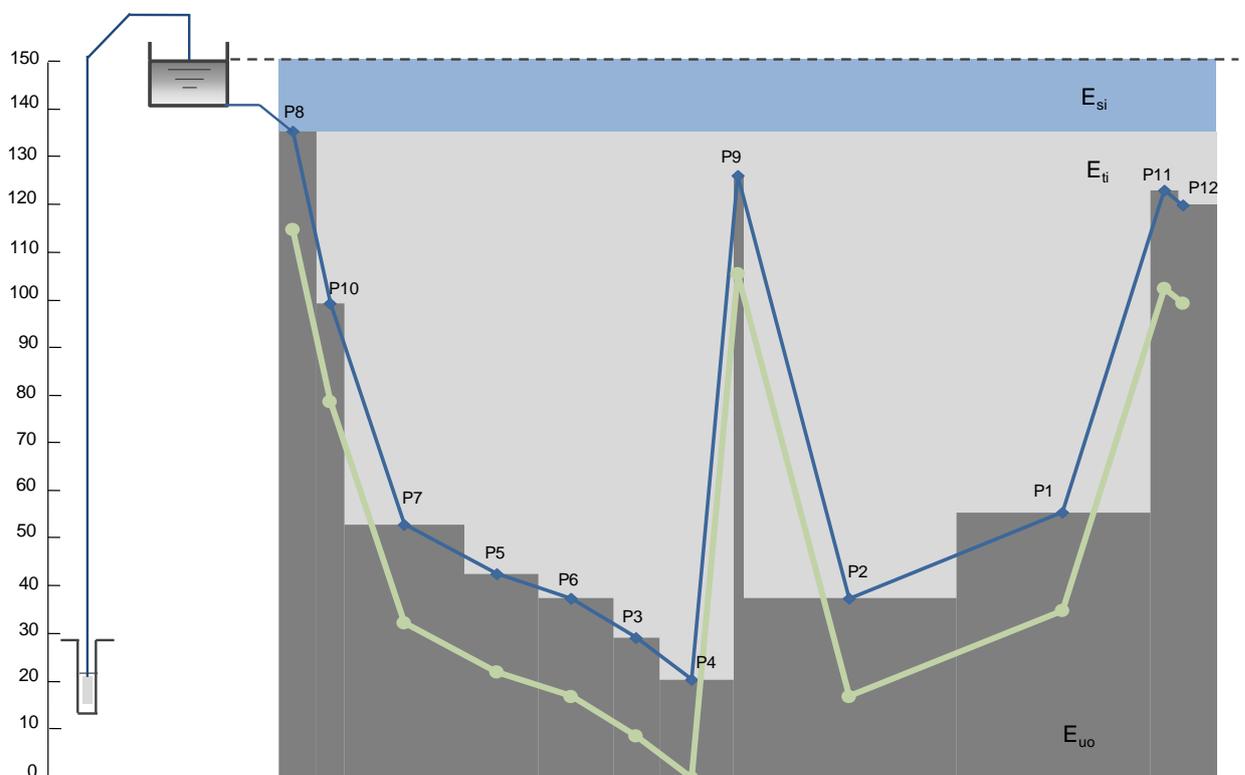


Figura 3-9: Sistema ideal con exceso de energía.

Para este nuevo supuesto ideal se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3-4: Resultados del escenario con exceso de energía.

	Sistema 3 (con depósito)
E_{uo}	389.751,4 kWh/año
E_{ti}	607.162,9 kWh/año
E_{ei}	113.716,5 kWh/año
E_{si}	1.110.630,8 kWh/año
η_{ai}	0,35
E_{sr}	4.049.971,5 kWh/año
η_{ar}	0,09
η_{ai}/η_{ar}	0,35 / 0,09 = 3,64

Es obvio que ante este nuevo escenario, el primer paso antes de tratar de acercar el rendimiento real de 0,09 a 0,35, es elevar el rendimiento ideal a un valor superior en el que no exista exceso de energía. Tal como se ha comentado, el exceso de energía es consecuencia directa de suministrar al sistema una altura mayor que la estrictamente necesaria, por tanto esta energía dado que no es necesaria en ningún caso, debe ser evitada. En un Capítulo 5 se plantea un análisis en profundidad de las consecuencias de esta energía de exceso y de los beneficios energéticos e incluso económicos derivados de su disminución o eliminación. También se propone un nuevo indicador que permite cuantificar el aumento del rendimiento ideal por la eliminación del depósito.

En el caso que no sea posible evitar este exceso de energía, porque no sea factible otra configuración del sistema en el que el depósito de acumulación sea eliminado o reubicado, se deben buscar estrategias enfocadas a evitar el exceso de energía. Por ejemplo suministrar en directo al menos parte del sistema, de esta forma el depósito sólo abastece a los nudos más altos. Si no se puede establecer esta estrategia y otras que se verán más adelante para evitar el exceso de energía, se debe optar por la recuperación o disipación de esta energía tal como ya se ha comentado por medio de PATs o VRPs respectivamente. A este respecto cabe destacar que, dependiendo de la ubicación del nudo crítico (en estos ejemplos la longitud crítica es indiferente dado que se trata de sistemas ideales y el nudo crítico es el nudo más alto) y de la posible ubicación de la VRP (ver Figura 3-10), la energía que se disipa puede ser topográfica o de exceso.

En el caso de b), la VRP se ubica antes del nudo crítico por lo que ésta debe tararse de forma que la altura que fija a su salida sea la correspondiente a la altura mínima requerida (z_i+p_o) más las pérdidas desde ésta hasta el nudo crítico, por tanto la función principal de la válvula en este caso es disipar energía de exceso debido a que la altura disponible en el depósito es mayor que

la estrictamente necesaria. En el caso c) en el que la VRP está ubicada detrás del nudo crítico, ésta puede estar tarada a una presión tal que se satisfaga la presión mínima de servicio en los nudos agua abajo de ésta, como si se tratara de otro subsistema, debiendo satisfacerse una nueva altura mínima correspondiente a la suma de la cota del nudo más elevado aguas abajo de la válvula más la p_0 considerando las pérdidas de carga hasta éste. Obviamente, estos esquemas son simplificaciones ilustrativas de un sistema real. Existe la posibilidad de combinar varias válvulas de forma que se pueda ir escalonando la reducción de presión de exceso.

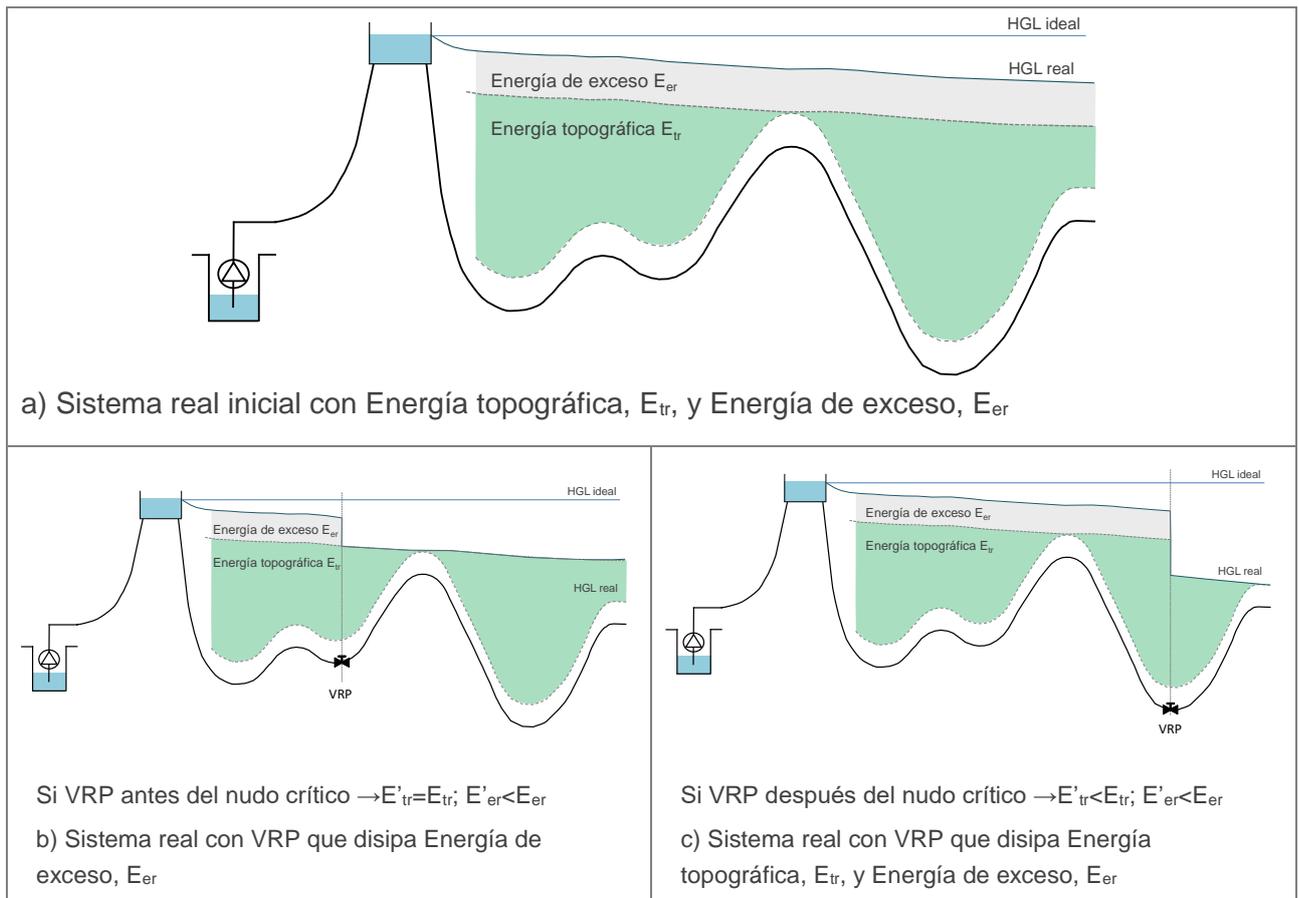


Figura 3-10: Comparación del efecto de la VRP en la disipación de energía dependiendo de su ubicación

En cualquier caso e independientemente de su ubicación, la función de la VRP es disipar energía que previamente se ha debido suministrar, parece claro que, siempre que sea posible, será mejor evitar el suministro de esta energía que no disiparla posteriormente. Varias reflexiones a este respecto, así como medidas estructurales y operacionales que deben ser consideradas, se tratarán en profundidad en el Capítulo 6.

3.8.1.4. Cálculo de las energías y rendimiento objetivo

El siguiente paso del diagnóstico es el cálculo de las energías reducibles y del rendimiento objetivo. Este tercer indicador, aporta una idea de hasta dónde se podría mejorar el sistema, dado que el rendimiento ideal es inalcanzable. En este rendimiento, el más estimativo de los tres, el numerador continúa siendo el mismo, la energía mínima requerida por los usuarios, E_{uo} , pero el denominador pasa a ser la energía reducible objetivo, $E_{sr,o}$. Esta energía es consecuencia de considerar las pérdidas en el sistema debidas a la fricción ($E_{rf,o}$), fugas ($E_{rl,o}$), bombeos ($E_{rp,o}$) y otras causas que puedan suponer pérdidas de energía ($E_{ro,o}$). Para el cálculo de estas energías reducibles se supone el mejor estado de pérdidas posible, o aquel que el abastecimiento considere que puede llegar a alcanzar con los medios y la tecnología de la que dispone.

Para calcular estas energías reducibles de forma rigurosa se requiere una auditoría energética del sistema, la cual como ya se ha comentado, precisa del modelo y de una auditoría hídrica previa. En este punto del proceso global de mejora de la eficiencia, no se cuenta con el modelo de la red, y es que no es el objetivo de esta fase de diagnóstico, sino todo lo contrario, poder llegar a evaluar el sistema con los mínimos datos posibles. Se persigue por el contrario obtener una visión general del estado del sistema desde el punto de vista de la energía requerida, de manera que si esta visión global es mejorable, un estudio detallado con las auditorías correspondientes determinará los problemas concretos, y más importante, cuantificarán cómo de mejorable es ese sistema.

Se calculan a continuación cada una de las energías reducibles para este caso concreto, según las ecuaciones planteadas ((3-17), (3-18), (3-19) y (3-20)).

Energía reducible en fugas, $E_{rl,o}$

Para la estimación de la mínima energía razonable pérdida en las fugas, se supone una mínima cantidad de agua fugada en cada uno de los nudos del sistema. De nuevo, y tal como se ha comentado anteriormente, aquí se pueden realizar varias simplificaciones dependiendo de los datos disponibles. Se puede suponer una proporción de volumen fugado en cada uno de los nudos dependiendo de su presión o del volumen demandado, o se puede repartir todo el volumen fugado por igual en todos los nudos del sistema. La mayor estimación que se puede realizar es multiplicar este volumen fugado por la presión media ideal y no por la real en cada nudo, pero a este efecto hay dos cuestiones; por un lado, para conocer la presión en cada uno de los nudos del sistema se requiere el modelo matemático, y por otro, el volumen fugado es función de la presión y viceversa, por lo que la energía perdida en fugas no mantiene una proporción lineal con el volumen fugado. En cualquier caso, y teniendo en cuenta que se trata de una estimación, la ecuación planteada cumple su función.

En este caso el volumen no registrado actual es:

Volumen inyectado (4.991.910 m³/año) – Volumen registrado (2.782.054 m³/año) = 2.209.856 (m³/año)

Que supone más del 44% del volumen inyectado, una cantidad nada despreciable. El primer paso es determinar o decidir cuál debería ser el máximo volumen fugado permitido en el sistema. Y aunque el uso de valores porcentuales no es aconsejable, en una primera estimación puede recurrirse a él (por ejemplo, un peso de las pérdidas igual al 10%). Pero, si se conoce la longitud total del sistema, siempre será mejor utilizar buenos indicadores (0.2 m³/km·h para las pérdidas reales y un 4% del valor registrado para las pérdidas aparentes), y a partir de ellos obtener el porcentaje que las pérdidas representan.

Asumiendo una reducción de las pérdidas del 44% al 10% del volumen inyectado (supone un volumen perdido de agua de 309.117,11 m³/año), el cálculo de la energía reducible en fugas sería:

$$E_{r,l,o} = \gamma \sum \Delta v_{j,o} \frac{p_{jr}}{\gamma} = \gamma \sum \Delta v_{j,o} \left[\frac{p_o}{\gamma} + \frac{p_{j,t,r}}{\gamma} \right] \approx \gamma \Delta V_o \left[\frac{p_o}{\gamma} + \left(z_h - \frac{z_h + z_l}{2} \right) \right] \quad (3-28)$$

$$E_{r,l,o} \approx \gamma \cdot 309.117,11 \left[\frac{20}{\gamma} + \left(115 - \frac{115 + 3,5}{2} \right) \right] = 63.807,56 \text{ kWh/año}$$

En el caso de realizar un cálculo más exacto, pero estimado igualmente, en el que el volumen perdido se supone distribuido por los nudos proporcionalmente al volumen registrado, y para cada nudo se supone que la presión es igual a la mínima requerida ($H_{\max} - z_j$), en este caso la energía reducible en fugas sería 84.309,4 kWh/año. Que siendo también aproximada, se puede aproximar más al valor real.

Otra posibilidad es reducir el nivel de fugas al nivel óptimo de fugas, pero este paso requiere un estudio en detalle del abastecimiento y de los costes variables del agua fugada.

Energía reducible debido a las pérdidas por fricción, $E_{r,f,o}$

Tal cual se ha dicho, ésta es la estimación más compleja, ya que esta energía depende del recorrido del agua, y no sólo del camino recorrido sino de las tuberías (diámetro) por las que circula, y a la presión a la que lo haga. Pero de nuevo, el objetivo de este análisis es buscar herramientas que faciliten la estimación, ya que para realizar el cálculo exacto se puede recurrir a la auditoría energética. En este caso concreto se deben suponer los valores de longitud recorrida por el agua así como las pérdidas localizadas. Obviamente siempre se puede estar del lado de la seguridad suponiendo un recorrido mayorado. Un valor objetivo para las pérdidas unitarias por fricción aceptable es de 2,5 mca/km. En este caso se estima a partir de los datos de longitudes de la red un recorrido del agua de 4500 metros equivalentes, que incluya también las pérdidas localizadas. El volumen de agua a trasladar es el registrado más el supuesto objetivo en las pérdidas de agua.

$$E_{rf,o} = \gamma(V + \Delta V_o) \left[(L_{pm})J_m + \frac{\Delta p_{rf,p}}{\gamma} \right] \approx 94.763,7 \text{ kWh/año} \quad (3-29)$$

Energía reducible estaciones de bombeo, $E_{rp,o}$

Valores aceptables deben estar en torno al 65% sobre la energía de eje inyectada (rendimiento de los motores de arrastre y variadores de frecuencia incluidos) (Abadía et al., 2008). En este caso suponiendo que la bomba aporta la atura coincidente con la requerida para llenar el depósito, y a partir del volumen inyectado y de la energía obtenida de las facturas, se puede calcular un rendimiento de todo el conjunto (incluyendo pérdidas localizadas, fricción en la tubería de impulsión, etc.) del grupo de presión de 45,3%. Asumiendo una mejora en el rendimiento global del sistema de presión al 65%, la energía reducible en estaciones de bombeo queda tal como se indica en la ecuación. Cabe destacar que esta mejora asume la anterior, es decir la reducción en las pérdidas de agua, ya que se estima la energía que se pierde suponiendo que este nuevo grupo de presión bombea el volumen registrado más el mínimo supuesto por pérdidas.

$$\begin{aligned} E_{rp,o} &= \gamma(V + \Delta V_o) h_{pr} \left(\frac{1}{\eta_{po}} - 1 \right) \\ &= \gamma(V + \Delta V_o) \left[L_{pc} J_m + \frac{\Delta p_{rf,p}}{\gamma} + \frac{p_o}{\gamma} + (z_c - z_n) \right] \left(\frac{1}{\eta_{po}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (3-30)$$

$$E_{rp,o} = \gamma (2.782.054 + 309.117,1) h_{pr} \left(\frac{1}{65} - 1 \right) = 498.926,9 \text{ kWh/año}$$

Otras pérdidas de energías reducible, $E_{ro,o}$

Tal como se ha comentado, el objetivo con respecto a este otro tipo de pérdidas debe ser eliminarlas al igual que el exceso de energía inyectada al sistema. Por tanto $E_{ro,o} = 0$.

Con todo, la energía de pérdidas reducible del sistema, $E_{rg,o}$, es:

$$E_{rg,o} = E_{rl,o} + E_{rf,o} + E_{rp,o} + E_{ro,o} = 687.000 \text{ kWh/año} \quad (3-31)$$

Una posterior auditoría energética sobre el sistema, puede dar un valor más concreto tanto de las pérdidas de energía reales como las objetivo, para el diagnóstico este valor ya ofrece un objetivo razonable. A partir de aquí, la energía requerida objetivo, y el correspondiente rendimiento objetivo son:

$$\begin{aligned} E_{sr,o} &\approx (E_{uo} + E_{ti}) + E_{rg,o} = 1.674.914,3 \text{ kWh/año} \\ \eta_{ar,o} &= \frac{E_{uo}}{E_{sr,o}} = \frac{389.751,4}{1.674.914,3} = 0,23 \end{aligned} \quad (3-32)$$

Así, los cálculos y estimaciones precedentes han permitido estimar los tres rendimientos energéticos del sistema para poder realizar un diagnóstico de su estado actual.

Tabla 3-5: Rendimientos energéticos del sistema

η_{ai}	$\eta_{ar,o}$	η_{ar}
0,39	0,23	0,11

Por tanto y a la vista de los resultados, el rendimiento actual del sistema real es 0,11, un valor muy bajo si se compara con el valor del rendimiento ideal 0,39. Esto supone un margen de mejora de más del triple, ahora bien, conscientes de que ese valor de rendimiento es un máximo y se trata de un valor inalcanzable a todos los efectos, se estima el rendimiento objetivo, un valor al que introduciendo ambiciosas mejoras en el sistema actual se podría llegar a 0,23, convirtiéndose en el nuevo objetivo o máximo. Por tanto, una mejora de más del doble del rendimiento actual, bien vale la pena acaecer la etapa de análisis del proceso de eficiencia energética.

Este objetivo es suponiendo que no se actúa sobre la configuración del sistema, porque es posible que antes de estudiar medidas operacionales sobre la red, se deba estudiar diferentes configuraciones, que no sólo mejoren el rendimiento real sino que aumenten el rendimiento ideal, por el hecho de disminuir la energía topográfica. Con el objetivo de mostrar esta posibilidad se describe el siguiente caso práctico.

3.8.2. Caso práctico 2. Evaluación de la energía topográfica

El siguiente caso práctico se corresponde con una red de riego real sobre la que se ha aplicado varias mejoras con el objetivo de reducir el coste energético del empleo del agua, por lo que ha sido posible validar la conveniencia de las hipótesis y procedimiento planteado. Los ahorros económicos y energéticos se presentan en detalle en el Capítulo 6, después de comentar las medidas de mejoras aplicadas.

El objetivo de este segundo caso práctico es analizar en profundidad la parte derecha del diagrama de flujo presentado en la Figura 3-5, en aras de mejorar la eficiencia en PWTS (ver), la correspondiente con la reducción de la energía topográfica. Previo a las auditorías y en paralelo al estudio de los rendimientos, la parte derecha del proceso hace hincapié en la reducción del porcentaje sobre el total de la energía topográfica, θ_{ti} . Dado que esta reducción, en la mayoría de los casos (como el caso práctico que a continuación se detalla) requiere de medidas estructurales, un cambio en el disposición de la red es el único cambio que varía las energías ideales junto con la reducción de la demanda por parte de los usuarios o la presión mínima de

servicio, pero no el funcionamiento del sistema. Al variar las energías ideales, se varía por tanto el punto de partida del análisis.

3.8.2.1. Planteamiento del caso

La Figura 3-11 muestra el esquema correspondiente al segundo caso práctico. Se trata de un sistema de riego real con más de 300 nudos de consumo, cuyas principales características son:

- Se riega un total de 125,51 días al año
- El volumen consumido es de 18.580 m³/día (entregado a los usuarios)
- $V+\Delta V = 19164$ m³/día (inyectado al sistema), con $\Delta V = 584$ m³/día.
- Red nueva sin apenas fugas. El volumen inyectado (2.405.260 m³/año) y registrado (2.332.019 m³/año) casi coinciden. El cociente es 0,97.
- Se conocen las cotas (z_j) y los consumos de cada uno de los nudos (V_i) en el intervalo de tiempo de referencia.
- La presión requerida, p_o es de 20 m.
- Procedencia de la energía: natural (la cota de aspiración de las bombas es superior a la cota del punto de consumo más bajo) y de bombeo.
- Cota máxima, $z_m = 35,53$ m ; cota mínima $z_l = 14,39$ m; cota de aspiración $z_p = 25$ m

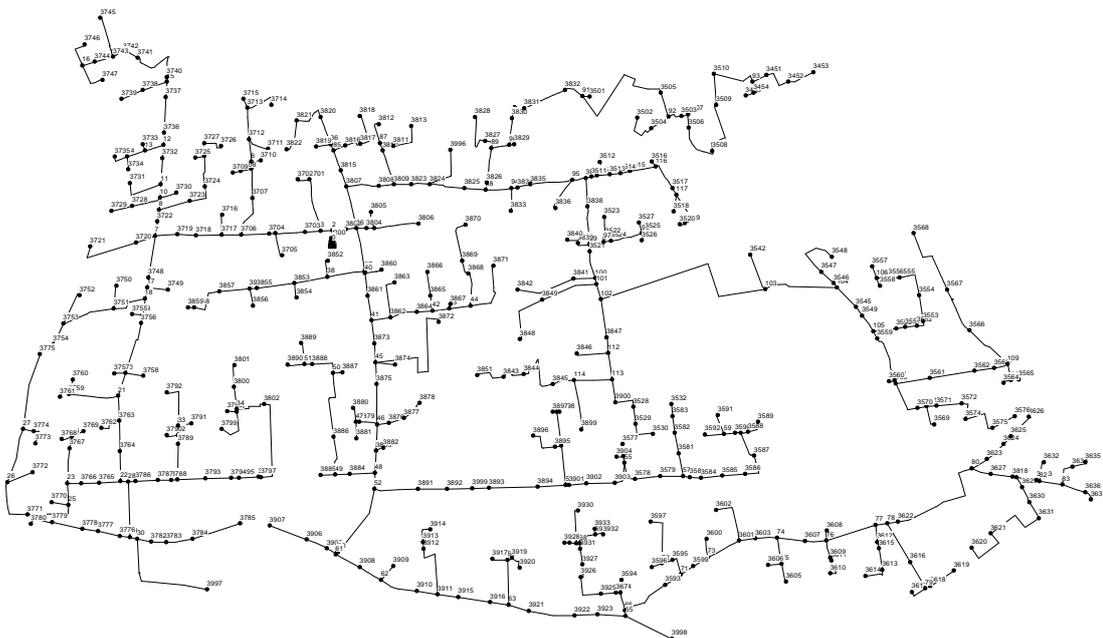


Figura 3-11: Esquema red de riego del caso 2

La estación de bombeo se encuentra en el centro de la red. La energía de eje que el sistema aporta, $E_{sr,p}$, se conoce por los recibos de la compañía eléctrica. El consumo anual total dividido por las horas de riego del año proporciona el valor en kWh/día (el período de estudio es un día). Se tiene entonces:

$$E_{sr,p} = \frac{732.098 \text{ kWh/año}}{125,51 \text{ días útiles/año}} = 5.832,96 \text{ kWh/día} \quad (3-33)$$

Por otra parte la energía natural que se aporta al sistema se determina a partir de la cota media del depósito de aspiración de la bomba (z_p):

$$E_{sr,n} = \gamma(V + \Delta V_o)(z_p - z_l) = \frac{\gamma \cdot 18.580,25(25 + \frac{5}{2} - 14,39)}{3.600.000} = 663,78 \text{ kWh/día} \quad (3-34)$$

En definitiva, la energía total aportada es $E_{sr} = 6.494,74 \text{ kWh/día}$ y el indicador correspondiente a la energía natural aportada ($C_1 = \text{energía natural aportada} / \text{energía total suministrada}$) alcanza un valor bajo (0,102).

3.8.2.2. Cálculo de energías y rendimientos

Continuando con el mismo desarrollo planteado, el primer paso es calcular la energía y rendimiento ideal, por un lado y el rendimiento real por otro con el objetivo de comparar ambos valores. En este caso y según los datos de consumos y elevaciones de los nudos, se obtiene:

Tabla 3-6: Energías de partida Caso 2.

	Caso 2
E_{uo}	1.494,23 kWh/día
E_{ti}	588,71 kWh/día
E_{si}	2.082,94 kWh/día
η_{ai}	0,72
θ_{ti}	0,28
E_{sr}	6.494,74 kWh/día
η_{ar}	0,23
η_{ai}/η_{ar}	0,74 / 0,28 = 3,13

A la vista de los resultados de la Tabla 3-6, se observa que el valor ideal es tres veces superior al real, por lo que el margen de mejora es notable.

Si se recurre a las intensidades energéticas (kWh/m^3) ideal y real, la proporción se mantiene:

$$I_{ei} = \frac{E_{ti}}{V} = \frac{2082,94}{18.580} = 0.112 \text{ kWh/m}^3$$

$$I_{er} = \frac{E_{tr}}{V} = \frac{6494,74}{18.580} = 0.350 \text{ kWh/m}^3 \quad (3-35)$$

Pues su cociente es 3.12. En ocasiones la intensidad energética se refiere exclusivamente a la energía de eje, dado que sólo este término se paga directamente a la compañía. En ese caso el resultado es, obviamente, algo menor.

$$I'_{er} = \frac{E_{tr}}{V} = \frac{5832,96}{18580} = 0.314 \text{ kWh/m}^3 \quad (3-36)$$

3.8.2.3. Desacoplamiento del sistema

El Caso 2 tiene una particularidad que lo convierte en el caso ideal de estudio de la influencia de la topografía en la eficiencia energética del sistema. La red, que como se ha comentado se abastece desde un grupo de presión que se encuentra prácticamente en el centro de la red, tiene tres sectores diferenciados en cuanto a su elevación. En la siguiente figura (Figura 3-12) se muestran estos tres sectores: Sector Alto, Sector Medio y Sector Bajo

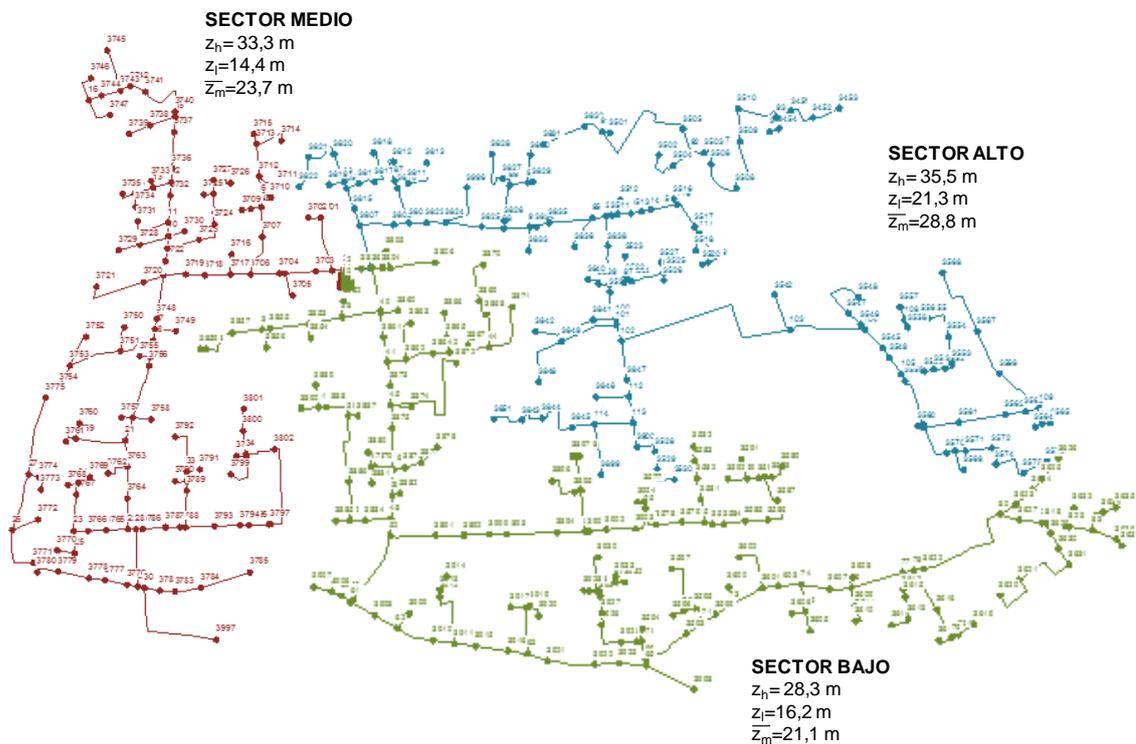


Figura 3-12: Sectores de la red de riego Caso 2.

A continuación se muestra una tabla resumen con las características de todo el sistema y de cada uno de los sectores. La cota promedio ha sido ponderada con el volumen en cada uno de los nudos, de manera que refleje mejor la distribución espacial de las cotas (centro de masas del sector con respecto a la demanda). Para cada uno de los sectores se supone un nivel de pérdidas de agua igual al sistema completo.

Tabla 3-7: Características principales de cada uno de los sectores del Caso 2.

	SISTEMA	SECTOR ALTO	SECTOR MEDIO	SECTOR BAJO
Z_h	35,5 m	35,5 m	33,3 m	28,3 m
Z_l	14,4 m	21,3 m	14,4 m	16,2 m
\bar{z}_m	23,9 m	28,8 m	23,7 m	21,1 m
V	2.331.821,12 m ³ /año	622.462,9 m ³ /año	677.636,7 m ³ /año	1.031.721,4 m ³ /año
$V+\Delta V$	2.405.114,1 m ³ /año	642.027,97 m ³ /año	698.935,99 m ³ /año	1.065.150,15 m ³ /año

Mientras que con en el sistema completo la diferencia entre la cota más alta y más baja es de algo más de 21 metros, las diferencias entre nudos extremos en el caso de dividir la red en sectores desciende a 14,2 m, 18,9 m y 12,1 m, respectivamente. Esto implica una reducción de la energía topográfica directa (Figura 3-13), ya que se pasa de suministrar a todos los nudos del sistema con una altura mínima de z_h+p_o , a suministrar con tres bombas, cada una a un sector distinto y por tanto al $z_{hi}+p_o$ de cada sector.

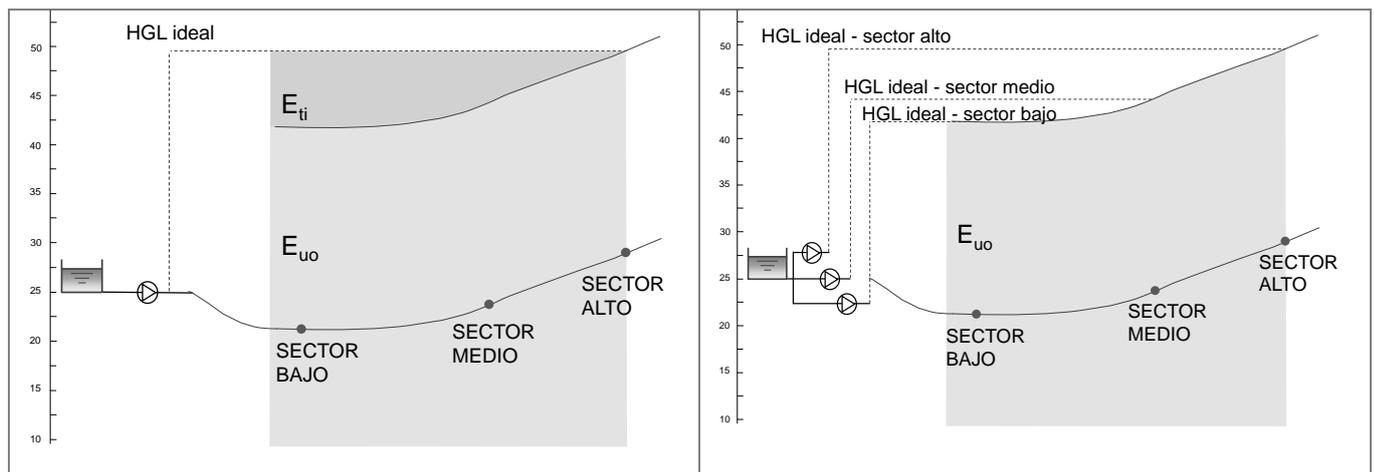


Figura 3-13: Esquematación sectorización del caso 2.

A continuación se muestra el análisis en detalle de cada uno de los sectores:

SECTOR ALTO:

- $V=622.462,9 \text{ m}^3/\text{año}$ (entregado a los usuarios). Periodo de análisis, el año.
- Suponiendo el mismo nivel de fugas: $V+\Delta V = 642.027,97 \text{ m}^3/\text{año}$ (inyectado).
- Presión requerida (p_o) = 20 m.
- Cotas: Extremas $z_h = 35,53 \text{ m}$; $z_l = 21,3 \text{ m}$. Cota nivel de agua en la aspiración= 25 m.

A partir de las cotas y demandas de los nudos de consumo, las energías y rendimiento ideal correspondiente al Sector Alto son:

Tabla 3-8: Energías ideales y rendimiento ideal del Sector Alto.

	Sector Alto
E_{uo}	46.710,55 kWh/año
E_{ti}	11.299,88 kWh/año
E_{si}	58.010,43 kWh/año
η_{ai}	0,81
θ_{ti}	0,19

El valor real de η_{ar} , se determina a partir de la energía suministrada calculada, ya que se desconocen todavía las facturas eléctricas. Con ayuda del modelo, y partiendo del punto de funcionamiento de una nueva bomba, el rendimiento teórico de ésta supuestas unas pérdidas localizadas, resulta:

Datos de la bomba:

- $h_p = 46,6 \text{ metros}$
- $\eta_p = 79,49\%$
- $L_{pc} = 4000 \text{ metros}$
- $\Delta_{p_{wf,p}}/\gamma = 4 \text{ metros}$

$$E_{sr} = E_{sr,p} + E_{sr,n} = 139.850,14 \text{ kWh/año}$$

$$\eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{sr}} = 0,33 \quad (3-37)$$

SECTOR MEDIO:

- $V=677.636,7 \text{ m}^3/\text{año}$ (entregado a los usuarios). Periodo de análisis, el año.
- Suponiendo el mismo nivel de fugas: $V+\Delta V = 698.935,98 \text{ m}^3/\text{año}$ (inyectado).
- Presión requerida (p_o) = 20 m.

- Cotas: Extremas $z_h = 33,3$ m ; $z_l = 14,4$ m. Cota nivel de agua en la aspiración= 25 m.

A partir de las cotas y demandas de los nudos de consumo, las energías y rendimiento ideal correspondiente al Sector Medio son:

Tabla 3-9: Energías ideales y rendimiento ideal del Sector Medio.

	Sector Medio
E_{uo}	54.094,65 kWh/año
E_{ti}	17.736,54 kWh/año
E_{si}	71.831,19 kWh/año
η_{ai}	0,75
θ_{ti}	0,25

El valor real de η_{ar} , se determina a partir de la energía suministrada calculada, dado que se desconocen todavía las facturas eléctricas. Con ayuda del modelo, y partiendo del punto de funcionamiento de una nueva bomba, el rendimiento teórico de ésta supuestas unas pérdidas localizadas, se tiene:

Datos de la bomba:

- $h_p = 40,4$ metros
- $\eta_p = 77,87\%$
- $L_{pc} = 4000$ metros
- $\Delta_{pwf,p}/\gamma = 4$ metros

$$E_{sr} = E_{sr,p} + E_{sr,n} = 153.244,21 \text{ kWh/año}$$

$$\eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{sr}} = 0,35 \quad (3-38)$$

SECTOR BAJO:

- $V=1.031.721,4$ m³/año (entregado a los usuarios). Periodo de análisis, el año.
- Suponiendo el mismo nivel de fugas: $V+\Delta V = 1.064.150,15$ m³/año (inyectado).
- Presión requerida (p_o) = 20 m.
- Cotas: Extremas $z_h = 28,3$ m ; $z_l = 16,2$ m. Cota nivel de agua en la aspiración= 25 m

A partir de las cotas y demandas de los nudos de consumo, las energías y rendimiento ideal correspondiente al Sector Bajo son:

Tabla 3-10: Energías ideales y rendimiento ideal del Sector Bajo.

	Sector Bajo
E_{uo}	69.891,85 kWh/año
E_{ti}	20.355,41 kWh/año
E_{si}	90.247,25 kWh/año
η_{ai}	0,77
θ_{ti}	0,23

El valor real de η_{ar} , se determina a partir de la energía suministrada calculada, dado que se desconocen todavía las facturas eléctricas. Con ayuda del modelo, y partiendo del punto de funcionamiento de una nueva bomba, el rendimiento teórico de ésta supuestas unas pérdidas localizadas, resulta:

Datos de la bomba:

- $h_p = 29,3$ metros
- $\eta_p = 81,48\%$
- $L_{pc} = 4000$ metros
- $\Delta_{p_{wf,p}}/\gamma = 4$ metros

$$E_{sr} = E_{sr,p} + E_{sr,n} = 179.619,62 \text{ kWh/año}$$

$$\eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{sr}} = 0,39 \quad (3-39)$$

Comparando ambas situaciones, red completa y red desacoplada se tiene:

Tabla 3-11: Evaluación del sistema completo y desacoplado

	SISTEMA	SECTOR ALTO	SECTOR MEDIO	SECTOR BAJO	PONDERADO CON EL VOLUMEN
V (m ³ /año)	2.331.821,12	622.462,9	677.636,70	1.031.721,40	-
V+ Δ V (m ³ /año)	2.405.114,10	642.027,97	698.935,99	1.065.150,15	-
E_{uo} (kWh/año)	187.526,00	46.710,55	54.094,65	69.891,85	-
E_{ti} (kWh/año)	73.886,30	11.299,88	17.736,54	20.355,41	-
E_{si} (kWh/año)	261.412,30	58.010,43	71.831,19	90.247,25	-

η_{ai}	0,72	0,81	0,75	0,77	0,78
θ_{ti}	0,28	0,19	0,25	0,23	0,22
η_{ar}	0,23	0,33	0,35	0,39	0,33

A la vista de la tabla anterior, se evidencia cómo aumenta la eficiencia energética real del sistema (de 0,23 a 0,33) por el hecho de disminuir la energía topográfica (de 0,28 a 0,22). Claramente en la Figura 3-14 se observa cómo la energía topográfica ideal en el caso de desacoplar el sistema ($E_{ti}(\text{medio}) + E_{ti}(\text{bajo}) + E_{ti}(\text{alto})$) es menor que la energía topográfica ideal si una misma bomba suministra a todo el sistema ($E_{ti}(\text{sistema})$).

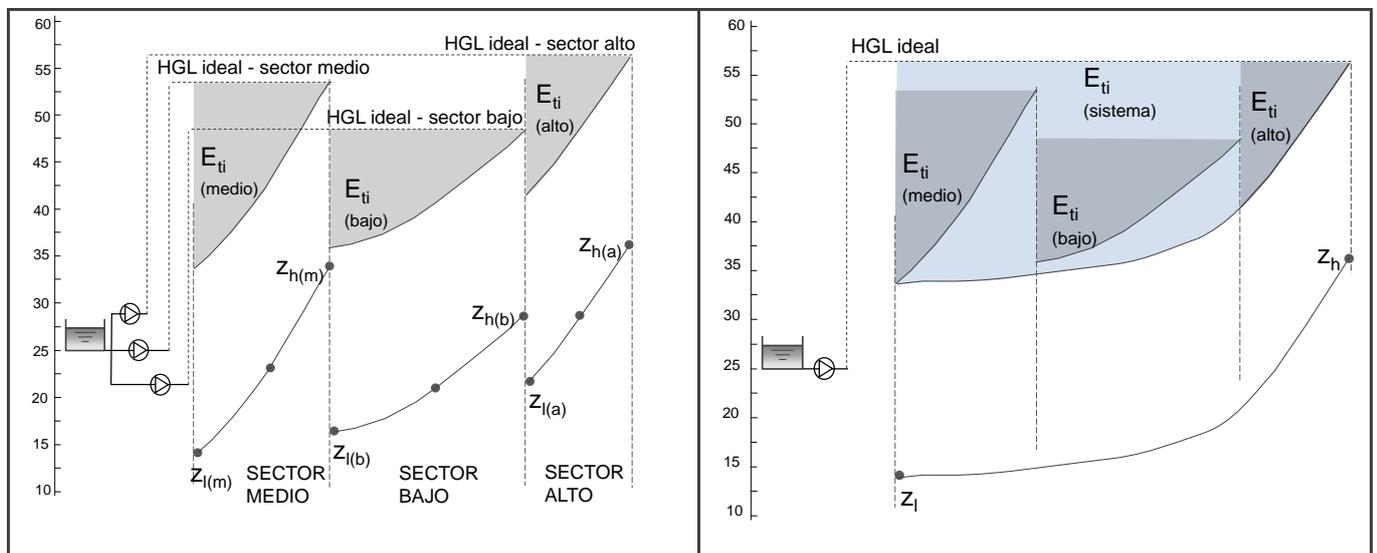


Figura 3-14: Comparación energía topográfica ideal en el sistema desacoplado y en el sistema completo

Este aumento de la eficiencia se demuestra claramente en la factura eléctrica pues disminuiría de un valor real de 732.098 kWh/año a un valor teórico resultado de la suma de las tres facturas correspondientes a las tres bombas (cada una para un sector: 133.376,8 kWh/año + 133.055,43 kWh/año + 154.101,29 kWh/año) de 420.533,62 kWh/año. Con todo ello, se reduce la factura eléctrica anual en más del 40%. Suponiendo un coste medio del kWh de 0.1 €, esto supondría un ahorro económico superior a 31.000 €/año.

Valores más cercanos a la realidad de ahorros energéticos y económicos se muestran en el Capítulo 6, cuando junto a esta medida para reducir la energía topográfica (desacoplar el sistema) se añaden otras medidas operacionales y estructurales.

3.9. Conclusiones

Mejorar la eficiencia hidráulica y energética en los sistemas de transporte de agua a presión, independientemente de que se trate de sistemas urbanos o de riego, es un tema que está ganando importancia, pero no hay soluciones fáciles. Antes de tratar de buscar mejoras concretas a cada sistema, implementando medidas operacionales y/o medidas estructurales, es necesario estimar el rango de mejora que éstas podrían llegar a introducir en el sistema, por tanto previo a un análisis en detalle, se propone un sistema de diagnóstico con métricas suficientemente precisas a los márgenes de mejora reales.

La principal aportación de esta métrica es que no compara el rendimiento real del abastecimiento con respecto a 1, límite común de los rendimientos, sino que lo hace con la mejor versión de sí mismo, contemplando en el rendimiento ideal las limitaciones reales del sistema, principalmente la topografía y el reparto de volúmenes dentro de la red. Por tanto, no establece un mismo patrón para todos los abastecimientos, no todos pueden apuntar a un rendimiento de valor la unidad. Si un sistema debe vencer tremendas diferencias de cotas en su red no debe por qué ser juzgado de igual forma que aquellos abastecimientos planos, por tanto, la mejor comparación es consigo mismo reduciendo al máximo las pérdidas de energía, que igualmente jamás podrán ser reducidas por completo, por eso la necesidad de crear un objetivo con límites razonables.

En este trabajo se presenta una metodología de evaluación que requiere alguna hipótesis que difícilmente pueden ser planteadas de forma rigurosa en la etapa inicial del proceso de mejora de la eficiencia, por consiguiente, el valor de $\eta_{ar,o}$ no puede ser determinado con precisión. Sin embargo, para los fines de diagnóstico, basado en el orden de magnitud de la diferencia $\eta_{ar,o} - \eta_{ar}$ esta falta de precisión no tiene mayor relevancia en el resultado del análisis. Además, este valor puede ser calculado con precisión en la auditoría energética, por lo que en la fase de diagnóstico se consigue una simple aproximación que dispondrá si vale la pena continuar con las auditorías. La segunda fase del proceso, las auditorías tanto hídrica como energética, descubrirán qué parte del sistema tiene mayor margen de mejora y posteriormente el análisis coste-beneficio de cada medida determinará aquéllas que mejores oportunidades presenten.

Capítulo 4

Fase de análisis. Auditorías

4.1. Introducción

Acometido el diagnóstico, es momento de abordar la segunda fase del proceso de mejora propuesto, la fase de auditorías. Éstas (hídrica y energética) permiten cuantificar las pérdidas tanto de agua como de energía. Tal como se comprobó en el capítulo anterior, la fase de diagnóstico permite conocer la cantidad de energía perdida ($E_{sr} - E_{si}$). Ésta es la diferencia entre la energía suministrada por las bombas (de eje) más la natural, menos la energía ideal suministrada. La energía ideal es la que requiere el sistema para garantizar volumen demandado y presión mínima de servicio, sin olvidar la presión que se requiere para vencer los desniveles topográficos del sistema.

Esta segunda fase (Figura 4-1) permite saber dónde se dan esas pérdidas, dejando de ser una caja negra para convertirse en un mapa de ruta, pues aquellas causas que generan las pérdidas mayores serán las primeras sobre las que se deben plantear acciones y análisis coste-beneficio.

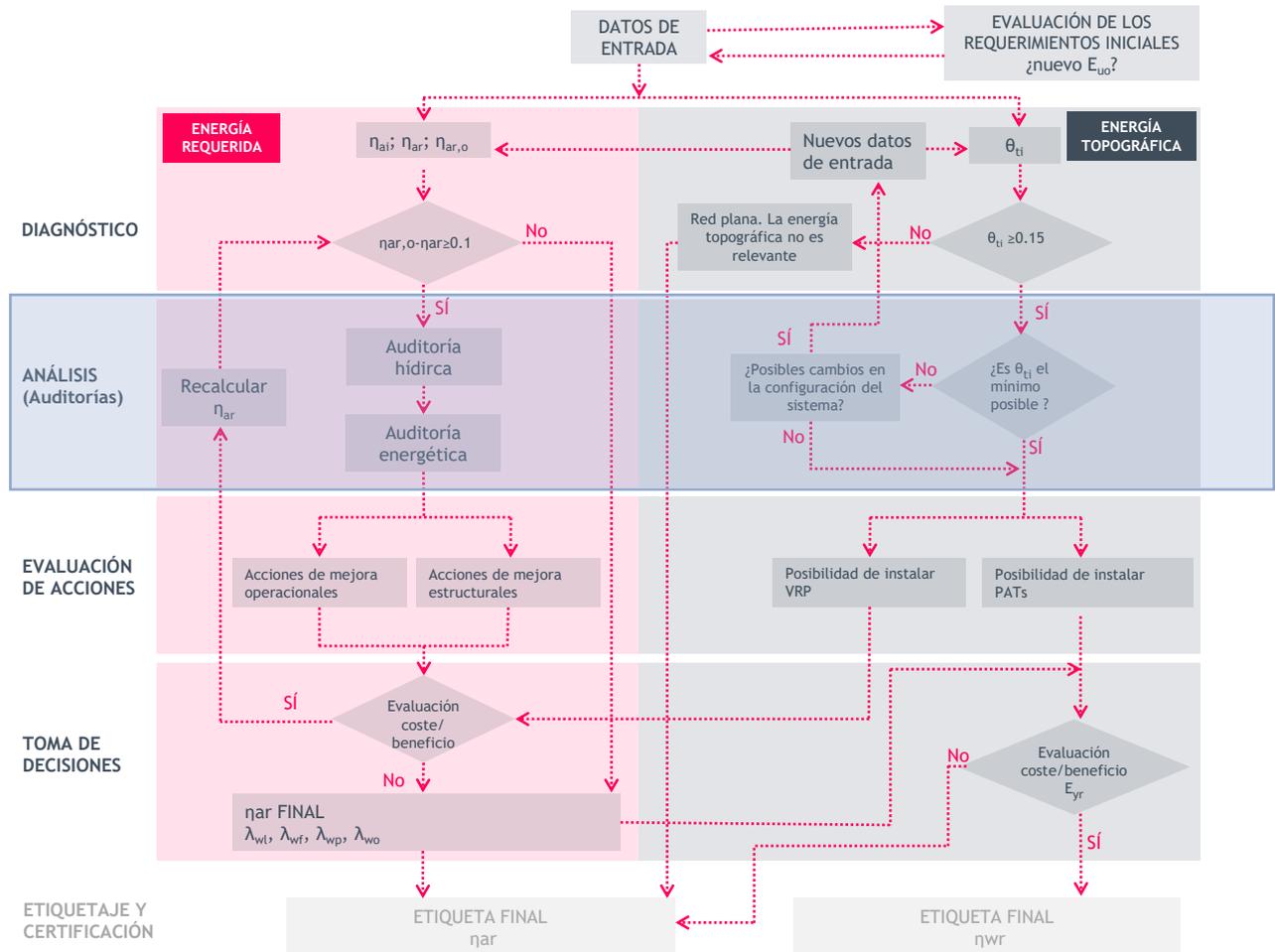


Figura 4-1: Diagrama de flujo para mejorar la eficiencia en un PWTS. Análisis (auditorías).

Se plantean en esta fase del proceso de mejora de eficiencia de un PWTS la auditoría tanto hídrica como energética. La auditoría hídrica, determinación de volúmenes, no solo es un paso previo y necesario para la auditoría energética, sino que es importante y clave por sí misma; si se desconoce el destino del agua que se inyecta (agua presurizada) difícilmente se va a poder optimizar la energía, pues es el agua quien la contiene, transporta e intercambia.

Enmarcado dentro de este trabajo y, de cara a facilitar la realización de las auditorías (hídrica y energética) de un sistema, se han desarrollado dos softwares. El primero, llamado ITAFugas, permite tanto evaluar como modelar las fugas en una red a presión, está basado en el método de evaluación de las fugas a partir de la simulación de la red en periodo extendido propuesto en Almandoz et al. (2005). El segundo, ITAEnergy, permite realizar la auditoría energética publicada por Cabrera et al. (2010) y revisada y completada en este trabajo. La auditoría energética se explica de forma detallada en el presente capítulo. Los manuales de ambos softwares se presentan en el Anexo 2 (ITAFugas) y en el Anexo 3 (ITAEnergy).

Una vez obtenidos los resultados de las auditorías se está en disposición de plantear acciones de mejora, pues cada una de las propuestas está enfocada a mejorar un problema concreto, por tanto la estrategia propuesta trata de localizar en primera instancia las deficiencias de un sistema para evitar esfuerzos innecesarios valorando todas las posibles acciones.

4.2. Auditoría hídrica

La auditoría hídrica consiste en determinar el destino del agua inyectada en el sistema desde sus diferentes fuentes. Lo que no se mide no se conoce, por tanto este proceso está estrechamente ligado a la obtención de una serie de valores de caudales que deben adquirirse por medio de contadores tanto domiciliarios como de entrada a los sectores, salidas de los depósitos, caudales bombeados, etc.

Se realiza a continuación una recopilación y valoración de la información disponible sobre este tema. Existen numerosas publicaciones que hacen referencia, por un lado a la determinación de las pérdidas de agua en las redes de distribución y por otro a las mejores estrategias para disminuirlas. Sirvan los siguientes puntos como guía general de alguna de estas publicaciones, es decir, un desarrollo de los conceptos básicos que deben tenerse en cuenta en la fase de análisis del proceso de mejora de la eficiencia desarrollado en este trabajo.

4.2.1. Sobre las pérdidas de agua

Una red es ineficiente desde cualquier ámbito (ambiental, económico y social) cuando posee grandes cantidades de pérdidas de agua. Es obvio que las pérdidas aparecen cuando se introduce un volumen de agua en el sistema (red de distribución) pero después se registra un volumen entregado a los usuarios inferior al inyectado. A la diferencia entre el valor del volumen inyectado y el registrado se le conoce como *Agua No Registrada* (ANR, o NRW de sus siglas en inglés). Estas pérdidas de agua pueden ser pérdidas reales debidas a defectos físicos en la red o pérdidas aparentes debidas a errores de medición o robos, es decir éstas últimas no son fugas del sistema físico, de hecho el agua se consume pero no se controla.

Las pérdidas de agua pueden llegar a representar un volumen importante del total inyectado en el sistema. Por ello, se puede encontrar desde sistemas muy eficientes en el que el volumen total de pérdidas (reales y aparentes) no alcanza el 10%, hasta sistemas muy ineficientes que superan el 50% del volumen inyectado. Para poder conocer el estado de la red desde el punto de vista de las pérdidas de agua, se hace imprescindible medir el volumen tanto en las entradas del sistema (se pague por ella o no) como en las salidas (agua entregada a los usuarios). Algunos países, incluso muy desarrollados como Inglaterra o Estados Unidos, no tienen implantados sistemas de medición universal, lo que obliga a estimar las demandas para poder diagnosticar el estado de sus redes, recurriendo generalmente a muestreos estadísticos significativos.

Las redes de distribución de agua están integradas por numerosos elementos sometidos a notables presiones, y por tanto, a esfuerzos mecánicos importantes. Esto hace que la probabilidad de fallo sea elevada. Por otro lado, las presiones que soportan las redes de agua son variables en el tiempo por lo que los esfuerzos mecánicos generados también lo son, esta variación en los esfuerzos mecánicos sufridos son los responsables de muchas de las roturas en las tuberías. Además es obvio que los materiales y montajes de hace unas décadas, cuando la mayoría de redes fueron ejecutadas, no sean tan fiables como debieran. La longitud del tendido de tuberías es muy importante, por término medio unos 3 km / 1000 habitantes. Este factor multiplicativo depende de la arquitectura de la ciudad, en ciudades con una elevada concentración urbana el factor puede disminuir hasta la unidad, mientras que en áreas residenciales de baja concentración puede llegar a valores de 8 km / 1000 habitantes. Muchos de esos kilómetros de tuberías tienen una edad considerable, por lo tanto la instalación de tuberías nuevas debería ser prioritaria pero la renovación de tuberías tiene un coste muy importante y muy poca visibilidad política.

Desde cualquier óptica las pérdidas de agua son inconvenientes y desde todas ellas deben ser estudiadas y consideradas por todos los agentes implicados en la gestión de los abastecimientos de agua (técnicos, políticos y agentes sociales). Desde la óptica ambiental, se detrae más agua del medio natural y se consume más energía, dado que se debe potabilizar y transportar toda el agua, se consuma o se pierda, conlleva la generación de gases de efecto invernadero (GEI), y por tanto una aceleración del cambio climático y la alteración del clima. Por tanto, las pérdidas de agua suponen un mal uso de ambos recursos, el agua y la energía. Desde la óptica económica, por los costes asociados que posee el agua, fijos como el pago de personal, o variables como la energía, los reactivos o la compra de agua en alta. Y desde la óptica social, las pérdidas de agua propician que la imagen de la empresa (cualquiera que sea su concesión) se deteriore, dado que la sensación que se transmite al usuario y que se corresponde con la realidad, es que no se tiene control sobre la actividad. Unas pérdidas de agua elevadas obliga a anticipar inversiones pues todo el sistema queda infradimensionado, ya que la demanda de éste es mayor a la supuesta y las instalaciones (captaciones, potabilizadoras, bombeos, etc.) pueden resultar insuficientes, aumentando la necesidad de nuevas inversiones.

4.2.2. Componentes del balance hídrico

La auditoría hídrica consiste fundamentalmente en determinar cuánta agua se introduce en el sistema y qué proporción de ésta se entrega finalmente a los usuarios. En la mayoría de abastecimientos, aunque sus gestores no realicen balances hídricos exhaustivos, suelen tener un orden de magnitud del estado de su sistema a partir del porcentaje de volumen fugado con respecto al inyectado. Lo que para ellos suele ser volumen fugado, es realmente volumen no contabilizado, dado que la referencia de volumen consumido o entregado a los usuarios que tienen suele provenir de la lectura de sus contadores de abonado, por lo que una mala lectura o

un mal funcionamiento de éstos desvirtúa directamente el valor del agua consumida. Por este motivo se habla de volumen incontrolado, suma del agua realmente fugada (pérdidas reales) y agua incontrolada consumida (pérdidas aparentes).

Pérdidas aparentes

Las **pérdidas aparentes** se corresponden, por tanto, con el agua consumida pero no registrada. Esto es por un lado debido a los subcontajes de los equipos de medición, y por otro al consumo no autorizado (robos o usos ilegales), o autorizado pero no registrado (algunos ejemplos: el volumen utilizado por la propia compañía para mantenimiento de la red, uso de hidrantes de incendio, etc.). Las pérdidas aparentes suelen representar entre el 0 y el 10% del volumen inyectado (Farley y Trow, 2003) aunque en algunos abastecimientos puede ser mayor, lo que debe conducir a un estudio en profundidad del parque de contadores. Por tanto, los componentes que forman parte de las pérdidas aparentes y sobre los que se deberá establecer estrategias para su evolución y control son:

- **Errores de medida en los contadores:** Como cualquier instrumento de medición los contadores de agua no son capaces de registrar con exactitud el volumen de agua consumido por un abonado, sino que tienen un error de medición asociado. En la actualidad los contadores están asumiendo un protagonismo cada vez mayor en la gestión de cualquier abastecimiento, debido al previsible aumento del precio del agua. Un mayor coste del agua implica un mayor impacto de los contadores sobre los ingresos del abastecimiento.

El correcto funcionamiento de un contador de agua depende tanto del propio contador (tecnología de la medición, clase metrológica, calidad en el proceso de fabricación, etc.) como de factores externo a él (calidad del agua, sólidos en suspensión, presión en la red, etc.). Pero independientemente de las características técnicas de cada tipo de contador, hay una serie de parámetros comunes a todos ellos que permiten la caracterización de los distintos aspectos de funcionamiento. Los denominados parámetros metrológicos están directamente relacionados con la incertidumbre (error en la medición) y con la delimitación y cuantificación de la medición (caudales de arranque). El error típico de un contador en uso suele estar en torno al 3%.

- **Consumos no autorizados:** Por un lado las tomas ilegales suponen puntos de extracción de agua, que no es contabilizada por el abastecimiento ya que no pasa por ningún contador de usuario, pero sí se contabiliza como caudal inyectado. Algunas de las prácticas fraudulentas más comunes son la conexión directa a una tubería mediante collarines o accesorios similares, la reconexión de acometida a contadores sin servicio, el uso de tomas de obra sin autorización, el uso de bocas de incendio, de riego u otras tomas municipales o la modificación de instalaciones interiores para habilitar tomas antes del contador o el bypaseo de éste. Es importante incidir en la dificultad de conocer la existencia de estas manipulaciones o su localización por parte de la empresa, debido al gran tamaño de los

abastecimientos, a la dificultad de acceder a las instalaciones privadas o al tiempo requerido para inspecciones aleatorias.

La manipulación de los equipos de medida busca disminuir el volumen registrado por los equipos o incluso anularlo. Son numerosas las técnicas empleadas por los usuarios para alterar la exactitud de los aparatos, además, a medida que se desarrollan nuevos sistemas antifraude surgen nuevos métodos para neutralizarlos.

- Existe otra práctica que sin ser ilegal puede tener importante repercusión en las pérdidas aparentes, se trata de los **errores asociados la manipulación de datos**, término conocido como *data handling*. La justificación es inmediata, la gran cantidad de equipos instalados, el gran volumen de información manejada y los errores humanos, hacen que el proceso de toma de datos pueda suponer un punto débil para una correcta auditoría hídrica del sistema.

Sin duda la mejor forma de reducir las pérdidas aparentes de agua es adoptar estrategias activas que permitan detectar y evaluar de forma continua en el tiempo cada una de sus componentes. En el caso de los errores de medición, es necesario realizar una adecuada gestión del parque de contadores, ésta consiste en un conjunto de actuaciones que permiten mejorar la eficiencia en la medición para minimizar el error global del parque. Se trata pues, de un proceso condicionado por un elevado número de variables. En primer lugar es imprescindible analizar económicamente distintos escenarios para elegir la solución óptima desde el punto de vista económico, en este caso el principal condicionante es el precio del agua. Por otro lado, una de las decisiones más importantes y al mismo tiempo más complejas de la gestión del parque es la selección del contador a instalar en cada abastecimiento, y a este tema se han dedicado muchos estudios (Arregui et al, 2006). Una vez seleccionado el modelo, hay que ser conscientes que la fabricación de contadores es una actividad compleja y no está exenta de fallos, además de la propia problemática en su transporte al tratarse de elementos tan sensibles; el control de calidad a la recepción permite localizar partidas defectuosas por lo que dada la importancia de este control, actualmente numerosos abastecimientos están centrando sus esfuerzos en realizar este tipo de verificaciones.

Por otro lado, la detección de tomas ilegales o contadores manipulados, es generalmente una tarea compleja y costosa, ya que requiere de la inspección de las instalaciones por parte de los técnicos de la empresa. Complementariamente, la utilización de datos históricos de consumo, pautas normales de uso o incluso datos de otros servicios como el consumo eléctrico, pueden servir para establecer alarmas o sugerir instalaciones a ser inspeccionadas por posibles comportamientos anómalos. A este respecto de nuevo se hace patente la utilidad de estudios de usos finales, ya que permiten conocer y establecer comportamientos usuales de los usuarios, por lo que las diferentes anomalías (robos, fugas interiores, tomas ilegales, etc.) son más fácilmente detectables.

Una vez instalados y comprobados los equipos, es preciso realizar un mantenimiento durante su vida útil, teniendo en cuenta las particularidades de cada tipo de contador, usuario e instalación. Esta medida cobra especial relevancia en grandes consumidores y para contadores no mecánicos o aquéllos equipados con sistemas de telelectura. Otra actuación a valorar, es la realización de evaluaciones continuas sobre el comportamiento del parque de contadores, ya que permite ajustar los modelos y las previsiones, por ejemplo la degradación acelerada de alguno de los modelos puede condicionar la toma de algunas decisiones. Además será importante localizar aquellos contadores que estén parcialmente bloqueados o totalmente parados, en los que lógicamente el error de medición será muy elevado, cercano al -100%. En este sentido, si el abonado está conectado directamente a red, el bloqueo del contador provocará una pérdida de carga muy importante, y notará una bajada de presión significativa, por lo que es probable que avise a la compañía. En cambio, si el abonado tiene instalado el contador aguas arriba de un depósito domiciliario, el abonado no notará disminución en la presión, por lo que resulta más difícil detectar la anomalía. Finalmente, el ciclo de cada contador termina con un adecuado programa de remplazos, priorizando aquellos equipos cuya sustitución resulte más interesante desde el punto de vista económico.

Pérdidas reales

Las **pérdidas reales** representan el volumen de agua que se pierde a través de defectos de la red, bien sea en tuberías, acometidas o en menor medida en depósitos de almacenamiento. Generalmente del conjunto de pérdidas reales se puede hacer una primera valoración de que el 70% se localizan en acometidas y el 30% en tuberías. La presencia de una falla en un punto de la tubería posibilita una transformación energética no prevista, porque parte de la energía elástica almacenada en el conjunto del sistema (agua y tubería), se transforma en energía cinética del agua que abandona la tubería en un punto no deseado. Pero no solo las características de las fallas determinan la importancia de las fugas, sino que depende en gran medida de la energía elástica disponible en ese punto, es decir de la presión. Con el objetivo de controlar y reducir las fugas es crucial conocer las causas que las provoca. En la práctica es imposible controlar todos los factores de riesgo, ya que además de ser muchos y de muy diversas características, las grandes longitudes de las redes reales lo hacen inviable. Una posible clasificación de las causas que pueden provocar la existencia de fugas es:

- **Causas estructurales:** El origen estructural de una falla es debida al deterioro del material de la tubería o a defectos intrínsecos de la instalación. Es consecuencia de pérdida en su capacidad estructural cuando el material está trabajando en condiciones normales. Por ejemplo, la escasa profundidad de enterramiento de la tubería, el anclaje insuficiente en cambios de dirección, un material inadecuado capaz de convivir en algunos casos con suelo agresivo o corrosión, un espesor insuficiente o una mala selección en el timbraje de la tubería, juntas de unión inadecuadas, una deficiente instalación o el diámetro. Es un hecho contrastado que las tuberías de menor diámetro

presentan más roturas. Esto se debe por un lado a cuestiones de resistencia mecánica, pero también porque las tuberías de diámetros entre 10 y 200 mm son más habituales, lo que implica que la probabilidad de rotura en este tipo de diámetros también es mayor, dado que soportan más perturbaciones por obras en las inmediaciones que las de mayor diámetro, a las que se suele prestar más atención y cuidado, entre otras posibles causas (Pelletier et al., 2003).

Las causas estructurales deben examinarse en origen, es decir en la fase de ejecución.

- **Causas externas.** Generalmente son ajenas a quienes proyectan, instalan o gestionan la red. Pero en buena medida se pueden evitar analizando las circunstancias con las que va a convivir la tubería. Entre este tipo de causas se encuentra por ejemplo, una carga externa superior a la prevista, la absorción en el caso de tuberías metálicas de corrientes externas derivadas, la congelación del agua por bajas temperaturas, asentamientos diferenciales que modifiquen las condiciones iniciales de la tubería bien por diferente compactación o filtraciones de agua de lluvia o bien por la presencia de agua procedente de las capas freáticas o de las propias fugas de la tuberías, o excavaciones realizadas para instalar otras redes de servicio en las proximidades de las tuberías.
- **Causas internas.** Son aquéllas que originan roturas de tuberías por una ineficiente operación del sistema. Las causas internas más frecuentes son por ejemplo, variaciones de presión importantes. En muchos casos, los valores de presión, siempre que no sean excesivos, pueden ser asumidos por las tuberías, pero los cambios de presión provocan permanentemente variaciones en los esfuerzos mecánicos que deben absorber tanto las tuberías como sus anclajes. Por otro lado, los golpes de ariete, causados por cierres de válvulas más rápidos de lo previsto, o por el funcionamiento de grupos de presión, también favorecen la fatiga de uniones y otros elementos de la instalación. Además de los cambios de presión, variaciones de velocidad excesivas provocan cargas dinámicas, de mucha menor entidad que las variaciones de presión pero que en determinadas circunstancias pueden causar importantes daños, como la cavitación en válvulas. Este tipo de causas se pueden minimizar operando el sistema del modo más estable posible.
- **Causas debidas a su historial de servicio.** En el caso de las tuberías, este historial se concreta en la relación de antecedentes de roturas y averías, incluidas las fechas de su reparación. Esta información se completaría con el tipo de rotura producida, la mayor o menor calidad de las reparaciones efectuadas y la localización de las roturas habidas. Es evidente que con las reparaciones la resistencia estructural de las tuberías disminuye de manera notable, razón por la que éstas se consideran una causa más.

Independientemente del motivo que origine la fuga, el volumen fugado por ésta depende del tamaño de la falla, del tiempo de actividad, es decir del tiempo que esté fugando agua, y de la presión en el punto en que se localiza. Por lo que, indirectamente las estrategias para reducir las fugas están enfocadas a disminuir los tres factores de los que depende la fuga. Esta síntesis de estrategias ha sido popularizada por el grupo de especialistas de la IWA, en 2000, el IWA *Water Loss Task Force* (grupo de trabajo en pérdidas de agua de la IWA) definió los cuatro métodos

principales de intervención para combatir las pérdidas de agua reales tal como se ilustra en la Figura 4-2: gestión de la presión, control activo de fugas, rapidez y calidad de las reparaciones, y gestión de la infraestructura. Todas ellas enfocadas a disminuir el volumen fugado, excepto la gestión de la presión que, de no realizarse correctamente puede aumentarlas, de ahí el doble sentido de la flecha (ver Figura 4-2). Así pues, y aunque en un capítulo posterior se tratará en profundidad alguna de las estrategias principales de reducción de fugas reales, se comenta brevemente a continuación cada una de las estrategias:

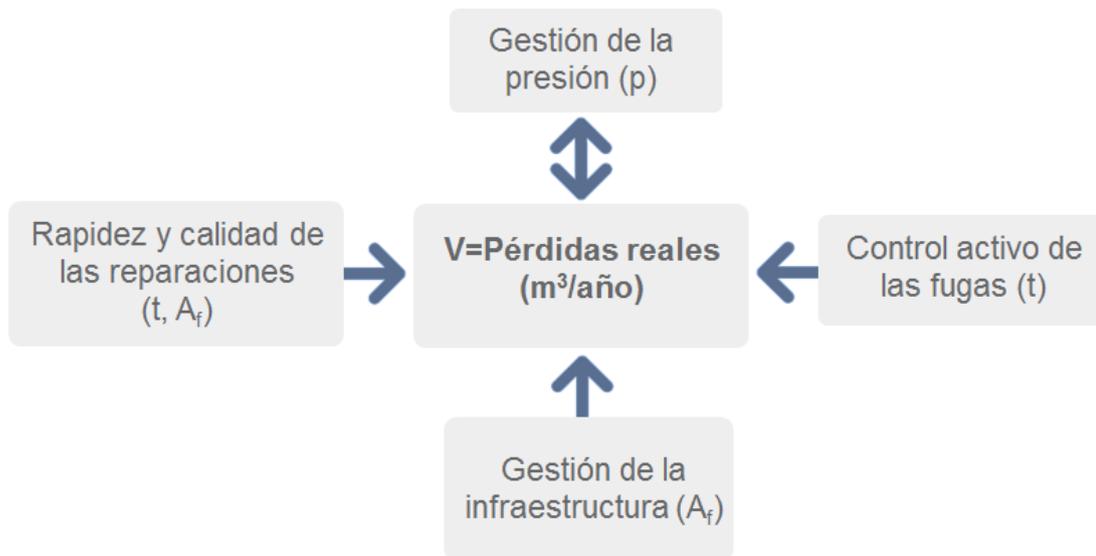


Figura 4-2: Síntesis estrategias orientadas a la reducción de fugas (IWA, 2000).

Las cuatro estrategias inciden en al menos una variable de las que intervienen en la expresión del volumen fugado, el tiempo.

- Lo que se conoce como **control activo de fugas**, trata de minimizar el tiempo que la fuga está activa, localizándola cuanto antes para repararla de inmediato.
- **La rapidez y la calidad de las reparaciones** supone minimizar el tiempo desde que se conoce la existencia de la fuga, detectada y ya notificada, hasta su completa reparación.
- La **gestión de la infraestructura** se refiere a la rehabilitación y/o renovación de las tuberías que más problemas pueden causar, a partir de un análisis multicriterio. Es decir la tubería que debe ser cambiada en primer lugar se decide analizando de forma conjunta distintas circunstancias que concurren en ella, como relevancia, edad, historial de roturas, etc. Aunque la GPI (Gestión Patrimonial de Infraestructuras) es un tema con poco recorrido en la industria del agua, en las últimas dos décadas ha despertado un gran interés motivado principalmente por el envejecimiento de las redes. Los países con un desarrollo más temprano en este tema fueron Australia y Nueva Zelanda con la creación de organismos como el *National Asset Management Streering* (NAMS) y el *Institute of Public Works Engineering Australia* (IPWEA), que desarrollan conocimientos y manuales de buenas prácticas. El documento *International Infrastructure Management Manual*

desarrollado por ambas instituciones constituye la principal referencia en el ámbito de la GPI (NAMS Group, 2002). Tradicionalmente la gestión de infraestructuras se ha llevado a cabo atendiendo a dos criterios; por un lado la condición de los bienes, es decir asignando a cada elemento una vida útil para prever cuando fallará y por otro el riesgo de fallo, que consiste en establecer para cada bien su riesgo de fallo y las posibles consecuencias derivadas de éste. Sin embargo, los elementos que conforman los sistemas de agua y saneamiento no se comportan como elementos individuales sino como un conjunto, por lo que el concepto de vida útil, aplicable sólo a elementos individuales no es válido para las infraestructuras. La gestión patrimonial de infraestructuras abarca todos los bienes de la organización, desde activos económicos, recursos humanos, hasta instalaciones y la propia infraestructura (Cabrera et al, 2008).

- La **gestión de la presión** tiene gran importancia por su eficacia, aunque en el caso de no realizarse correctamente es la única que conlleva un aumento del agua fugada. En la *Guía para la reducción de las pérdidas de agua. Un enfoque en la gestión de la presión*, elaborada por GIZ y VAG-Armaturen, junto con varios institutos de investigación alemanes y otros grupos europeos e internacionales se presentan en detalle algunas de las estrategias comentadas y se ofrecen cifras sobre las pérdidas de agua a nivel mundial (GIZ, 2011). Por ejemplo en este documento se presentan los principales beneficios de la gestión de la presión desde varios puntos de vista (Tabla 4-1).

Tabla 4-1: Beneficios de la gestión de la presión (GIZ, 2011).

Gestión de presión: reducción de presiones promedio y máximas en exceso						
Beneficios para la conservación		Beneficios para la empresa de agua			Beneficios para el cliente	
Consumo reducido	Caudales reducidos de fugas y reventones	Costes de reparación reducidos en las acometidas	Renovaciones diferidas y mayor vida de activos	Coste reducido del control activo de fugas	Menos quejas de clientes	Menos problemas en las tuberías y aparatos de los clientes

Independientemente de cuál sea la estrategia requerida para su reducción, alguna de ellas se verá en detalle posteriormente, lo que es innegable son los problemas que se derivan de la existencia de fugas y algunas de las causas que conducen a esta situación.

El agua es un recurso escaso y fundamental, con la tasa de uso actual, para el año 2030 los requerimientos de agua se situarán en un 40% por encima de lo actualmente disponible. De hecho, por primera vez se presenta en el informe del 2015 del Foro Económico Mundial la *escasez de agua* como uno de los diez principales riesgos mundiales (en octavo lugar cuando se

analiza su probabilidad de ocurrencia, y el primero por su impacto) (Figura 4-3, Foro Económico Mundial, 2014).

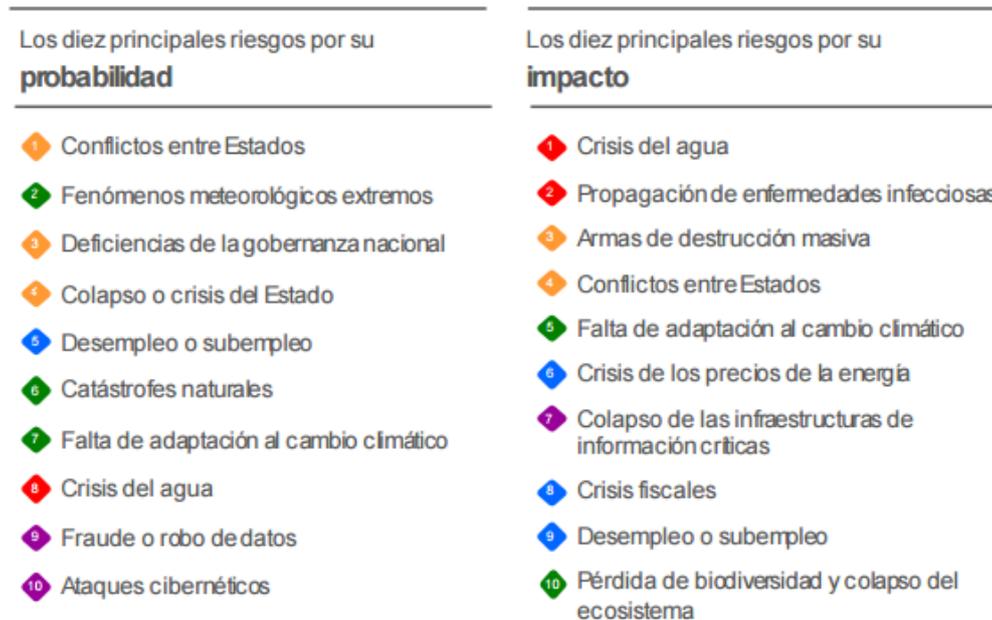


Figura 4-3: Probabilidad e impacto de los diez riesgos globales (Global Risk Perception Survey, 2014. Foro Económico Mundial)

Existen importantes pérdidas de agua en los sistemas de distribución. Naciones Unidas ha señalado las fugas de agua como un problema significativo que provoca una gran pérdida de agua a nivel mundial. El Banco Mundial estima que cada día 88 billones de litros de agua tratada se pierden globalmente desde las fugas existentes en las redes (32 billones de metros cúbicos al año). Se estima que el agua no registrada (NRW o ANR) se sitúa entre el 25% y el 50% del total del agua distribuida a nivel mundial y entre el 30% y el 40% del agua tratada (11.500 millones de m³) en Europa, llegando a más del 50% en algunos países de Europa del Este y al 60% en el sur de Italia (Festa et al, 2009). El 70% de estas pérdidas se dan en lo que la IWA denomina “fondo de fuga”, son aquellas fugas que en su mayoría no son detectables, y que se originan en pequeñas grietas y agujeros. Estas elevadas cantidades de agua no registrada elevan no sólo las pérdidas de ingresos, sino el coste de todo el ciclo de suministro, la captación, el transporte y la distribución en términos energéticos y de productos químicos. Las causas de esta situación, independiente de la clasificación que se haga de ellas, son claras:

- **Infraestructuras obsoletas.** De acuerdo con la Plataforma Europea del Agua, aproximadamente el 50% de la población europea vive en zonas urbanas con infraestructuras envejecidas. Algunas de las grandes ciudades de Europa poseen estructuras de agua de más de 100 años y dado que no existe una normativa específica que regule la necesidad de inversión en renovación, se debe valorar desde el punto de vista de la utilidad de poseer infraestructuras adecuadas y seguras. En España, el estado

de la cuestión no mejora, se cuenta con más de 155.000 km de red de abastecimiento y más de 140.000 km de saneamiento, además de cientos de estaciones de tratamiento de agua potable y de depuración de aguas residuales, desaladoras, estaciones de bombeo y más de 1.200 grandes presas (MMA, 2006). Pero obviamente estas infraestructuras envejecen, y la inversión en reparación y mantenimiento ha menguado considerablemente en los últimos años, a pesar de que el envejecimiento, lógicamente, aumenta. En los Presupuestos Generales del Estado, el capítulo de inversiones reales en los programas de gestión, infraestructuras y calidad del agua, pasó de 4.300 M€ en 2008 a 1.500 M€ para el año 2012, y las inversiones de las comunidades autónomas y gobiernos locales han seguido tendencias similares.

- **Falta de soluciones para la detección y la reparación.** No todas las fugas son visibles desde la superficie, de hecho muchas fugas pueden permanecer ocultas y activas bajo tierra durante muchos años, lo que supone la pérdida de miles de litros. En la situación actual, debido a la limitación de los métodos disponibles de detección (tecnologías acústicas y monitorización de la medición, principalmente), muchas compañías se deben limitar a que la fuga se haga visible con el fin entonces de excavar y repararla. Opuesto a este enfoque reactivo, existen métodos de detección de fugas (control activo de fugas, encontrar y reparar) que no pueden ser empleados para reducir las fugas por debajo de cierto umbral, ya que se convierten en no rentables. Por estos motivos, entre otros, los altos niveles de fugas son todavía frecuentes a nivel mundial.
- **Estancamiento de los precios del agua.** La Directiva Marco del Agua, ya introdujo el principio de recuperación de costes en los servicios de agua, estableciendo que los precios del agua deben permitir recuperar los costes de los servicios de agua incluidos los medioambientales. En un futuro cercano en el que el precio del agua refleje el coste real del agua, la reducción de los niveles de fugas se convertirá en esencial.

4.2.3. Introducción a la auditoría hídrica e indicadores

Los resultados de las auditorías o balances hídricos, son sencillamente grandes volúmenes de agua ordenados adecuadamente. A partir de la desagregación de pérdidas (reales y aparentes) se puede llegar a definir tres rendimientos:

- **El rendimiento global** ($\eta_g = V_r/V$), cociente entre el volumen registrado y el volumen inyectado. El valor más sencillo de obtener, pues únicamente requiere la lectura de los contadores de los usuarios y el valor del volumen inyectado en el sistema.
- **El rendimiento de la red** ($\eta_r = V_s/V$), cociente entre el volumen suministrado o consumido por los usuarios y el volumen inyectado. Este volumen consumido es el resultado de la suma del volumen registrado (facturado en su mayoría) y el incontrolado consumido (pérdidas aparentes), que contempla los errores en la medición de los contadores y los posibles robos de agua, además del caudal consumido pero que ni se registra ni se

factura, como puedan ser en algunos abastecimientos los destinados al riego de jardines u otros usos municipales.

- **El rendimiento de la medición** ($\eta_m = V_r/V_s$), cociente entre el volumen registrado y el realmente consumido por los usuarios. Éste determina directamente lo bondad de la medición de los contadores, además de aportar una idea, una vez determinado el posible subcontaje, de los robos de agua.

El valor adoptado por cada uno de los rendimientos, puede dar una idea de hacia dónde dirigir esfuerzos y recursos. Disminuir las pérdidas reales (aumentando η_r) exige prestar atención al estado de la red de distribución, mientras que disminuir las pérdidas aparentes (aumentando η_m) exige mejorar la gestión y sobre todo prestar mucha más atención al parque de contadores. Por tanto, conocer el reparto del caudal inyectado al sistema es clave a la hora de establecer las estrategias de mejora. Aunque habitualmente el reparto suele ser 70-75 % de fugas y 30-35 % pérdidas aparentes, cada caso es diferente y conviene saberlo con precisión para priorizar las estrategias de acuerdo a las necesidades concretas.

Hasta hace poco, el uso del valor del rendimiento como medida de control, era lo más habitual, pero erróneo como se verá a continuación. En el año 2000 la IWA propuso, unos indicadores alternativos. Los indicadores propuestos por la IWA relacionan las causas (factores que propician las fugas) con los efectos (pérdidas de agua). Esto no lo hacen los rendimientos habituales que sólo combinan entre sí los efectos, relacionando únicamente volúmenes de agua. Pero antes de evidenciar el inconveniente de recurrir a los rendimientos tradicionales, se presenta el balance hídrico de la IWA (IWA, 2000).

Tabla 4-2: Auditoría hídrica (IWA, 2000)

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		

El criterio inicial más conveniente se basa en la medición universal, es decir medir el agua consumida por los usuarios con los correspondientes contadores, éste se considera el primer nivel del balance, el caudal registrado y el complementario es el caudal incontrolado. La IWA no sigue este criterio, dado que su criterio no es la medición sino el consumo. Esto se debe a que en algunos países la medición universal no es obligatoria. Existe una componente económica destacable en el balance propuesto por la IWA, pues le dedica la última columna a este asunto de extraordinaria importancia económica, lo que finalmente factura, pero irrelevante desde la óptica técnica.

La propuesta de la IWA está enfocada a discriminar el volumen facturado del no facturado, mientras que otras resuelven la auditoría análogamente a la ecuación de continuidad (Almandoz et al., 2005). El objetivo fundamental de la auditoría propuesta por Almandoz, es determinar las pérdidas de agua a partir de la discriminación de sus dos componentes; las pérdidas reales (fugas) y el caudal consumido pero no medido por los contadores (pérdidas aparentes). A pesar de que esta metodología requiere del modelo matemático para su consecución, destaca el planteamiento en la obtención de las pérdidas reales y aparentes. Se emplea en numerosos abastecimientos del mundo, siendo una propuesta complementaria a la auditoría más universal definida por la IWA.

Tabla 4-3: Auditoría hídrica (Almandoz et al., 2005)

Caudal entrante en el sistema, Q	Caudal medido por los contadores de los abonados, Q_m		Consumo doméstico	
			Consumo comercial	
			Consumo industrial	
			Consumo oficial	
	Caudal incontrolado Q_u	Caudal consumido no medido. Pérdidas aparentes, Q_{uc}		Consumo no medido en contadores, errores de medida, Q_{uce}
				Consumo facturado mediante cuota fija, (agua no medida)
		Consumo de hidrantes de incendios, descargas de la red, tomas ilegales (agua no medida)		
	Caudal fugado. Pérdidas reales, Q_{ur}		Fugas físicas en tuberías de distribución y acometidas	

La no idoneidad del uso de los rendimientos que tradicionalmente se han utilizado (rendimiento global, de la red y de la medida), reside principalmente en el hecho de que prescinden del origen de pérdidas, pero hay más razones. Las fugas de una red son un volumen de agua por unidad de tiempo. Con una demanda de agua mayor, al aumentar el caudal circulante y disminuir la

presión, el valor de la fuga disminuye, dicho de otro modo, los rendimientos dependen entonces del consumo de agua que hagan los abonados, a mayor consumo mayor rendimiento y viceversa, por tanto asociando la eficiencia de la red a los rendimientos ésta queda ligada al agua consumida. También queda reflejada la falta de solidez de estos indicadores en los sistemas sometidos a cortes de agua, ya que aparentemente en sistemas con intermitencia el rendimiento mejora al reducir el tiempo de suministro, dado que las fugas también disminuyen. Por tanto, los cocientes entre los distintos volúmenes del balance hídrico, no reflejan correctamente el estado del sistema ni las mejoras que puedan introducirse.

La IWA a través de su manual de buenas prácticas (Alegre et al., 2006) define hasta 170 indicadores de gestión para redes de abastecimiento, agrupados en recursos del agua, de personal, físicos, operacionales, calidad de servicio y financieros. De entre los indicadores que la IWA propone destacan tres:

- I / acometida-hora: (litros por acometida y hora), este indicador relaciona las fugas con uno de los factores de riesgo más importantes, el número de acometidas y el tiempo. Al incluir el tiempo en su definición, el valor del indicador es el mismo con independencia de que se interrumpa el suministro.
- m³ / km·hora: (metros cúbicos por kilómetro y hora) este indicador relaciona de nuevo las fugas, esta vez en metros cúbicos, con otro factor de riesgo relevante como es la longitud de la red y el tiempo.
- IFE (ILI en inglés): El *índice de fugas estructural* (IFE) o *Infrastructure leakage index* (ILI), es probablemente el indicador más ambicioso, dado que incluye una gran cantidad de factores de riesgo intrínsecos al sistema, como el número de acometidas, la longitud de la red y el tiempo, además de la longitud de las acometidas y la presión de suministro. Conceptualmente, el IFE muestra en qué situación se encuentra un abastecimiento, desde el punto de vista de las pérdidas de agua, en comparación con la mejor situación posible en la que se podría encontrar. Se puede decir que el IFE no compara un abastecimiento con otro sino con la mejor versión de sí mismo si se dedicara todos los recursos de la manera más eficiente a reducir las fugas. Numéricamente, el cálculo del IFE es muy sencillo, pues se reduce a la siguiente ecuación:

$$\text{IFE} = \frac{\text{VIF}}{\text{UMF}} \quad (4-1)$$

donde:

VIF (Volumen Incontrolado Fugado) representa las pérdidas de agua que existen en un sistema determinado en el momento actual, expresadas en litros/día/acometida.

UMF (Umbral Medio de Fugas) representa el nivel mínimo de pérdidas hasta el que sería técnicamente posible llegar en dicho sistema dadas sus características y condiciones, expresado en litros/día/acometida.

Como resultado de la ecuación (4-1), el IFE muestra simplemente cuántas veces es peor (mayor) la cantidad de fugas de un sistema con respecto a la que tendría en su situación ideal. La clave del IFE es, evidentemente, el cálculo del denominador, es decir la cuantificación de esa mejor situación posible. La expresión 4.2 trata de dar respuesta a ese cálculo:

$$UMF = \frac{(A \cdot Lt + B \cdot Na + C \cdot La) \cdot p}{Na} \quad (4-2)$$

donde:

A: es un parámetro fijo de valor igual a 18.

Lt: es la longitud total de las tuberías de distribución de la red, expresada en km.

B: es un parámetro fijo de valor igual a 0,8.

Na: es el número de acometidas del sistema.

C: es un parámetro fijo de valor igual a 25.

La: es la longitud total de las acometidas de la red, expresada en km.

P: es la presión promedio de la red, expresada en mca.

Desde la óptica conceptual es un excelente indicador cuya debilidad reside precisamente en estos coeficientes (A, B y C) que ponderan la importancia de cada uno de los factores de riesgo en el resultado final. Así por ejemplo, aumentar A supone dar más importancia a las pérdidas en las tuberías principales, aumentar B equivale a maximizar el riesgo de las uniones de las acometidas, mientras que C pondera el riesgo de las acometidas propiamente dichas. En consecuencia, un abastecimiento puede resultar beneficiado en función de los valores que se adopten para estos coeficientes. Los valores adoptados para estos coeficientes (18, 0,8 y 25, respectivamente) son valores justificados a partir del análisis de la ponderación de los factores de riesgo en 27 redes de 20 países diferentes realizados por la IWA.

Por tanto, este indicador aunque puede ser discutido, aporta una innegable visión sobre el estado de los abastecimientos, y probablemente sea el indicador más utilizado para la comparación de redes de suministro. Los valores aceptables, diferenciando entre países desarrollados o en vías de desarrollo, se muestran en la Tabla 4-4 (Liemberger, 2005). Se propone una clasificación de los niveles de fugas en cuatro categorías, dependiendo del valor que tome el IFE:

A: Excelente. No requiere ningún tipo de intervención.

B: Buena. No requiere ninguna acción urgente, aunque debe ser monitorizado cuidadosamente.

C: Pobre. Requiere una atención especial.

D: Malo. Requiere intervenciones inmediatas para la reducción del nivel de fugas.

Tabla 4-4: Valores del IFE en países en desarrollo y en vías de desarrollo (Liemberger, 2005).

		IFE	Litros /acometida/día				
			10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
Países desarrollados	A	1-2		<50	<75	<100	<125
	B	2-4		50 – 100	75 – 150	100 – 200	125 – 500
	C	4-8		100 – 200	150 – 300	200 – 400	250 – 500
	D	>8		>200	>300	>400	>500
Países en vías de desarrollo	A	1-4	<50	<100	<150	<200	<250
	B	4-8	50 – 100	100 – 200	150 – 300	200 – 400	250 – 500
	C	8-16	100 – 200	200 – 400	300 – 600	400 – 800	500 – 1000
	D	>16	>200	>400	>600	>800	>1000

Esta evaluación del IFE no es la única realizada. McKenzie et al. (2007) muestra el IFE obtenido en 25 países. El informe del comité de AWWA (2003) también recomendó directrices generales para el nivel objetivo del IFE en la ausencia de un nivel económico específico del sistema de fugas (ELL). Estas directrices se resumen en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Directrices generales para el valor objetivo del IFE (AWWA, 2003).

Rango del IFE	Consideraciones acerca del origen del agua	Condiciones de operación	Consideraciones económicas
1,0 - 3,0	Disponibilidad de los recursos muy limitada.	Requiere aumento de la oferta y aumentar los diámetros de la red.	El agua es difícil de obtener y es cara; los ingresos por la venta del agua no pueden aumentar, bien por la existencia de un organismo regulador o por un bajo beneficio por volumen consumido.
3,5 – 5,0	Los recursos permiten cubrir las necesidades a largo plazo. Requiere una reducción del nivel de fugas.	Requiere aumento de la oferta y se exige un control de fugas.	El agua se puede obtener con un gasto razonable; se puede incrementar el precio del agua y éste será tolerado por los consumidores.
5,0 – 8,0	El agua se obtiene fácilmente y es de calidad.	Las redes son inmunes a cortes en el abastecimiento.	El agua se puede obtener fácilmente; el coste del agua es bajo

> 8,0	Aunque las consideraciones operacionales y económicas pueden permitir un indicador mayor que 8.0, un elevado nivel de fugas no representa una utilización adecuada del agua como recurso. Por tanto, representa una situación desalentadora, y se ha de intentar reducir las fugas a corto plazo.
-------	---

4.2.3.1. Realización de la auditoría hídrica

Como se ha comprobado, la auditoría hídrica es el primer paso hacia la eficiencia en la gestión de redes de agua. Se trata de la consecución de una serie de etapas en la determinación de los diferentes volúmenes trasegados por la red, que requiere el uso de recursos tanto técnicos como humanos. En general, para cualquiera de las auditorías propuestas, las etapas a desarrollar son similares, bien diferenciando entre volumen facturado y no facturado, como es el caso de la IWA o entre volumen medido e incontrolado. En ambos se requiere identificar realmente qué volumen de agua se corresponde con fugas reales. Para ello uno de los métodos de discretización más extendidos es el método de los flujos nocturnos (*Night Flow Method, NFM*).

Método de los flujos nocturnos

A continuación se describe de forma general las principales características de este método. Se trata de una metodología ampliamente extendida y utilizada por la mayoría de abastecimientos que introducen la determinación de fugas entre su gestión. Por este motivo, es conveniente recordar en qué consiste a partir de la extensa bibliografía disponible sobre este método.

El NFM nace a raíz de las propuestas realizadas por el Grupo de especialistas en Pérdidas de Agua de la IWA, dentro de los que se conoce como control activo de fugas (ver Figura 4-2), que trata de minimizar el tiempo que una fuga que no muestra signos visibles está activa, localizándola cuanto antes. Esta metodología, presentada inicialmente por la *United Kingdom Water Industry Research- UKWIR*, en 1994, está desarrollada en una serie de informes agrupados bajo el nombre de *Managing Leakage*. Esta serie de recomendaciones, que inicialmente se desarrolló para mejorar la gestión de algunos abastecimientos de Reino Unido, se popularizó a nivel mundial debido a su simplicidad, llegando a ser adoptada por la IWA en su *Manual de buenas prácticas* para el control activo de fugas.

En la actualidad, éste es uno de los métodos más utilizados, sobre todo en situaciones en las que no se dispone de datos suficientes de la red, es el caso de abastecimientos que poseen un pobre sistemas de control e información (McKenzie, 2001). Esto se debe a que su formulación sólo requiere la medición directa a la entrada del sistema y en el AZP (Average Zone Pressure), además de que no necesita de un modelo matemático.

El método requiere definir una hora objetivo, ésta por simplicidad es el momento donde el caudal consumido es mínimo, de esta manera la medición o estimación del consumo es más exacta, además se asume que al existir un menos consumo, la presión en la red será máximo por lo que

también lo será el volumen fugado. Debido a estas dos características, en esta hora concreta el caudal inyectado se puede desagregar fácilmente.

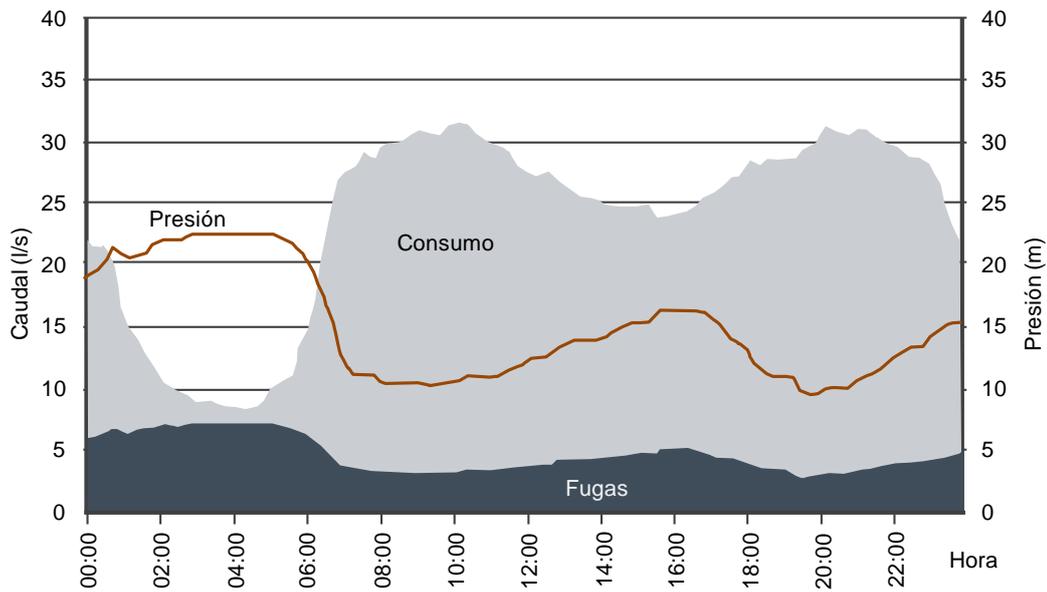


Figura 4-4: Modelo de fugas basado en el NFM (Puust et al., 2010)

De acuerdo con esto se asume que la mejor hora para efectuar este tipo de análisis es entre las 2 y las 4 de la mañana (McKenzie, 2001; Lambert, 2002; Thornton, 2008). A estas horas en la que la mayoría de gente duerme, los consumos son algo excepcional, y los consumos intencionados por ejemplo de usuarios comerciales o industrias, serán pocos y fácilmente localizables.

De acuerdo con esta metodología, el caudal mínimo nocturno está formado por una serie de términos (Figura 4-5), los cuáles se han ido reformulando en estos últimos años, éste se disgrega entre el entregado a los consumidores y las pérdidas en la red de distribución (UKWIR, 1994).

Caudal mínimo nocturno (MNF)	Caudal entregado a los consumidores	Uso intencionado consumidores	Consumo excepcional
			Consumo doméstico
			Consumo no doméstico
	Pérdidas en la red de distribución	Fugas nocturnas interiores	Fugas nocturnas totales
		Fugas en roturas comunicadas y no comunicadas	
	Fugas latentes		

Figura 4-5: Componentes del caudal mínimo nocturno (UKWIR, 1994)

Por lo que el caudal fugado, es el resultado del balance de agua realizado a la hora del caudal mínimo nocturno, t_{mnf} , según el caudal de fugas se obtiene como diferencia entre el inyectado en el sector hidrométrico y el consumo nocturnos de los usuarios. Una vez obtenido el caudal fugado en la hora del mínimo nocturno se puede extrapolar su valor al resto de las horas por medio de un factor multiplicador conocido como factor hora-día (*Hour to Day Factor* o *HDF*). Cabe destacar, que el volumen fugado total a lo largo del día será inferior a 24 veces el caudal fugado en la hora de mínima demanda, ya que el aumento de la demanda conlleva una reducción de la presión y por tanto una disminución del caudal fugado.

En términos generales el factor hora-día representa el cambio a lo largo del día del caudal fugado y es proporcional a la variación de presión en la red con respecto a la presión de la hora de caudal mínimo nocturno. Esta variación de presión se calcula en el AZP que se supone el punto más representativo de la presión en la red. Por tanto:

$$Q_L(t) = Q_L(t_{MNF}) \cdot \left[\frac{P_{AZP}(t)}{P_{AZP}(t_{MNF})} \right]^\alpha \quad (4-3)$$

Donde $Q_L(t)$ es el caudal de fugas a una hora diferente de la considerada para el mínimo nocturno, t_{MNF} es la hora a la que se mide el caudal mínimo nocturno, $P_{AZP}(t)$ es la presión en el AZP (escogido como punto promedio de las presiones en la red), $P_{AZP}(t_{MNF})$ es la presión en el AZP a la hora t_{MNF} y finalmente α es el exponente de emisor. Este exponente representa la dependencia del caudal fugado con la presión, adopta valores entre 0,5 (si se trata de tuberías metálicas), y hasta 2 (si la tubería es elástica), siendo un valor habitual 1 ó 1,2 (dado que la red no suele estar compuesta por un único material). La ecuación anterior se fundamenta en las teorías de descargas a través de áreas fijas o variables, *fixed and variable area discharge* (FAVAD).

El método PRESMAC (*Pressure Management Program*) desarrollado por la *South African Water Research Commission*, determina precisamente el nudo representativo de las presiones y permite hacer una estimación de la reducción de fugas por reducción de la presión en la red.

Evaluación de las fugas a partir de la simulación de la red en periodo extendido. ITAFugas

Como complemento al MFN, en Almandoz et al. (2005) se plantea una metodología para evaluar las fugas a partir de la discriminación de los dos componentes del agua incontrolada: las pérdidas reales y las aparentes. Para realizar la discriminación se debe contar con el modelo calibrado de la red, efectuando diversas simulaciones en período extendido.

Se adjunta en el Anexo 2, el manual del software ITAFugas desarrollado a partir de las bases que a continuación se describen brevemente (Almandoz et al., 2005). El objetivo es por un lado, determinar la discriminación del caudal incontrolado (desagregar qué caudal del total incontrolado, se debe a pérdidas aparentes y qué porcentaje a fugas reales), y por otro asignar el coeficiente emisor a los nudos del modelo matemático en EPANET de forma que éste contemple

las fugas en la red dependientes de la presión. El software, ITAFugas, permite automatizar el proceso iterativo de obtener los coeficientes emisores de forma que el caudal inyectado registrado (real) coincida con el caudal inyectado en el modelo.

Esta metodología es similar a la determinación de fugas por medio de la medición de caudales nocturnos, y está basada en que el caudal incontrolado consumido varía según lo hacen los patrones de demanda de los usuarios, mientras que las fugas dependen de la presión. Es por esto que las variaciones de presión y las del patrón de consumo producen diferentes tendencias en Q_{ul} y Q_{uc} . Se enumera a continuación algunas consideraciones que deben tenerse en cuenta para aplicar este método, es decir para el uso de ITAFugas:

- Se puede aplicar a la red completa o a un sector hidrométrico determinado, el único requisito es contar con el modelo matemático y conocer el caudal inyectado. Esta metodología supone que las pérdidas reales son función de la presión, mientras que las pérdidas aparentes lo son de los patrones de consumo de los usuarios.
- Se requiere para la evaluación de los componentes Q_u (caudal incontrolado), Q_{ul} (caudal incontrolado fugado) y Q_{uc} (caudal incontrolado consumido), el caudal de entrada Q a la zona de estudio. Éste debe determinarse adecuadamente, por lo que todas las tuberías de entrada deben estar provistas de contadores calibrados.
- Las variables hidráulicas de la red deben ser sensibles a cambios en la demanda, tanto en sus valores como en su modulación. La presencia de aljibes domiciliario, por ejemplo, impedirá que se pueda aplicar el método pues éstos modifican los patrones de consumo de los abonados. Los patrones de consumo de los abonados deben ser conocidos.
- Como ya se ha indicado, se debe disponer del modelo matemático de la red calibrado, lo cual merece una especial consideración, ya que no es posible disponer de un modelo de precisión razonable si éste no contempla las pérdidas, y al mismo tiempo para determinarlas se requiere del modelo. La calibración del modelo es un proceso dinámico y continuo que requiere de sucesivas aproximaciones. Es por esto, que este método no proporciona un diagnóstico final sino que constituye una herramienta para acelerar la convergencia de un proceso complejo.

Discriminación de las pérdidas de agua por disparidad del comportamiento

El método anterior exige además de contar con el modelo matemático de la red, que tanto la inyección a la entrada del volumen de control como los consumos tengan registrada su modulación horaria. Es decir, se debe contar con la variación en el tiempo del caudal de inyección y del consumo de los abonados (curva de modulación). La primera de ellas, la evolución del caudal a la entrada, cada vez está más disponible por las compañías de agua, pues poseen registros de lo que pasa en sus contadores de entrada, no sólo de valores globales sino de su evolución en el tiempo. Pero no es tan frecuente contar con el consumo horario de los abonados. Es por este motivo que las curvas de modulación que se introducen en los modelos matemáticos y que al fin y al cabo condicionan el correcto funcionamiento de éste, se suelen estimar a partir de bibliografía especializada en el tema, o a partir de datos obtenidos con

campañas previas de medición de consumo. Estas campañas consisten básicamente en monitorizar el consumo de una muestra de viviendas previamente seleccionadas, que deben representar a la mayoría de consumidores del sistema. Por este motivo la selección de la muestra es uno de los puntos de mayor relevancia en estudios donde las conclusiones extraídas de un examen parcial de la población, se pretenden extrapolar al resto de la misma. En este tipo de estudios nunca se puede estar enteramente seguro de que el resultado del muestreo sea una muestra representativa, pero es posible actuar de tal manera que se alcance esta condición con una probabilidad alta. Para ello, debe asegurarse que los elementos que componen la muestra sean característicos del conjunto de la población.

Debido a que existen múltiples variables que influyen en el consumo del agua, el tamaño de muestra que permite determinar con certeza la manera en que todas estas variables afectan a la demanda es excesivamente grande. Se debe buscar por tanto usuarios que sean capaces de representar a la mayoría, teniendo en cuenta las singulares de cada zona del sistema, es decir el nivel socioeconómico de los diferentes sectores, el tipo de servicio, la estacionalidad de la demanda o cuestiones más técnicas como la presión disponible.

Por tanto, incluso acometiendo este tipo de campañas, que consisten en registrar los datos de consumo durante varios días o semanas de la muestra escogida, el error cometido a la hora de definir las curvas de modulación es muy alto, más aún si este tipo de campañas no se llevaran a cabo. Desde el punto de vista de las auditorías hídricas, el principal inconveniente de la disparidad de las curvas de modulación con la realidad, reside en que éstas condicionarán el resultado final de la auditoría, pues son la mejor herramienta para realizar la discriminación del caudal incontrolado, pues tal como se ha dicho, el caudal incontrolado consumido varía como lo hace el caudal registrado, mientras que el caudal fugado varía con la presión, y por consiguiente de forma inversa.

La existencia y proliferación en las ciudades de contadores inteligente (telelectura) facilitan la creación de estas curvas de modulación reales y por tanto contribuyen a una mejor discriminación del caudal incontrolado. Los patrones de consumo de los usuarios ya no se tienen que estimar sino que se conocen. Las ventajas de la instalación de este tipo de dispositivos van más allá de la obtención de los patrones, entre otros beneficios: permiten un mejor conocimiento de los volúmenes consumidos, reducen los errores de la medición, permiten obtener valores de caudal más sincronizados en el tiempo (se elimina el tiempo que los lectores invierten en realizar sus rutas de lecturas), por lo que estudio de los volúmenes se puede hacer para el mismo periodo de tiempo.

El estudio de los datos obtenidos de estos elementos permite realizar una discriminación del caudal incontrolado menos estimada, pues todo el caudal incontrolado fugado dependerá de la presión y el caudal incontrolado consumido de la modulación horaria. Por tanto es posible determinar el porcentaje de fugas a partir de estos dos comportamientos diferenciados.

4.2.4. Ejemplo de nuevas técnicas de detección y reparación de fugas

Tal como se verá en el Capítulo 6, una de las medidas más efectivas para reducir la energía consumida en el proceso de transporte y distribución de agua, es la reducción de las pérdidas reales de agua. La disminución de las fugas reduce por un lado el agua inyectada en el sistema y, por otro, la energía asociada a esa inyección de agua. Además también se reduce la energía por fricción al disminuir el caudal que circula por las tuberías.

Ya se han comentado las cuatro estrategias básicas para la reducción del volumen de fugas (Figura 4-2), se comenta a continuación una técnica englobada en las estrategias que atacan tanto al tiempo como a la magnitud de la falla. Se trata de una nueva técnica de detección en primer lugar y de reparación de tuberías sin zanja, en segundo. Ambas técnicas están desarrolladas por dos empresas privadas, Utilis Israel Ltd, expertos en detección de fugas y Curapipe System Ltd., también israelí y que presenta una innovadora herramienta de reparación de tuberías sin zanja. Se ha considerado oportuno incluir una breve descripción de ambas técnicas por lo novedoso de las mismas. Ambas empresas presentan sus técnicas en el proyecto ECOSAV, propuesto para la obtención de los fondos europeos H2020- FTIPilot-2016.

4.2.4.1. Sistema remoto de detección de fugas UTILIS

El sistema UTILIS es capaz de detectar y caracterizar las fugas subterráneas mediante el análisis espectral de imágenes satélite, dada la capacidad de penetrar en el suelo de las ondas electromagnéticas. Se seleccionó una longitud de onda específica capaz de penetrar, con alta sensibilidad al agua dulce (constante dieléctrica). Su funcionamiento consta de cuatro etapas: el sistema capta imágenes de microondas satelitales como entrada, después aplica una serie de correcciones radiométricas, una sucesión de algoritmos matemáticos y técnicas de análisis, finalmente obtiene un informe gráfico de fugas. El resultado es una imagen del trazado de las tuberías de la zona estudiada, sobre una capa de información geográfica (GIS) con la ubicación de la posible fuga (en un radio de 6 metros) y la caracterización de ésta en l/min.

El algoritmo que se presenta en esta técnica es la parte más importante y novedosa de la herramienta, cuya principal característica reside en la capacidad de limpiar la señal recibida. Se requiere la creación de una base de datos que permita, a partir de la experiencia en casos reales, identificar falsos positivos. De esta forma se podrá mejorar el algoritmo y aplicar, en un futuro, la fórmula más adecuada según la zona y grupo (clustering), haciendo más eficiente el proceso de detección remota y proporcionando ubicaciones más precisas y acertadas de las posibles fugas. Esta técnica basada en el propio aprendizaje de los algoritmos, denominada aprendizaje de máquina (*machine learning*) que trata de reconocer patrones durante el análisis de datos. La técnica presentada se caracteriza por:

- **Alta precisión en la detección subterránea de agua dulce:** Los sensores seleccionados envían señales de microondas que penetran de 1 a 2 metros bajo tierra en condiciones urbanas, donde a esa profundidad el agua potable normalmente no existe a menos que haya una fuga. Dado que las microondas no pueden viajar a través de las tuberías, con independencia del material del que estén compuestas, la única agua detectada se deberá a fugas. Se estima una tasa actual de proporción de aciertos de esta tecnología del 50%, superior a los métodos de detección de fugas convencionales.
- **La disminución del umbral de fugas:** Es importante detectar si se trata de una fuga pequeña que puede persistir en el tiempo o si es una gran fuga que debe ser abordada de inmediato. La intensidad de fuga mínima detectada es de $0,5 \text{ m}^3 / \text{h}$.
- **Análisis instantáneos completos de la red de distribución:** Este hecho mejora igualmente la eficiencia de la técnica, dado que se evita tener que ir realizando análisis a diferentes secciones, dado que las imágenes satelitales cubren grandes extensiones de terreno ($70 \times 70 \text{ km}^2$, por ejemplo). Por tanto, la realización de análisis trimestrales o mensuales de toda la red de distribución permitirá verificar las reparaciones y la detección temprana de fugas, lo que disminuye drásticamente el tiempo de latencia de la fuga y consecuentemente el agua perdida.

4.2.4.2. Técnica automatizada de reparación de fugas sin zanjas (TALR) propuesta por CURAPIPE

Se trata de un nuevo tipo de intervención en las denominadas técnicas automatizadas de reparación de fugas sin zanja (TALR) desarrolladas por la empresa Ashkelon (Israel). Sobre la base de un sistema utilizado comúnmente para limpiar redes de petróleo utilizando *PIGs* (Pipeline Intervention Gadgets), TALR permite localizar y reparar grietas y agujeros, en la mayoría de los tipos de tuberías. El dispositivo desarrollado consiste en un tren de dos *PIGs*, con un metro de material sellador entre ellos. Lleva acoplados una serie de dispositivos que automatizan el proceso y lo independizan al máximo del operario. Las características principales de este sistema son:

- **Elevado rendimiento del sistema.** El tren de *PIGs* es impulsado por el flujo de agua, por tanto sin motor, por una presión de 2 a 4 bares. El tren se mueve de forma continua a una velocidad de $0,1 \text{ m/s}$, por longitudes típicas de 100 a 400 metros. Cuando se auto-detecta la existencia de grietas y puntos de fuga, la solución viscosa entra en contacto con ella sellándola. Se ha estimado una eficiencia en el prototipo comercial actual del 70%. El hecho de que el sistema esté automatizado puede reducir el coste de la mano de obra en un 25%.
- **Innovadora sustancia de sellado.** La sustancia se endurece mientras el tren sigue pasando por encima de la fuga, de forma que la fuga queda permanentemente sellada. Esta novedosa sustancia propia de la empresa que la comercializa ha sido aprobada en Reino Unido, Italia e Israel para su uso en redes de agua potable.

- **Gran aplicabilidad.** La técnica descrita permite su aplicación en tuberías de 50 mm a 200 mm (rango que cubre los diámetros típicos en sistemas de agua a presión), y la mayoría de materiales tales como hierro fundido, PVC o polietileno.

4.3. Auditoría energética

4.3.1. Introducción

El transporte de agua a presión demanda, tal cual se ha visto en capítulos anteriores, una gran cantidad de energía. Energía que permite a los ciudadanos tener agua de calidad en el grifo de sus hogares o disponer de ella para regar los campos. Moverla desde donde se encuentra hasta donde se requiere siempre ha sido crucial, pero cada vez son más comunes los sistemas presurizados que necesitan energía. El transporte de agua a presión no sólo preserva la calidad del agua (un canal abierto es siempre más vulnerable), también posibilita la racionalización de su uso, lo que permite satisfacer la creciente exigencia de agua disponible. Sin embargo, el peaje a pagar, la energía utilizada por las bombas para mover el agua a presión, es notable. De ahí la importancia de desarrollar estrategias que permitan minimizarlos. Mover agua es una necesidad creciente como lo es recurrir a sistemas presurizados, y por consiguiente, la demanda de energía será cada vez mayor si, como indica la tendencia actual, la población sigue creciendo. Un escenario presente y futuro que exige ser mucho más eficientes en el uso de estos dos recursos: agua y energía.

El ciclo urbano del agua, desde la fuente (superficial o subterránea) hasta su retorno al medio natural, consume energía. Cada etapa del ciclo (captación, tratamiento, transporte, distribución, utilización, depuración y vertido al medio natural) tiene una necesidad específica de energía (kWh/m³), un valor que depende de las circunstancias de cada caso (la disponibilidad y calidad del agua en origen, la topografía del terreno, etc.). Sumando toda la energía consumida, la cantidad total es muy importante.

Es importante, pues, conocer la huella energética del agua (HEA) de cada una de las etapas de su ciclo integral, Figura 4-6. Y aunque de modo aproximado, por la dificultad que supone realizar un cálculo exacto (hay matices que concretar), es importante conocer cifras. Y no sólo a cada una de las etapas gestionadas por la compañía distribuidora. También hay que asignarla a los usos finales (gasto energético asociado al agua en las viviendas de los usuarios) pues el mayor gasto de energía corresponde a esta fase. Aunque siempre se ha procurado mejorar los procesos de ahorro energético, el ahorro derivado de un uso más racional del agua se viene ignorando pese a su importancia.

El ahorro de agua supone extraer menos agua del medio natural al tiempo que disminuye el caudal que circula por las redes, lo que tiene un notable efecto multiplicador; aumenta la garantía

de suministro y reduce el consumo energético. Teniendo en cuenta que la energía “más barata y sostenible” es la que no se consume, se justifica el notable interés de estas auditorías.

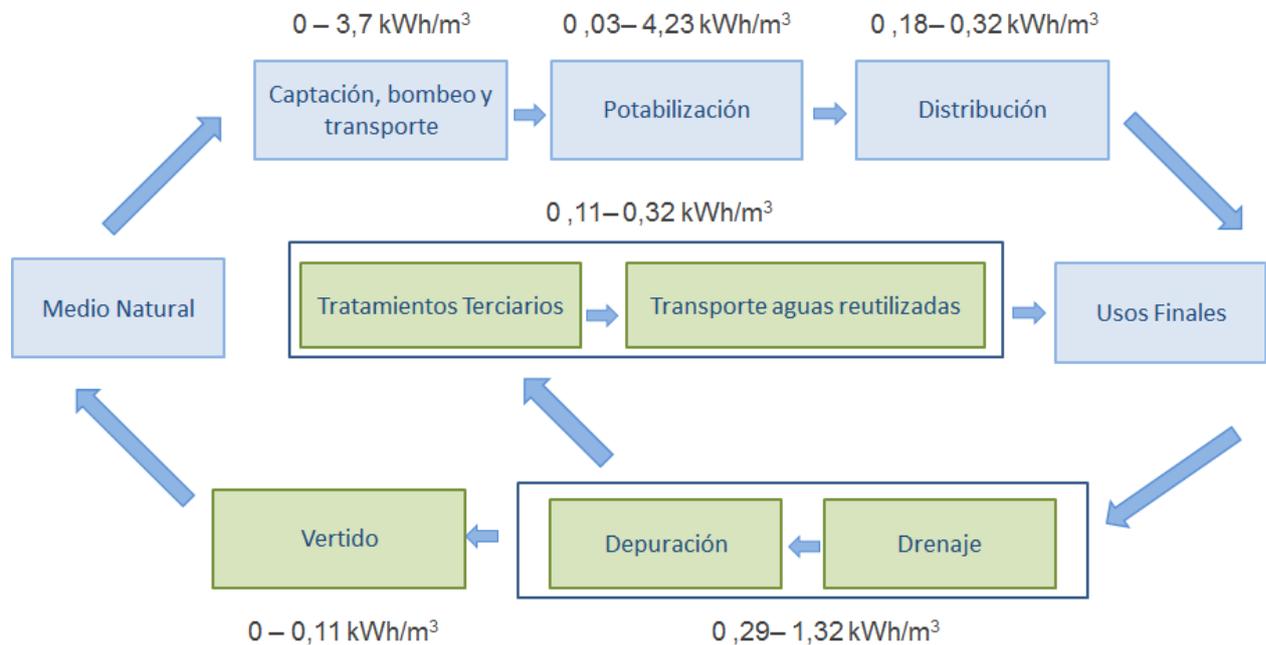


Figura 4-6: Horquillas de las HEA unitarias en California (CEC, 2005).

4.3.2. Sobre los peajes energéticos en una red de distribución de agua

Evidentemente, la energía interviene de forma imprescindible en cada punto e instante de la operación de una red de distribución de agua. En un terreno meramente práctico, es posible identificar las etapas clave a la hora de evaluar el consumo energético ligado a la operación de una red:

- Presurización del agua en cabecera de la red
- Distribución a través de la red de tuberías
- Suministro al usuario en cada acometida

Sin buscar exhaustividad en el enfoque, puesto que no son las únicas, un análisis de estas etapas cubriría los puntos principales que sigue el proceso de suministro de agua (además del proceso de potabilización, en el caso de ser necesario). Evaluando el coste energético real en cada etapa y comparándolo con el coste teórico que sería estrictamente mínimo, se llega a una estimación del sobrecoste energético en que se está incurriendo en cada etapa. Si bien este sobrecoste siempre existirá, puede considerarse inevitable y por tanto un mero peaje a pagar o bien puede darse el caso que este sobrecoste suponga un derroche en sí mismo, mayormente evitable.

Las principales pérdidas energéticas que se pueden dar dentro de las etapas de captación, transporte y distribución (etapas de abastecimiento), son tal como se ha comentado, las que se dan en el propio grupo de presión (no toda la energía eléctrica se convierte en energía mecánica, ni toda ésta en energía de presión), la energía que se llevan consigo las fugas, la energía pérdida por fricción (inevitables pues siempre existirá fricción, pero mayores o menores dependiendo de la resistencia de las tuberías) y cualquier otro tipo de pérdida que introduzca cualquier elemento que despresurice la red.

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) publicó en 2011, el *Manual de eficiencia*, dentro del grupo de evaluación de los sistemas de bombeo. Un documento que analiza todas las posibles ineficiencias que se pueden dar en los sistemas de presión, con algunas propuestas de mejora de su eficiencia. Este manual, aunque tremendamente práctico y didáctico, se centra sobre todo en analizar las ineficiencias del grupo de presión, perdiendo la visión de conjunto, que para poder mejorar el sistema completo puede resultar tan necesaria. Sobre este manual se volverá más adelante, cuando se analicen en profundidad las ineficiencias de los grupos de presión y se propongan medidas de mejora.

La auditoría energética que plantea este documento, se basa principalmente en la siguiente figura:

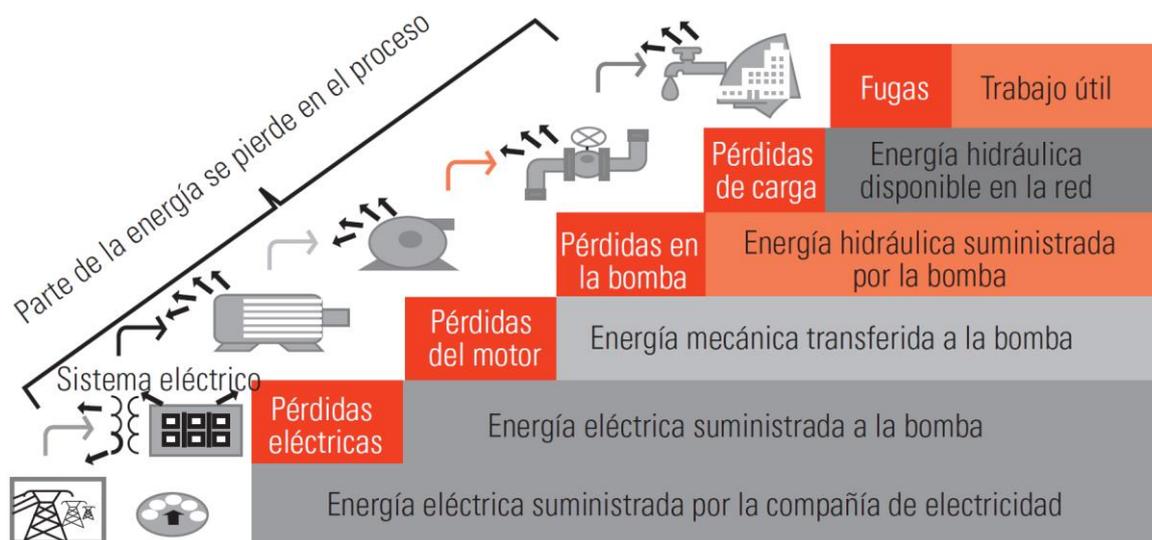


Figura 4-7: Diagrama simple del balance de energía (BID, 2011)

La auditoría energética propuesta por el BID consiste principalmente en determinar las diferencias entre la energía suministrada (energía eléctrica) y la energía útil, de manera que la diferencia entre ambas es precisamente las pérdidas que se dan en cada etapa del proceso. El manual explica de manera exhaustiva cómo calcular las pérdidas que se dan en cada una de estas fases.

4.3.3. Fundamentos de la auditoría energética

Se presenta a continuación una revisión y ampliación de los principios fundamentales de la auditoría energética publicada en Cabrera et al., (2010). Por un lado se han modificado y ampliado algunos términos y conceptos con el objetivo de adaptarla a los nuevos conceptos desarrollados en esta Tesis principalmente los desarrollados en fase de diagnóstico energético. Por otro lado, se ha hecho un esfuerzo por unificar la terminología que había ido desvirtuándose debido a la incorporación de nuevos desarrollos desde que esta auditoría se publicara por primera vez en 2010.

En el Anexo 3, se adjunta el manual de usuario del software ITAEnergy, desarrollado en esta Tesis. Los fundamentos en los que se basa esta herramienta son los que a continuación se describen de forma general, incidiendo sobre todo en los posibles cambios o ampliaciones sobre la auditoría energética original.

Se aplica la ecuación de la energía a un volumen de control limitado por una superficie atravesada por flujos hídricos y energéticos. El objetivo es determinar los flujos de energía por lo que previamente deben ser conocidos los flujos hídricos, lo que exige haber resuelto el balance hídrico y disponer del modelo de simulación de la red calibrado. El volumen de control se puede definir según convenga en cada caso, de forma que los elementos que queden fuera del volumen de control definido contribuyen con energía de flujo, mientras que los integrados en el volumen de control pueden almacenar más o menos energía (depósitos) o disiparla (tuberías y válvulas). Las bombas se incluyen dentro del volumen de control aportando trabajo de eje (aportan trabajo útil, y producen pérdidas de energía por sus propias ineficiencias), mientras que la superficie de salida del sistema la integran las acometidas de los usuarios (o hidrantes de la superficie de riego) y las fugas. Tal como se ha dicho, el modelo matemático de la red es imprescindible para conocer los flujos hídricos y energéticos a través de la superficie de control.

Para un sistema alimentado desde n_N embalses (altura de suministro constante), con n_p bombeos que aportan energía al sistema, y con depósitos de compensación: (Cabrera et al., 2010)

$$\sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni} + \sum_i^{n_p} \gamma Q_{pi} H_{pi} = \sum_{Salidas} \gamma Q_{si} H_{si} + \rho \left[\sum_{Salidas} Q_{si} u_{si} - Q_N u_N \right] + \gamma \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} z dV \quad (4-4)$$

Los términos, de izquierda a derecha, de la ecuación precedente representan:

- La potencia de entrada que los embalses y depósitos ponen a disposición del sistema es $P_N = \sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni}$. Es, desde la óptica del sistema que se analiza, una potencia “natural”.
- La potencia que aportan las bombas es $P_p = \sum_i^{n_p} \gamma Q_{pi} H_{pi}$. Es una potencia “artificial” pues requiere una fuente de alimentación externa, en general un motor eléctrico.
- La potencia de entrada total, P_0 , es la suma de las dos precedentes.

- El término $\sum_{\text{Salidas}} \gamma Q_{si} H_{si}$ es la potencia saliente del sistema por los nudos de la red, suma de la potencia puesta a disposición de los usuarios o potencia útil, y las pérdidas que con las fugas escapan de la red.
- El término $\rho[\sum_{\text{Salidas}} Q_{si} u_{si} - Q_N u_N]$ representa la variación por unidad de tiempo de la energía interna del agua en el interior del sistema. En ausencia de intercambio de calor con el entorno, ese aumento temporal de energía interna P_F , es la potencia requerida para vencer la fricción entre fluido y la tubería.
- Finalmente, el término $\gamma \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V_C} z dV = \sum_i^{n_c} \pm \Delta P_{ci} = \pm \Delta P_C$ representa la variación unitaria en el tiempo, positiva o negativa, de la energía potencial de los depósitos que forman parte del sistema.

A partir de todo ello, la ecuación (4-4) puede expresarse de manera más compacta como:

$$P_N + P_P = P_U + P_L + P_F \pm \Delta P_C \quad (4-5)$$

Una ecuación de fácil interpretación; la potencia entregada a la red de distribución desde el exterior más la potencia de eje es igual a la potencia cedida a los usuarios, más la suma de las pérdidas (fugas y fricción mecánica), más el término de compensación del depósito de cola. Cual se verá, el término de compensación pierde relevancia a medida que se alarga el periodo temporal de integración, de tal manera que cuando el balance de energías se extiende a lo largo de un año, su variación es insignificante.

4.3.4. Integración en periodo extendido de la ecuación de la energía

La ecuación (4-5) se integra a lo largo del tiempo mediante un proceso totalmente análogo al que se sigue para simular en el tiempo el comportamiento hidráulico de la red, una integración que convierte los términos de potencia en términos de energía. Previamente, es necesario adoptar una notación que indique el origen de cada término, el elemento de la red y el intervalo de tiempo al que está referido. Tal notación se detalla en la Figura 4-8: Notación utilizada para los nudos y líneas de la red de distribución:

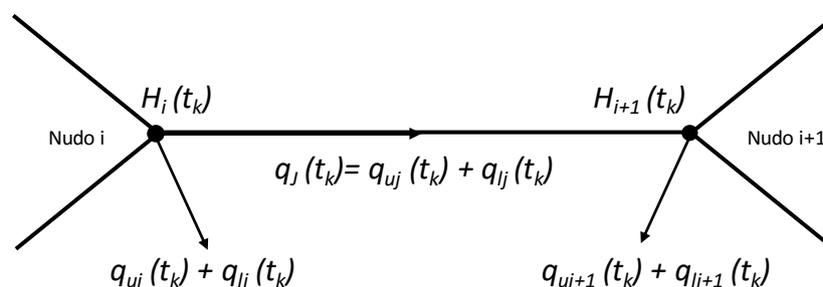


Figura 4-8: Notación utilizada para los nudos y líneas de la red de distribución

donde:

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

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

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

La notación empleada para representar las energías resultantes de la integración con respecto al tiempo es la recogida en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Notación empleada en la definición de las energías actuantes en el sistema

Tipo de energía	Notación
Energía natural suministrada (aportadas por fuentes externas)	$E_N(t)$
Energía de eje (suministrada por grupos de bombeo)	$E_P(t)$
Energía útil cedida a los usuarios (para satisfacer sus necesidades)	$E_U(t)$
Energía asociada a fugas	$E_{fl}(t)$
Energía invertida en vencer el rozamiento (fricción en las tuberías)	$E_{rf}(t)$
Energía de compensación (asociada a depósitos internos del sistema)	$E_C(t)$

4.3.4.1. Energía entrante en la red, aportada por el embalse o depósito

La energía externa suministrada (por embalses o depósitos de cabecera), es:

$$E_N(t) = \gamma \cdot \sum_i^{n_N} \left(\sum_k Q_{Ni}(t_k) \cdot H_{Ni}(t_k) \cdot \Delta t_k \right) \quad (4-6)$$

donde γ es el peso específico del agua, $Q_{Ni}(t_k)$ es el caudal (en m³/s) aportado por el embalse en el instante t_k , $H_{Ni}(t_k)$ es su altura piezométrica (en mca) en el instante t_k , y Δt_k el intervalo de tiempo (en 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:

$$E_N(t) = \gamma \cdot \sum_i^{n_N} V_{Ni} \cdot H_{Ni} \quad (4-7)$$

donde V_{Ni} es el volumen (en m³) aportado por el embalse i durante todo el periodo de análisis y H_{Ni} es la altura piezométrica (en m) del agua en ese embalse. La ecuación anterior refleja la energía entrante en el sistema para el análisis del gasto unitario (en kWh/m³) en esta fase de

distribución, con independencia del historial previo seguido por el agua hasta ingresar en el sistema.

4.3.4.2. Energía entrante en la red, aportada por el equipo de bombeo (energía de eje)

El trabajo de eje aportado por la bomba es:

$$E_P(t) = \gamma \cdot \sum_i^{n_p} \left(\sum_k Q_{Pi}(t_k) \cdot H_{Pi}(t_k) \cdot \Delta t_k \right) \quad (4-8)$$

donde $Q_{Pi}(t_k)$ es el caudal (en m³/s) trasegado por el equipo de bombeo en el instante t_k , $H_{Pi}(t_k)$ es la altura (en m) que aporta la bomba, y Δt_k el intervalo considerado de tiempo (en 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 . Dado que las estaciones de bombeo pueden considerarse elementos externos al volumen de control, sus rendimientos no intervienen de manera directa.

Pero el rendimiento es un parámetro esencial a la hora de optimizar la energía total del conjunto de la red y que interviene de forma directa en el término de pérdidas de energía definido en el diagnóstico energético, por eso se considera que no puede ser obviado (como ocurre en los desarrollos originales de la auditoría energética de Cabrera et al. (2010)), y por tanto debe formar parte del conjunto de términos de la auditoría, puesto que es objetivo de este trabajo establecer estrategias para reducirlo. Por tanto, el término de pérdidas de eje resulta:

$$E_{rp}(t_p) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{i=1}^{n_p} \left(Q_{Pi}(t_k) \cdot H_{Pi}(t_k) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{pi}(t_k)} - 1 \right) \right) \right) \Delta t_k \quad (4-9)$$

Siendo el término complementario de la ecuación (4-8), originariamente la energía de eje, como sigue:

$$E_P(t_p) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{i=1}^{n_p} \left(\frac{Q_{Pi}(t_k) \cdot H_{Pi}(t_k)}{\eta_{pi}(t_k)} \right) \right) \Delta t_k \quad (4-10)$$

Donde en ambas ecuaciones $\eta_{pi}(t_k)$ es el rendimiento de la bomba i en el instante t_k

4.3.4.3. 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:

$$E_U(t) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{i=1}^n q_{ui}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \quad (4-11)$$

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 ya presentados en el diagnóstico energético.

$$\begin{aligned} E_{uo} &= \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{p_0}{\gamma} \right] \\ E_{ti} &= \gamma \sum v_j (z_h - z_j) = \gamma \sum v_j \frac{p_{jt,i}}{\gamma} \\ p_{ei} &= p_{hi}^* - p_o, \quad E_{ei} = \gamma V \frac{p_{ei}}{\gamma} \end{aligned} \quad (4-12)$$

Dado que $H_i(t_k)$, es la altura piezométrica en un nudo genérico i en el instante t_k , y ésta 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, $E_U(t_k)$, es al mismo tiempo $E_U(t_k) = E_{uo}(t_k) + E_{tr}(t_k) + E_{ei}(t_k)$. Este término energético, es energía útil pues es una presión que se entrega al usuario. Pero, puede ser optimizado en la medida que sea posible reducir sus términos, es decir, reducir la energía topográfica real y la energía de exceso real. El segundo de ellos, la energía de exceso es evitable. El primero de ellos, la energía topográfica es difícilmente evitable, pues se debe a la propia topografía del terreno, pero puede ser reducido si se plantean nuevos diseños del sistema, tal como se verá en el Capítulo 5.

4.3.4.4. Energía saliente de la red a través de las fugas existentes

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 energética es una energía perdida igual a:

$$E_{rl}(t) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{i=1}^n q_{li}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \quad (4-13)$$

donde n es el número de nudos con fugas de la red de distribución, $q_{li}(t_k)$ es el caudal fugado (en m³/s) en las tuberías adyacentes al nudo i (y, por tanto, asociadas a éste) en el instante t_k , y $H_i(t_k)$ es la altura piezométrica (en mca) en el instante t_k en el nudo donde se localiza la fuga $q_{li}(t_k)$.

4.3.4.5. Energía disipada por fricción en tuberías y otros elementos

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

$$E_{rf}(t) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{j=1}^n (q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k)) \cdot \Delta h_j(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \quad (4-14)$$

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 del 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 por fugas. De este modo, el caudal total de la línea j , $q_j(t_k)$, es la suma de los precedentes (Figura 4-8) e igual a:

$$q_j = q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k) \quad (4-15)$$

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} . En cualquier caso, desde la óptica que nos ocupa, poco importa.

4.3.4.6. Término energético de compensación del depósito de cola

Son muchas las redes de abastecimiento de agua potable que disponen de un depósito que acumula agua en horas valle y lo suministra en horas punta. Este tipo de depósito debe necesariamente integrarse en el sistema. Con todo, el flujo neto de agua y energía integrado a lo largo de un tiempo suficientemente largo, es nulo por lo que al no contribuir aportando flujos netos lo razonable sería ignorar su presencia. Obviamente durante la operación normal del sistema, en periodos de tiempo relativamente cortos, actúan alternativamente como fuentes y sumideros de masa y energía, por lo que al final de la simulación se debe valorar su contribución final. Si el nivel en el instante inicial es mayor que en el instante final, el depósito ha actuado como fuente de masa y de energía mientras que en caso contrario será un sumidero.

A partir de la energía potencial que almacena un tanque (supuesto en este caso de sección constante) y de su variación temporal con el nivel de agua, se obtiene la energía de compensación en el intervalo de tiempo considerado. Y de aquí se deduce que:

$$\Delta E_C = E_{Cf} - E_{Ci} = \frac{\gamma \cdot A}{2} \left(z^2(t_f) - z^2(t_i) \right) = q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k) \quad (4-16)$$

Siendo A la sección del depósito (en m^2) y $z(t_f)$, $z(t_i)$, los niveles (en m) de la superficie libre de agua con relación a la solera del depósito en los instantes de tiempo extremos.

4.3.5. Balance global de energía

El balance energético para el periodo considerado, resultado de integrar en el tiempo la ecuación general de la energía vista anteriormente, sigue un paralelismo completo con dicha ecuación, bien que ahora los términos son energías y no potencias. Energías que, aparte de la de compensación cuando interviene, ingresan, se disipan o salen del sistema, lo que permite plantear la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} E_{input} &= E_N(t) + E_P(t) = E_U(t) + E_{rp}(t) + E_{rl}(t) + E_{rf}(t) + \Delta E_C \\ &= E_{Output} + E_{disipada} + \Delta E_{compensacion} \end{aligned} \quad (4-17)$$

El término de compensación, ya se ha dicho, pierde su relevancia cuando el periodo de tiempo es largo. Puede considerarse un periodo de tiempo largo a partir de que la aportación de este término es inferior al 1% en el balance. Por tanto, el término de compensación en estos casos se puede despreciar y la ecuación final queda como sigue:

$$E_{input} = E_N(t) + E_P(t) = E_U(t) + E_{rp}(t) + E_{rl}(t) + E_{rf}(t) = E_{Output} + E_{disipada} \quad (4-18)$$

Como síntesis, la Tabla 4-7 presenta un resumen con todos los términos de la auditoría energética:

Tabla 4-7: Esquema del balance energético a largo plazo de una red de distribución de agua

Energía de entrada	$E_n(t)$ Energía natural	$E_u(t)$ Energía útil entregada a los usuarios	E_{uo} . Energía mínima requerida por los usuarios	Esalida
			E_{tr} . Energía topográfica real	
			E_{er} . Energía de exceso real	
	$E_p(t)$ Energía de eje	$E_{ri}(t)$. Energía saliente de la red, a través de las fugas existentes		Edisipada
		$E_{rp}(t)$. Energía perdida de eje		
		$E_{rf}(t)$. Energía disipada en la fricción del agua con las tuberías		

4.3.6. Aplicaciones de la auditoría energética

La realización de la auditoría energética, tal cual se ha dicho, requiere del modelo matemático de la red, pues sin éste no se pueden conocer los caudales que circulan por cada una de las líneas, las pérdidas en éstas, o la presión en los nudos, así como estimar la presión a la que se encuentran las fugas antes de salir de la red. Además de disponer de la red, se requiere realizar un análisis en profundidad de los resultados de la simulación, si bien los cálculos planteados no son de gran dificultad, si se requiere el tratamiento de muchos valores. Por este motivo, si bien el diagnóstico se puede realizar de forma sencilla con unos simples cálculos o con una hoja de cálculo sencilla (o bien utilizando EAGLE) la auditoría energética requiere ser programada, pues para cada tubería se necesita conocer el caudal y las pérdidas de carga en cada instante, lo mismo ocurre con los nudos y sus variables. Es decir, una cantidad ingente de valores. Por este motivo, se ha desarrollado en paralelo a este trabajo un software, ITAEnergy, que permite obtener la auditoría energética a partir de un archivo de EPANET.

Tal cual se ha comentado al inicio de este apartado, en el Anexo 2, se adjunta el manual del software correspondiente y se describe en detalle su funcionamiento, en cualquier caso los fundamentos que lo sustentan son los presentados en los puntos anteriores. Este software va a permitir valorar energéticamente los cambios que se pueden acometer en un sistema de forma relativamente rápida, es decir EPANET permite valorar hidráulicamente posibles cambios (distintas bombas, cambios de diámetros, introducción de válvulas de regulación, sectorización, etc.), pero no permite cuantificar de forma precisa el ahorro energético de estos cambios. A partir de este momento la unión de EPANET junto a ITAEnergy, permitirá analizar hidráulicamente el sistema con EPANET y una vez las condiciones hidráulicas han sido satisfechas, analizar el sistema energéticamente.

Las imágenes siguientes (Figura 4-9 y Figura 4-10) muestran un ejemplo de los resultados que ofrece ITAEnergy. Se introducen aquí para poder comparar los resultados de este nuevo software con los resultados del módulo energético de EPANET sobre el que a continuación se va a hacer una revisión. Se puede observar que ITAEnergy calcula de forma detallada el destino de la energía consumida en la red. Además incluye los conceptos de Energía mínima requerida por los usuarios, energía topográfica y energía de exceso desarrollados en el capítulo anterior, y trata de corregir todas las limitaciones y errores que posee EPANET en su modulo energético (Gómez et al., 2015b).

VOLÚMENES m3/día	ENERGÍAS kWh/día
Volúmenes del sistema	Energía total aportada
Volumen inyectado total	Energía aportada por la bomba (Tpo. func. 12,05 h)
Volumen consumido	Energía natural
Volumen fugado	
Volumen almacenado en los depósitos	Energía consumida
	Energía entregada a los usuarios
Indicadores del sistema	Energía mínima requerida
Rendimiento volumétrico	Energía topográfica
Fugas por unidad de longitud	Energía de exceso
	Energía disipada por fricción
Error	Energía disipada en las válvulas
Error en el balance volumétrico	Energía perdida a través de las fugas
	Energía perdida en la bomba
	Energía de compensación
	Error
	Error en la auditoría energética
	Auditoría energética Indicadores

Figura 4-9: Tabla de resultados del Balance Hídrico y de la Auditoría Energética (ITAEnergy)

INDICADORES	
Indicadores de Contexto	
Procedencia de la energía	$C_1 = \frac{E_{Natural}}{E_{Entrada}}$
Exigencia energética de la red	$C_2 = \frac{E_{uo}}{E_{min,plana}}$
Indicadores de Gestión	
Exceso de energía suministrada	$I_1 = \frac{E_{Entrada}}{E_{uo}}$
Eficiencia de la red	$I_2 = \frac{E_{Util}}{E_{Entrada}}$
Energía de fricción	$I_3 = \frac{E_{Friccion}}{E_{Entrada}}$
Energía asociada a las fugas	$I_4 = \frac{E_L + E_F - E'_F}{E_{Entrada}}$
Suficiencia en el cumplimiento de estándares	$I_5 = \frac{E_{Util}}{E_{uo}}$
Energía adicional de bombeo generada por fugas	$k = \frac{E_{bombeo}}{E'_{bombeo}}$
Auditoría energética Indicadores	

Figura 4-10: Tabla de Indicadores

A pesar de que EPANET dispone de un módulo de energía implementado, éste como se detalla a continuación posee una serie de errores y limitaciones desde el punto de vista energético. En cualquier caso, los valores que ofrece el módulo energético de EPANET se limitan a la potencia y el rendimiento de las bombas, pero el objetivo de la auditoría energética va más allá, y trata de identificar dónde va a parar cada kWh que se introduce en el sistema.

4.3.7. Sobre las debilidades y limitaciones energéticas de EPANET

Con más de 1500 citas en revistas indexadas y cientos de descargas, EPANET es el software de referencia para el análisis y diseño de redes de distribución de agua a presión. Fácil de usar, potente, fiable y de dominio público, su uso se ha extendido por todo el mundo. Sin embargo, desde un punto de vista energético, su capacidad es limitada, incluso en determinadas circunstancias los resultados de su análisis energético pueden ser erróneos. Esto es comprensible, ya que por un lado, su principal objetivo cuando se diseñó era modelar la calidad

del agua, y por otro lado, porque fue concebido y desarrollado a finales del siglo pasado, antes del auge del nexo entre el agua y la energía.

4.3.7.1. Introducción al estado actual del módulo energético de EPANET

La primera versión de EPANET, versión 1.1, fue lanzada en 1993 (Rossman, 1993) y siete años más tarde, la versión 2.0 (Rossman, 2000) apareció, siendo ésta la última versión de este software. Once años más tarde, se anunció la inminente aparición de la versión 3.0 (Rossman, 2011), que por cualquier razón no ha visto la luz. De hecho, hay un intento internacional reciente y muy bienvenido dirigido por el Dr. Boccelli (Universidad de Cincinnati), que trata de adaptar EPANET a las necesidades actuales. Dando por hecho que tanto el propio programa como su código fuente han desempeñado un papel fundamental en la investigación y la gestión de los sistemas de distribución de agua a presión, están promoviendo una iniciativa de código abierto (Open Source EPANET) para el desarrollo continuo de EPANET. Esta iniciativa organizará a la comunidad internacional de análisis de sistemas de distribución de agua y facilitará la interacción del grupo y el desarrollo coordinado del código base de EPANET. Obviamente, si esta iniciativa tiene éxito será una gran noticia para todos los usuarios del programa.

El análisis de las debilidades y limitaciones de EPANET que se presenta a continuación, hacen referencia únicamente a su módulo energético y por tanto, debe ser remitido a la presente versión 2.0. Dado que esta versión posee algunos cambios en el módulo energético con respecto a la primera versión. El aspecto más importante fue la inclusión de patrones horarios para el coste de la energía, y el cálculo global del gasto energético en función de las horas de funcionamiento de las bombas. Tampoco la esperada versión 3.0 prometía mejoras en cuanto a la energía, a pesar de las mejoras anunciadas en el cálculo de la evolución de la calidad del agua, en hidráulica y en la interfaz (Rossman, 2011). La única mejora en el tema energético era la posibilidad de modelar el comportamiento de la bomba con polinomios de tercer grado. Esto podría superar otro de los inconvenientes conocidos de EPANET: no se pueden introducir en el programa curvas características de bombas con pendientes positivas, situación que ocurre con frecuencia en la práctica, sobre todo en bombas de flujo axial.

Para entender la menor atención de EPANET al análisis energético del transporte de agua a presión conviene situar el programa en su contexto histórico. De hecho el primer artículo en citar de modo expreso el nexo agua – energía (Gleick, 1994) es contemporáneo de la versión 1.1 de EPANET, mientras el primer informe que cuantifica la energía ligada al ciclo urbano del agua (CEC, 2005) es posterior a la vigente versión de EPANET, informe que convertirá el nexo agua y energía en objetivo prioritario. La actividad de quien promovió EPANET, la *Environmental Protection Agency* (EPA) lo evidencia comenzando a desarrollar programas y herramientas relacionadas directamente con el nexo del agua y a energía. Una de sus últimas publicaciones (EPA, 2013) demuestra la atención que la EPA presta actualmente a este nexo. Esto es comprensible, dado que en EE.UU. el gasto eléctrico representa el 25-40% de los presupuestos

de operación para las aguas residuales (NYSERDA, 2008), mientras que los sistemas de agua potable representan el 4.3% del consumo total de energía (Eisenberg, 2012). Estas cifras son aún mayores en California (Wolff, 2010), donde sólo el transporte de agua a presión para el consumo representa el 6% del consumo de energía total (Water in the West, 2013). De hecho, en Europa la demanda de energía en la agricultura es en promedio el 2% del consumo total de energía (MOE, 2011), una cifra que en el Mediterráneo más agrícola, en países del sur como España, se eleva hasta el 3% (Corominas, 2010).

Es importante realizar algunas reflexiones sobre el papel que juega EPANET en el análisis de redes urbanas y de riego. EPANET fue concebido con el objetivo de realizar un seguimiento de la evolución de la calidad del agua desde la fuente (punto de inyección) hasta el grifo del usuario. El análisis hidráulico, incluyendo el periodo de simulación extendida, es un requisito previo al análisis de la calidad. En conclusión la EPA desarrolló un software completo, que permite por un lado controlar la calidad del agua a lo largo del sistema y, al mismo tiempo, modela el comportamiento hidráulico. Una consecuencia que atrajo desde el primer momento mucho más la atención de usuarios de EPANET, por ejemplo para el estudio de la sectorización de la red que es uno de los usos más extendidos (Renaud et al. 2014; Di Nardo et al. 2014), que los propósitos iniciales del programa, el análisis de la calidad, quedando estos relegados a un segundo plano. En el ámbito de las redes de riego, donde los componentes agrícolas (como el nitrógeno) son no-reactivos, el destino y movimiento de las sustancias introducidas en la red no varían.

Aún no habiendo sido EPANET concebido para el análisis de sistemas de riego, los diseñadores de los sistemas de riego presurizado se dieron cuenta de inmediato que EPANET podía convertirse en una herramienta útil que podía facilitar su trabajo diario. Fácil de usar, fiable, potente y de coste cero, son razones de peso para atraer a estos profesionales (con mucho menos potencial que los de la industria del agua, que posiblemente se puedan permitir paquetes comerciales potentes y actualizados). Aun no siendo concebido para simular el comportamiento de sistemas de riego programado (para efectuar estos análisis existe software más apropiado (Calejo et al. 2008) es el programa más extendido en el campo de la ingeniería agrícola, especialmente en los países en desarrollos (Arora y Jaiswal, 2013; Abdulrazzaq y Jahad, 2014), debido a su accesibilidad, fiabilidad y gratuidad.

Sin embargo, desde un punto de vista energético, este software ha limitado su capacidad hasta el punto que en ciertas circunstancias puede incluso arrojar resultados erróneos, como el caso del cálculo sobreelevado del coste energético. Siendo las cuestiones energéticas cada vez más importantes en áreas urbanas y agrícolas, los usuarios de EPANET deben ser plenamente conscientes de los inconvenientes que presenta el programa, al menos en lo que al módulo energético se refiere.

En los siguientes puntos se describen las debilidades energéticas de EPANET, a través de un caso de estudio. Por último, con el fin de actualizar el software se sugieren algunas mejoras.

4.3.7.2. Errores principales

Se comentan en primer lugar los errores de cálculo del programa:

- Calcula mal los rendimientos de las bombas de velocidad variable.

Este error ya fue objeto de una nota técnica (Marchi y Simpson, 2013). Es obvio que este error no sólo afecta al rendimiento, sino que se transmite a otros resultados (potencia y coste energético). La existencia de este error desacredita los resultados obtenidos en el informe energético cuando el sistema cuenta con bombas de velocidad variable, si bien no es complejo calcular el rendimiento correcto de la bomba de velocidad variable de forma correcta a partir de los valores de caudal y altura aportada en cada instante o de la velocidad de giro de la bomba, el hecho de que el cálculo se deba realizar aparte, resta mucha utilidad al uso de EPANET para analizar cuestiones energéticas. Incluso, para algo tan común como la selección de la bomba más adecuada (siendo una bomba de velocidad variable) para un sistema.

- Ignora la energía natural.

El transporte y distribución de agua a presión se hace a costa de la energía de presión (o elástica) del agua. Dos son sus fuentes, natural (o gravitatoria) suministrada por los depósitos y de eje aportada por bombas. EPANET sólo reconoce esta última energía. No hay informe energético en sistemas gravitatorios y sólo contabiliza la de bombeo en los sistemas mixtos (energía natural y de bombeo). Con esta información no puede apoyar en muchos casos la realización de balances energéticos.

- Calcula mal los costes de bombeo cuando la simulación no se extiende sobre 24 horas.

En la práctica, es relativamente común encontrar sistemas presurizados que operan diariamente durante menos de 24 horas. Esto ocurre cuando el servicio de agua es intermitente, un escenario frecuente en los países en desarrollo y habitual en las redes de riego a presión. Si el número de horas de funcionamiento diario, n_t , es inferior a 24, EPANET aumenta el gasto de energía por un factor $24 / n_t$. El error se repite para todos los períodos de simulación que no son múltiplos de 24 horas. En sistemas de riego, el agua se suministra típicamente durante menos de 24 horas por día. Este error, una vez más, es una evidencia que muestra que el programa fue concebido para redes de agua urbana donde, a excepción de los suministros intermitentes de los países en desarrollo, la red funciona 24 horas al día y 365 días al año y por tanto, este error no tiene impacto.

4.3.7.3. Errores menores

Se incluyen aspectos energéticos del programa que, para adecuarlos a la realidad del momento, convendría actualizar:

- Cálculo de la energía realmente consumida

Los kWh realmente consumidos por los grupos de bombeo (y por tanto, el punto de partida real de potencias demandadas y energías consumidas) no sólo dependen de la eficiencia de la bomba. También hay que considerar las eficiencias de los motores eléctricos y de los variadores de velocidad, en determinadas circunstancias origen de pérdidas significativas tal como algunos autores evidencian (Burt et al., 2013).

- Sobre la tarifación

EPANET contempla un término de potencia único mientras que, con frecuencia, las tarifas actuales admiten, del mismo modo que lo hacen con el precio de la energía, variaciones horarias y estacionales.

- Sobre la intensidad energética

EPANET calcula la intensidad energética (kWh/m³) referida al volumen suministrado al sistema. Es más representativo referirlo al volumen entregado a los usuarios, sobre todo en sistemas con pérdidas elevadas.

- Sobre los costes energéticos en diferentes estaciones de bombeo de un mismo sistema

EPANET, sin limitación alguna en el número de nudos y líneas del sistema, tiene una potencia de cálculo formidable. Es posible alimentar redes de grandes dimensiones desde diferentes estaciones de bombeo con distintos regímenes tarifarios, dado que éstos dependen de la potencia máxima contratada. El programa contempla un régimen tarifario único para todo el sistema.

4.3.7.4. Mejoras potenciales

La primera mejora requerida obviamente sería la corrección de los errores anteriores. Además podría incorporarse algunas utilidades, la descripción de ambas ha sido realizada ampliamente en éste y otro capítulo anterior:

- El diagnóstico energético: Usando los datos de entrada de EPANET y sus resultados, se podría obtener desde un punto de vista energético, por ejemplo, el rendimiento ideal y real del sistema. Mediante la comparación de estos valores, se puede estimar el margen de mejora de la eficiencia energética del sistema. Por otra parte, la relevancia de la energía topográfica con respecto a la total permite valorar la importancia del diseño del sistema en cuanto a su trazado y sus conexiones, si EPANET permitiera evaluar esta energía sobre diferentes escenarios, sería sin duda mucho más útil.
- Auditoría energética: La realización de la auditoría, tal cual se ha visto, permite descubrir dónde es más ineficiente el sistema (Cabrera et al. 2010). Dado que el modelo de la red es imprescindible para realizar la auditoría, como se ha comentado a lo largo de este punto, un EPANET que incluyera el cálculo de la auditoría una vez calibrado y ajustado el

modelo permitiría sobre un mismo archivo y con un mismo software plantear soluciones y mejoras en los sistemas de distribución de agua a presión, no sólo desde un punto de vista hidráulico (como permite en estos momentos EPANET) sino desde el punto de vista energético.

Actualmente, Toolkit de EPANET (Rossman, 1999) permite realizar estos cálculos, pero no directamente, ni de forma inmediata. Además requiere de una especialización en EPANET importante así como conocimientos de programación, características no tan comunes en los usuarios típicos de EPANET, que al fin y al cabo es a quienes va dirigido el programa. Dado que la eficiencia energética se vuelve más y más importante, sería deseable poder automatizar todos estos cálculos, de forma que cualquier usuario de EPANET pudiera obtener una visión completa de su sistema.

4.3.7.5. Caso de estudio

El ejemplo que sigue (Figura 4-11 y Tabla 4-8) se ha diseñado para mostrar las debilidades energéticas expuestas. Es una red de riego dividida en tres sectores de riego, activo seis horas cada uno. El tercer sector riega en dos etapas de tres horas. El sistema opera un total de 18 horas diarias. Ambas bombas se alimentan de una fuente a nivel constante e igual a 30 m.

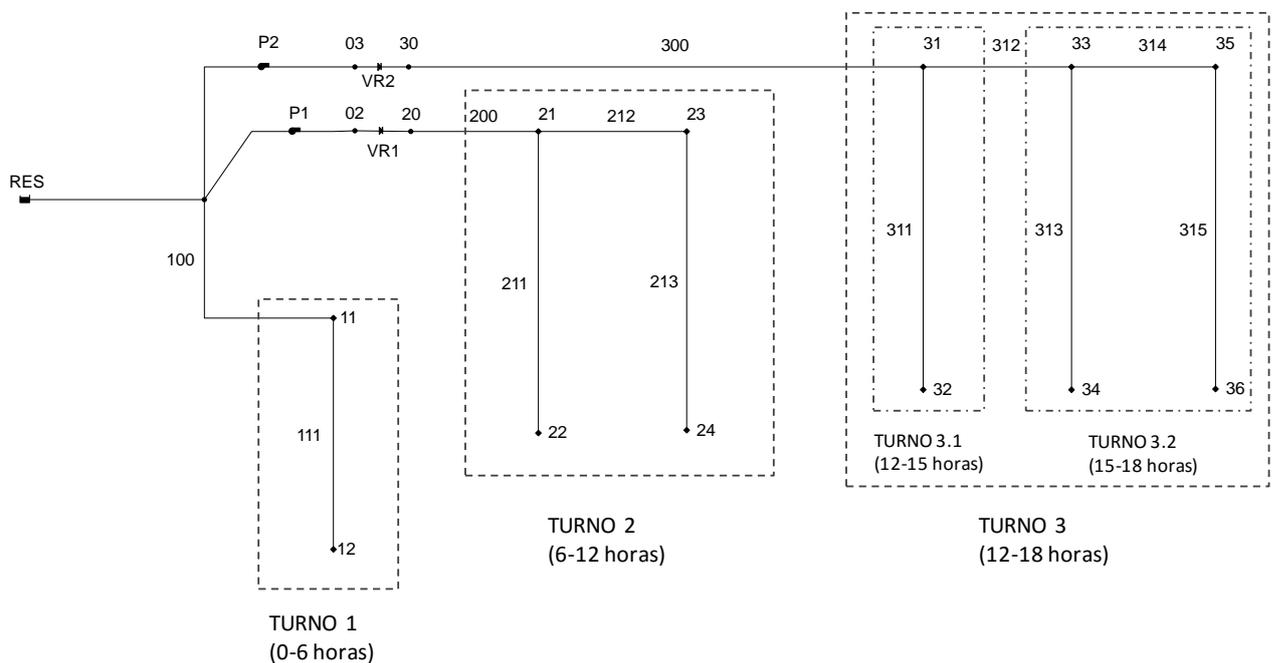


Figura 4-11: Esquema de la red caso de estudio

Se asigna el nivel cero al nudo de menor cota (nudo 12). La presión mínima de servicio considerada es 10 m, la elevación del depósito es 30 m, y la rugosidad de las tuberías 0,1 mm.

La Tabla 4-8 detalla las características de la red y la Tabla 4-9 la de las bombas que garantizan la presión mínima en los puntos altos.

Tabla 4-8: Datos básicos de los nudos y las tuberías para el caso de estudio

Tubería	Longitud (km)	Diámetro (mm)	Nudo	Elevación (m)	Demanda base (l/s)	Coefficiente emisor ($m^{3-\gamma}/s$)	Turno de demanda (horas)
100	0.5	250	11	10	10	0.121221	0-6
111	0.5	200	12	0	20	0.026605	0-6
200	1.0	300	21	45	10	0.212212	6-12
211	0.5	175	22	50	15	0.058170	6-12
212	0.5	250	23	50	10	0.108260	6-12
213	0.5	175	24	55	15	0.083563	6-12
300	3.0	300	31	75	20	0.390568	12-15
311	0.6	200	32	80	20	0.056493	12-15
312	0.5	300	33	80	20	0.098951	15-18
313	0.6	200	34	85	20	0.053649	15-18
314	0.5	250	35	85	20	0.098423	15-18
315	0.6	200	36	90	20	0.091827	15-18
			RES	30	-	-	-

Cada bomba funciona las seis horas de riego del sector que alimenta. La P2 (sector de mayor cota) está equipada con un variador de velocidad adecuándose su velocidad de giro a las necesidades de presión del sistema. Las tres primeras horas gira al 75% de su velocidad nominal para, después, girar al 100% (Tabla 4-9). La puesta en marcha y parada de las bombas se realiza con controles horarios.

Tabla 4-9: Características de las bombas

BOMBA	Curva característica	Curva de rendimiento	Horario de funcionamiento	Característica de funcionamiento	Vel. de giro (α)
P1	$H_1=53.33 - 0.003704 Q^2$	$\eta_1=-0.0164 Q^2 + 1.8708Q + 19.929$	6-12 h	61.13 l/s; 39.49 mca.	1
P2	$H_2=136 - 0.00369 Q^2$	$\eta_2=-0.0096 Q^2 + 1.6707Q + 11.126$	12-15 h	52.09 l/s; 66.49 mca.	0.75
			15-18 h	106.13 l/s; 94.43 mca.	1

Los balances diarios de agua de cada sector (con las pérdidas aparentes incluidas en el agua consumida) los proporciona la adjunta Tabla 4-10. Las fugas se suponen dependientes de la presión y uniformes. Por ello se modelan con emisores nodales (exponente $\gamma=1,1$) de coeficientes proporcionales a la longitud de las tuberías que convergen en él (ver Tabla 4-8).

Tabla 4-10: Auditoría hídrica

	SECTOR 1 (0-6 horas)	SECTOR 2 (6-12 horas)	SECTOR 3 (12-15 horas)	TOTAL (0-18 horas)
$V_{inyectado}$ (m ³ /día)	737,42	1320,41	1708,77	3766,61
$V_{consumido}$ (m ³ /día)	648	1080	1296	3024
V_{fugado} (m ³ /día)	89,42	240,41	412,77	742,61
$\eta_{volumétrico}$	87,9%	81,8%	75,8%	80,2%

Simulando el funcionamiento diario del sistema (18 horas), con un intervalo hidráulico de 1 hora, el balance de potencias aportadas y consumidas (auditoría energética) calculadas a partir de los resultados que proporciona EPANET y siguiendo la metodología expuesta a lo largo de este punto 4.4, se obtiene (Tabla 4-11) el balance de potencias que sigue:

Tabla 4-11: Balance de potencias

	POTENCIA CONSUMIDA KW					POTENCIA APORTADA KW		
	Potencia útil	Potencia fugas	Potencia fricción	Potencia perdida bomba	Total consumida	Potencia natural	Potencia media bomba	Total aportada
TURNO 1 (0-6 h)	8,34	1,17	0,54	0	10,05	10,05	0	10,05
TURNO 2 (6-12 h)	32,44	7,28	1,95	8,76	50,43	17,99	32,44	50,43
TURNO 3 (12-18 h)	57,67	18,78	12,97	16,08	105,51	23,28	82,23	105,51
TURNO 3.1 (12-15 h)	35,66	10,85	2,79	8,05	57,35	15,33	42,02	57,35
TURNO 3.2 (15-18 h)	79,69	26,71	23,15	24,11	153,67	31,23	122,44	153,67

Su interpretación es inmediata. En todos los escenarios la potencia aportada (suma de la natural más la de eje) es igual a la consumida, suma de la útil entregada más las pérdidas (fricción en las tuberías, disipada en fugas y pérdida en bombas).

La Tabla 4-12 compara los resultados que proporciona el análisis energético realizado con los resultados del módulo energético de EPANET. Para simplificar, el coste de la energía se supone constante en el tiempo y con un valor medio de 0,1 €/kWh. Las tres diferencias se corresponden con los errores comentados:

- En el turno 1 (se riega la zona baja de la red), todo el aporte de energía es natural. EPANET no calcula la potencia suministrada. La omisión de la energía natural se repite en los tres escenarios. De otra parte, el gasto energético, con las bombas paradas, es siempre nulo.
- En el turno 2, a la omisión de la energía natural, hay que sumar el error en la estimación del coste de la energía. Se aprecia como EPANET mayor el coste con el factor previsto (24/18).
- En el escenario 3 conviven los tres errores. No se contempla la energía natural y, en el turno 3.1, con la bomba girando al 75% de la velocidad nominal, hay un error de cálculo en el rendimiento que se traslada a la potencias y a los costes. Obsérvese que su relación ya no es 4/3. Es un valor superior (1,39) porque siendo el rendimiento de EPANET inferior al real, sobreestima la potencia de la bomba.

Tabla 4-12: Comparación análisis energético calculado y ofrecido por EPANET

	ANÁLISIS CALCULADO					ANÁLISIS EPANET		
	Potencia media kW	Potencia natural kW	Potencia media bomba kW	Rendimiento medio de la bomba	Coste día	Potencia media kW	Rendimiento medio de la bomba	Coste día
TURNO 1	10.05	10.05	0	-	-	-	-	-
TURNO 2	50.73	17.99	32.44	73.00	19.44	32.72	72.33	26.17
TURNO 3	105.51	23.28	82.23	80.58	49.34	84.78	76.21	67.82
TURNO 3.1	57.35	15.33	42.02	80.85		47.02	72.26	
TURNO 3.2	153.67	31.23	122.44	80.30		122.57	80.18	

De acuerdo con EPANET, el rendimiento medio de la bomba P2 es 76,21% mientras el rendimiento medio calculado para las condiciones de funcionamiento del ejemplo es 80,58%. Como se ha comentado, EPANET no calcula correctamente el rendimiento cuando la bomba no

gira a su velocidad nominal. La inexactitud se muestra en la Figura 4-12. Lo que hace EPANET es trasladar a la curva de rendimiento (nominal) el valor de caudal obtenido para una velocidad de giro diferente (Punto 3.1 de la figura, 72,26%), pero teniendo en cuenta las leyes de semejanza que se aplican para una bomba a diferentes velocidades de rotación, el resultado correcto es 80,85%.

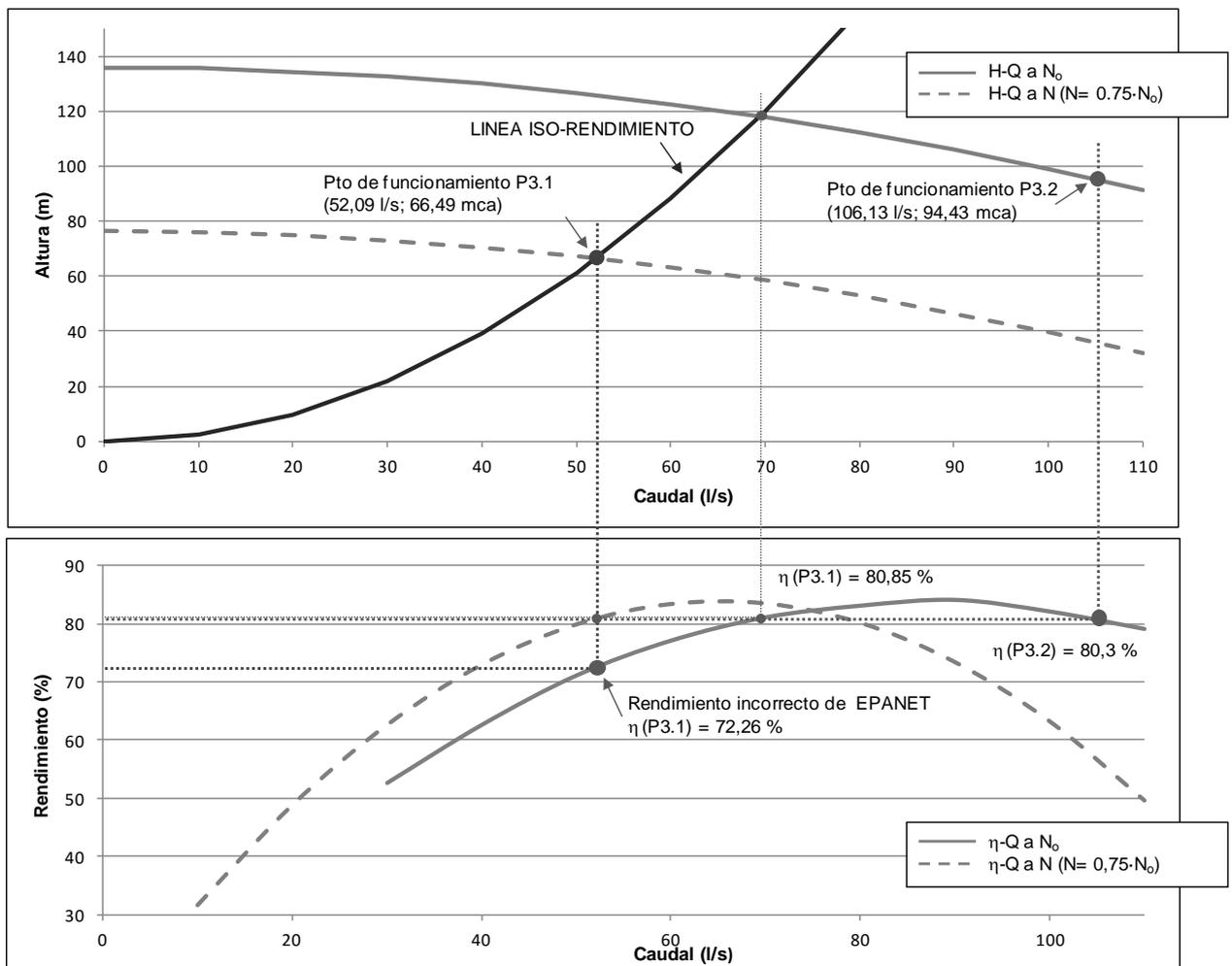


Figura 4-12: Características del punto de funcionamiento trabajando a dos velocidades distintas

Conviene subrayar que, suponiendo que existieran tarifas contratadas distintas para los diferentes bombeos, EPANET no puede aplicar precios de la energía distintos como tampoco puede considerar términos de potencia diferentes.

4.4. Conclusiones

La realización de ambas auditorías es el paso previo y necesario a la definición de estrategias para la reducción de la energía en un abastecimiento de agua. Pues se requiere conocer dónde va a parar tanto el agua como la energía que se inyecta en el sistema.

La relación entre ambas auditorías es clara, no se puede realizar la auditoría energética si previamente no se ha realizado la hídrica, pues es el agua la que lleva embebida la energía, por tanto se necesita conocer si ésta se entrega a los usuarios (energía útil), se pierde por la red (fugas) o simplemente se desconoce su destino final (pérdidas aparentes).

Reducir el agua inyectada (reduciendo el consumo o las pérdidas) es reducir la energía inyectada. Tal como se verá más adelante una de las medidas más efectivas de cara a la reducción de la energía es la reducción de las fugas, pues reducir las fugas es reducir la energía que se pierde con ellas, la energía de fricción en las tuberías, y por tanto la energía que se inyecta en el sistema, además por supuesto del ahorro del agua que supone, menos agua perdida es menos agua extraída del medio natural.

Del global de ANR en una red, las pérdidas aparentes no son tan críticas desde el punto de vista de las auditorías energéticas, pues es un consumo real aunque la empresa no la facture. Puede suponer una desvirtualización de los rendimientos del sistema, dado que el volumen demandado por los usuarios sería mayor al registrado por la compañía. La Energía mínima requerida por los usuarios, E_{uo} , sería mayor, y por tanto el valor del rendimiento ideal del sistema también sería mayor, mientras que la diferencia entre el rendimiento ideal y el real sería menor, puesto que existe una energía perdida en fugas que no es tal, puesto que sí está siendo entregada a los usuarios. En cualquier caso, cuestiones que no van a influir en el enfoque global de la evaluación del diagnóstico.

Las auditorías hídricas y las estrategias tanto de detección de fugas como de reducción de éstas han sido ampliamente estudiadas, grupos como el IWA Water Loss Task Force o publicaciones como la presentada por el GIZ, comentadas en este capítulo, ponen de manifiesto el enorme trabajo que se ha hecho y se está realizando en este campo. Trabajos con un enfoque global, primero detectar y cuantificar el destino del agua inyectada y después centrar las estrategias en los resultados obtenidos. Ese es el objetivo de la auditoría energética presentada, primero saber desde la perspectiva global de todo el sistema el destino de la energía, para después centrar el problema allí donde se requiere. Existen numerosos estudios que se centran en el aumento del rendimiento de las estaciones de bombeo, como por ejemplo el magnífico trabajo realizado por el BID y comentado también en este capítulo y sobre el que se volverá en un capítulo posterior, pero ese trabajo se centra en un punto concreto del sistema, las estaciones de bombeo, el enfoque que aquí se propone y que se persigue en todo el proceso presentado en este trabajo es un enfoque más amplio, analizar de forma global todo el sistema para luego centrar las estrategias en los puntos más débiles, pero para ello hay que conocer el sistema completo, pues

es posible tal como se comenta en los siguientes capítulos que el problema resida en el propio diseño de la red y no en elementos concretos como las estaciones de bombeo.

En estos momentos en que la eficiencia energética y sus consecuencias (emisiones de GEI) son de suma prioridad, el componente energético de EPANET debería ser actualizado y completado. EPANET (el programa y Toolkit) han desempeñado un papel invaluable en la práctica y la investigación y, con algunas mejoras, seguirá aumentando su brillante hoja de servicios. Pero no hay que olvidar, que aunque herramientas como la auditoría se pueden programar con Toolkit, se trata de una posibilidad que no está al alcance de todos los usuarios de EPANET, ni tampoco lo están los softwares comerciales que puedan implementar el cálculo energético de la red de distribución, como sí lo está al alcance de todos EPANET. Bajo esta premisa se ha desarrollado ITAEnergy, para que cualquier abastecimiento (urbano o de riego) con un dominio a nivel de usuario de EPANET pueda obtener los valores de su auditoría energética, Y más importante aún, pueda valorar energética y por tanto económicamente los posibles cambios en su sistema, Estos cambios pueden ser implementados en sus modelos previamente a su ejecución, lo que permitirá verificar que los requisitos del sistema continúan satisfaciéndose.

Capítulo 5

Influencia de la configuración del sistema

5.1. Introducción

Realizado el diagnóstico y acometidas las auditorías es el momento de tratar las estrategias que van a permitir al abastecimiento ser más eficiente desde el punto de vista del uso de ambos recursos; el agua y la energía. Se debe tener en cuenta además, que de todas las acciones posibles, se tiene que converger hacia aquéllas que económicamente sean más rentables.

Dentro del grupo de acciones propuestas, en la Figura 5.1 agrupadas en acciones operacionales y acciones estructurales, que se desarrollan detenidamente en el capítulo siguiente, existe una medida que por su gran ahorro energético merece una especial atención. Se trata de la acción más directa para reducir o eliminar la energía de exceso. Esta energía, tal como se ha comentado, es una energía evitable a todos los efectos, o al menos, debería serlo.

La energía topográfica puede ser reducida o recuperada, pero difícilmente y a no ser que se modifique el *layout* del sistema, por ejemplo por medio del desacoplamiento o sectorización de la red, no puede ser evitada, de ahí que forme parte del rendimiento ideal. Pero la energía de exceso, se trata propiamente de esto, un exceso. Por lo tanto, el objetivo principal antes de acometer ninguna otra medida debe ser el estudio de la posibilidad de eliminarla.

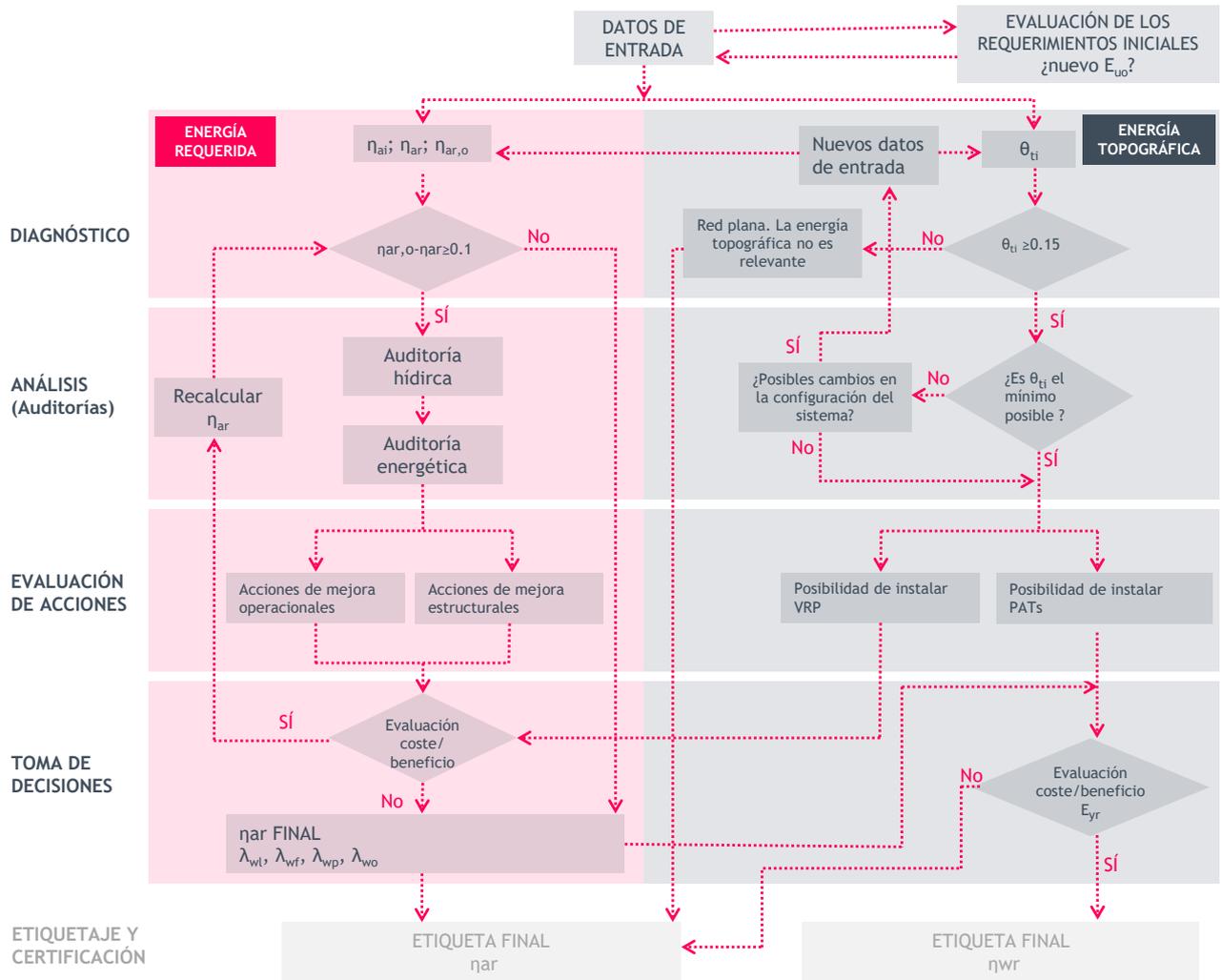


Figura 5-1: Diagrama de flujo para mejorar la eficiencia en PWTS.

La energía de exceso ideal está ligada a la existencia de un depósito de regulación en cabecera. La energía de exceso real puede ser consecuencia, además de la existencia del depósito, de un exceso de altura aportada por las bombas. Pero la energía de exceso ideal, supone contemplar ya en el sistema ideal (el mejor sistema posible) una energía innecesaria, y por lo tanto condenar al sistema desde su punto de partida a bajos rendimientos.

Este capítulo analiza la implicación energética de los depósitos de regulación en cabecera, una práctica habitual por el teórico ahorro económico que supone bombear únicamente en las horas en las que la energía resulta más económica, rehuendo el bombeo en horas punta, situación inevitable cuando se suministra en directo.

5.2. Suministro de agua en directo o indirecto, desde la perspectiva de la evaluación energética

Desde hace más de tres décadas, el diseño óptimo de redes de agua a presión ha merecido la atención de muchos investigadores. Artículos pioneros (Alperovits y Shamir, 1977) abrieron una de las puertas más prometedoras a investigadores hidráulicos. Inicialmente el diseño buscaba la minimización del coste de la red, bajo la restricción de satisfacer la demanda requerida a la presión adecuada en diferentes condiciones de operación. Las diferentes metodologías comparten los mismos objetivos, pero difieren sobre el enfoque matemático para encontrar la solución óptima (Morgan y Goulter, 1985; Savic y Walters, 1997). Recientemente otros aspectos, como la fiabilidad de la red (Todini, 2000) o la energía y sus impactos ambientales asociados (Wu et al., 2010) se están incluyendo en la función objetivo. Pero sean cuales sean los objetivos se centran en el proceso de dimensionado, y en pocos casos se presta atención a la configuración de la red.

Los tanques de agua han sido, y son, elementos clave en los sistemas de distribución de agua. Por lo tanto, no es una sorpresa que todavía merezcan la atención de los investigadores hidráulicos, principalmente en cuanto a sus parámetros principales (por ejemplo, ubicación, altura, volumen, niveles mínimo y máximo, relación diámetro-altura y volumen de emergencia-volumen total). Por otro lado, aspectos energéticos desde la perspectiva de sus correspondientes costes vinculados a las tarifas eléctricas también han sido ampliamente estudiados (Ghimire y Barkdoll, 2010). Por último, el consumo de energía con sus implicaciones ambientales (emisiones de gases de efecto invernadero) también se ha considerado en estudios más recientes, dentro del proceso de optimación global desde perspectivas multiobjetivos (Wu et al., 2010). En todos estos modelos el depósito se incluye como parte del sistema global.

El enfoque que se plantea a continuación es mucho más simple. Se considera una red de agua en funcionamiento y se evalúa sus necesidades de energía con y sin depósito. En otras palabras, se compara el suministro en directo e indirecto desde un punto de vista energético, pero también económico y ambiental.

Desde un punto de vista energético, la configuración tradicional de una red que cuenta con un depósito en cabecera con suficiente elevación para satisfacer los requisitos de presión y flujo, suele ser ineficiente. Hace algunos años este diseño convencional fue universalmente adoptado con el fin de evitar las interrupciones del suministro de agua, vinculadas a averías en el sistema eléctrico. Pero con el paso del tiempo, los sistemas eléctricos son cada vez más fiables (por otra parte, los generadores electrógenos pueden suplir fallos inesperados) y las bombas de velocidad variable pueden adaptarse fácilmente a casi cualquier patrón de consumo, por esto, los sistemas de bombeo de agua en directo están ganando importancia frente a la configuración más tradicional. A pesar de esto el miedo a abandonar el uso de los depósitos en cabecera es generalizado entre las empresas de suministro, principalmente por abandonar la seguridad del

suministro, pero por otro, por la mayor complejidad técnica y de control que supone el bombeo en directo con velocidad variable. Sólo la constatación de un ahorro económico importante verificado sobre sus propios sistemas, podría conducirles a un nuevo planteamiento de sus configuraciones de abastecimiento.

Cabe destacar que en los nuevos diseños de sistemas de riego a presión los tanques no están incluidos. Obviamente la fiabilidad en usos urbanos debe ser mucho mayor que en riego, pero en cualquier caso, hasta hace pocos años los depósitos también eran muy comunes en estos sistemas.

5.2.1. Diagnóstico energético

Tal como se ha presentado en el Capítulo 3, el diagnóstico energético de una red de agua a presión permite estimar el máximo rendimiento energético que puede alcanzar un determinado sistema, el rendimiento ideal (η_{ai}), y compararlo con el rendimiento real que tiene ese mismo sistema, (η_{ar}). La diferencia entre ambos rendimientos, proporciona una visión global del margen de mejora disponible para ese sistema concreto.

Por tanto, el rendimiento ideal supone el límite superior de eficiencia energética para el abastecimiento, siendo ideal, es inalcanzable, pero sirve de referencia para conocer, con la configuración actual del sistema, el máximo rendimiento. Este rendimiento ideal, supone la ausencia total de pérdidas, por lo que proporciona una valoración no del funcionamiento del sistema sino de su configuración. Esto implica que independientemente de cómo funcione la red el rendimiento es invariante, siempre y cuando no se modifique la configuración del sistema.

Tal cual se ha visto, los términos energéticos que intervienen en el cálculo del rendimiento ideal y real, son:

$$\eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} = \frac{E_{uo}}{E_{uo} + E_{ti} + E_{ei}} \qquad \eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{sr}} = \frac{E_{uo}}{E_{uo} + E_{tr} + E_{er} + E_{rg}} \qquad (5-1)$$

Donde E_{uo} , es la Energía mínima requerida por los usuarios, igual tanto en el sistema ideal como en el real. Esta energía representa la mínima energía que debe ser suministrada al sistema para cumplir con los estándares de presión (p_0) y demanda de los usuarios (v_j). E_{ti} y E_{tr} , representan la energía topográfica del sistema ideal y real, respectivamente. Es aquella que se debe entregar al sistema consecuencia de la topografía del terreno y viene determinada por la altura del nudo más desfavorable (z_h). Para atender los requerimientos de demanda y de presión en el nudo más alto, el resto de nudos sufrirán un exceso de presión inevitable. Cuanto más regular sea el terreno, menor será este término. Por último, E_{ei} y E_{er} , son el exceso de energía ideal y real. Este exceso de energía, es consecuencia de la presión que se da en el nudo más desfavorable por encima de la presión mínima requerida, y por tanto, supone un exceso de presión evitable. El término E_{rg} ,

que sólo existe en el sistema real, se corresponde con las pérdidas que se dan en el sistema de distribución, consecuencia de las pérdidas de agua, la fricción en las tuberías y elementos de la instalación o las ineficiencias en los grupos de bombeo.

Por tanto, la diferencia entre ambos rendimientos reside en la presencia de pérdidas. Cuanto mayor sea la diferencia entre ambos rendimientos mayor son las ineficiencias energéticas existentes del sistema.

En el caso ideal, la diferencia entre ambos escenarios (con y sin depósito de regulación) reside únicamente en la existencia del término de exceso de energía. Por tanto, el aumento de la eficiencia en un sistema de distribución por la eliminación del depósito de regulación en cabecera es directo y cuantificable a partir de las expresiones del rendimiento ideal para ambos casos; $\eta_{ai,1}$ (rendimiento ideal del caso *con* depósito) y $\eta_{ai,2}$ (rendimiento ideal del caso *sin* depósito). Las siguientes expresiones permiten calcular ambos términos:

$$\eta_{ai,1} = \frac{E_{uo}}{E_{si,1}} = \frac{E_{uo}}{E_{uo} + E_{ti} + E_{ei}} \quad \eta_{ai,2} = \frac{E_{uo}}{E_{si,2}} = \frac{E_{uo}}{E_{uo} + E_{ti}} \quad (5-2)$$

$$\eta_{ai,2} = \eta_{ai,1} \left[1 + \frac{E_{ei}}{E_{si,2}} \right] \quad (5-3)$$

siendo E_{ei} función de la altura del depósito $E_{ei} = \gamma \sum v_j \frac{p_{ei}}{\gamma} = \gamma \sum v_j \left[H_{dep} - \left(z_h + \frac{p_o}{\gamma} \right) \right] = \sum v_j \Delta H$, si se considera ΔH igual a la diferencia entre la altura del depósito y la altura mínima requerida (cota del nudo más alto más la presión de servicio), entonces ambos rendimientos ideales están relacionados por:

$$\eta_{ai,2} = \eta_{ai,1} \left[1 + \frac{\gamma V \Delta H}{E_{si,2}} \right] = I_{ds,i} \eta_{ai,1} \quad (5-4)$$

Esta ecuación evidencia que, en el caso ideal, el suministro en directo es desde el punto de vista energético siempre más eficiente que el suministro indirecto. El margen de mejora está dado directamente por el indicador de mejora del suministro en directo I_{ds} (*Indirect Supply Improvement Indicator*). $I_{ds,i}$ en el caso de un sistema ideal y siempre igual o mayor que a 1. Sólo en el caso que ΔH fuera igual a cero, I_{ds} sería igual a 1. Pero este caso no tiene sentido dado que en la práctica se requiere energía adicional para vencer las pérdidas de carga desde el depósito hasta el consumo más desfavorable, por lo tanto la altura disponible en el depósito no puede ser exactamente la misma que la demandada en el nudo más desfavorable.

$$I_{ds,i} = 1 + \frac{\gamma V \Delta H}{E_{si,2}} = 1 + \frac{\gamma V \Delta H}{E_{uo} + E_{ti}} \quad (5-5)$$

En la Figura 5-2 se aclara lo anterior; se observa que cuanto más alto es el depósito con respecto al máximo necesario más ineficiente es el sistema ($E_{ei} = \sum v_j \Delta H$). Por último, es importante destacar que los otros dos términos del rendimiento permanecen constantes independientemente de cómo se realice el suministro, dado que dependen únicamente de la configuración del sistema, independientemente de la elevación del tanque.

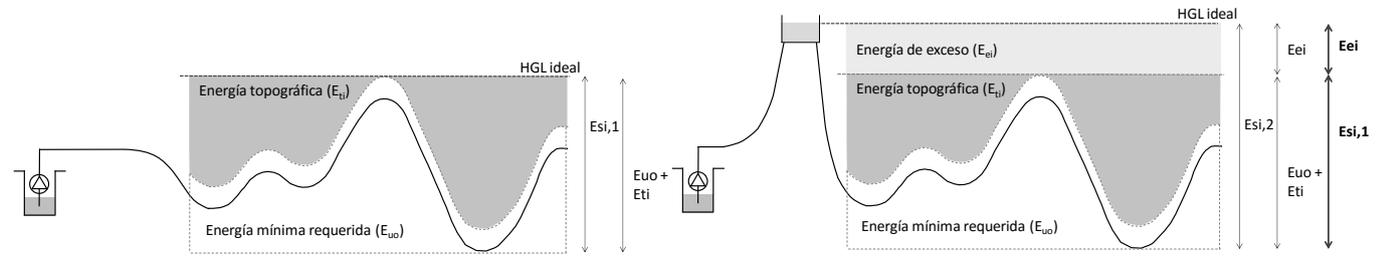


Figura 5-2: izda.) Escenario 1 (suministro indirecto) drcha.) Escenario 2 (suministro en directo)

5.2.2. Ejemplo numérico

Se presenta a continuación un ejemplo numérico con el objetivo de comparar las eficiencias energéticas de dos sistemas idénticos con diferente configuración en la inyección. El propósito de este ejemplo es evaluar cómo afecta la existencia de depósitos de regulación (en cabecera) a la eficiencia de los sistemas desde el punto de vista energético. Se plantean, por tanto, balances energéticos en los dos escenarios posibles. Para la misma red, sin modificar los requerimientos de volumen ni de presión mínima, se establecen dos posibles configuraciones de suministro de energía:

- Un primer escenario con una bomba que inyecta agua desde un pozo a un depósito de regulación a la entrada de la red.
- Un segundo escenario que contempla eliminar el depósito y bombear en directo al sistema. Para este segundo escenario el grupo de presión estará formado por una bomba de velocidad fija y una bomba de velocidad variable de manera que su velocidad de giro se adapte en cada momento a los requerimientos del sistema.

Las características de diseño del sistema, exigencias, requisitos de presión, características de las fugas y eficiencias del bombeo son en ambos casos iguales. Se ha utilizado EPANET como programa hidráulico de cálculo. Las fugas son función de la presión y en ambos escenarios los emisores nodales son iguales de forma que se pueda representar la disminución del volumen fugado total como consecuencia únicamente de la variación de la presión. Por tanto, en ambas configuraciones las variaciones de energía serán exclusivamente atribuidas a los diferentes esquemas de suministro.

5.2.2.1. Datos Básicos

La Figura 5-3 muestra un esquema simplificado de la red analizada en los dos escenarios posibles.

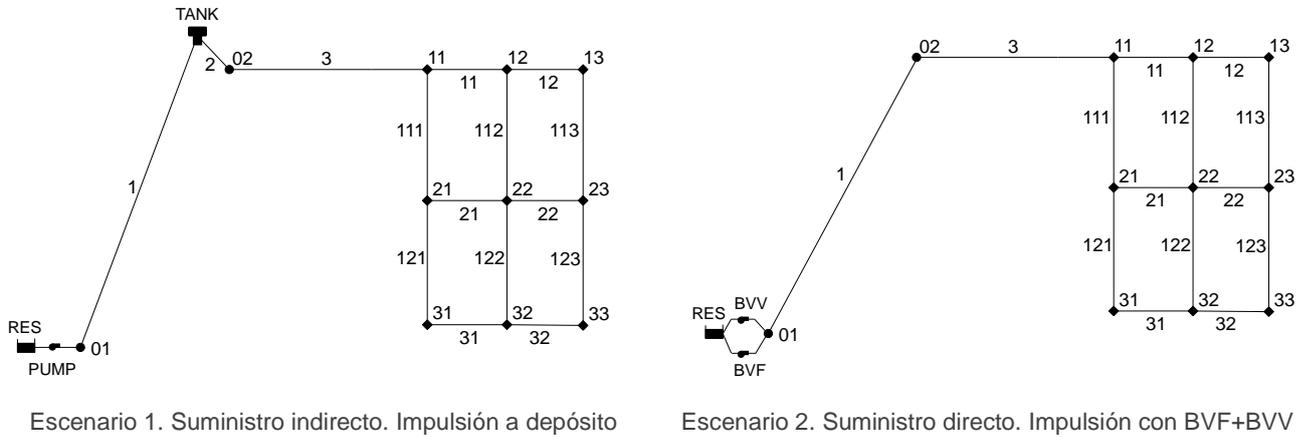


Figura 5-3: Esquemas de los escenarios analizados

Para facilitar la trazabilidad de los cálculos, la Tabla 5-1 muestra las características de los nudos y de las tuberías. Para simular las fugas de la red, los nudos de demanda se caracterizan con los coeficientes emisores que se muestran también en la tabla. Las fugas se suponen dependientes de la presión según la expresión $q_{li}(t_k) = C_{E,i} \cdot [\Delta H_i(t_k)]^\gamma$ (Rossman 2000), donde $C_{E,i}$ ($m^{3-\gamma}/s$) es el coeficiente asignado a cada nudo, $\Delta H_i(t_k)$ (m) es la variación de presión en la fuga y $\gamma=1,1$ es el exponente emisor que caracteriza las propiedades del material de las tuberías. La rugosidad de las tuberías considerada es de 0,1 mm.

Tabla 5-1: Características de los nudos y las líneas de la red

LÍNEAS	1	2	3	11	12	111	112	113	21	22	121	122	123	31	32
Longitud (m)	1000	10	2000	2000	2000	4000	4000	4000	2000	2000	4000	4000	4000	2000	2000
Diámetro (mm)	350	350	350	250	200	200	200	150	150	150	150	150	150	100	100

NUDOS	01	02	11	12	13	21	22	23	31	32	33	RES	TANK
Elevación (m)	0	37	37	51	44	29	33	26	16	19	12	0	90
Demanda base (l/s)	0	0	3	5	3	2	5	5	7	2	6	-	-

C. Emisor (m ³ ·γ/s)	-	-	0,028	0,051	0,028	0,041	0,044	0,041	0,009	0,023	0,020	-	-
------------------------------------	---	---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---	---

El diámetro del depósito es de 20 metros, con una altura de 5 metros, nivel máximo y mínimo de 4 metros y 2 metros respectivamente, con un nivel inicial de 3 metros y una cota de solera de 90 metros. La altura del depósito es la mínima altura posible para que en todo momento la presión en el nudo más desfavorable (nudo 12) no descienda de la presión mínima de servicio (p_0) que es de 20 mca. Todos los nudos de consumo poseen la misma modulación horaria de consumo (Tabla 5-2).

Tabla 5-2: Curvas de modulación de los nudos de consumo

HORA	00:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
Factor	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,9	1,3	1,4	1,7	2,7	2,4
HORA	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Factor	1,8	1,3	1,3	1,2	0,8	0,7	0,7	1,1	1,2	0,7	0,6	0,4

Los dos escenarios, tal como se ha comentado, difieren en la estación de bombeo. En el primer escenario (caso con depósito de regulación), la bomba se pone en marcha según una serie de controles que dependen tanto de la hora del día como del nivel en el depósito, priorizando que la bomba esté en funcionamiento durante las horas valle y llano, y evitando, siempre que sea posible, que funcione durante las horas punta. Esto permitirá comparar económicamente los diferentes escenarios. En el segundo escenario, el grupo de presión está formado por dos bombas en paralelo, una bomba de velocidad fija y una bomba de velocidad variable. Durante toda la simulación, se ajusta la velocidad de giro de la segunda bomba, en cada instante, de manera que la presión en el nudo más desfavorable (nudo 12) se mantenga prácticamente igual a la presión de servicio (20 mca) evitando exceso de presión en este nudo, poniendo en marcha la BVF sólo cuando se requiere un aporte extra de caudal. Los valores de la velocidad de giro que adopta la bomba en cada instante ($\alpha=N/N_0$) junto con las curvas características de las bombas, se muestran en la Tabla 5-3. Se han seleccionado las bombas de manera que el rendimiento medio de los grupos de presión para cada escenario sea prácticamente el mismo, de esta forma las diferencias en la energía entregada a cada uno de los sistemas será consecuencia únicamente de la configuración y no de la eficiencia de los grupos de bombeo.

Tabla 5-3: Características y funcionamiento de las bombas

ESCENARIO 1												
	Curva característica (H (m)) – Caudal (Q (l/s))						Curva de rendimiento (Q (l/s))					
BVF	$H_1 = 140 - 0,0035 Q^2$						$\eta_1 = - 0,0026 Q^2 + 0,6617 Q + 35,358$					
ESCENARIO 2												
BVF	$H_{2-BVF} = 108 - 0,004219 Q^2$						$\eta_{2-BVF} = - 0,0023 Q^2 + 0,5051 Q + 53$					
BVV	$H_{2-BVV} = 110 + 0,2165 Q - 0,082 Q^2$						$\eta_{2-BVV} = - 0,017 Q^2 + 1,9528 Q + 24,687$					
HORA	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
BVF Estado	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1
BVV Velocidad relativa (α)	0,828	0,820	0,820	0,813	0,819	0,828	0,885	0,948	0,965	-	1	0,931
HORA	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
BVF Estado	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BVV Velocidad relativa (α)	-	0,948	0,948	0,931	0,872	0,859	0,859	0,915	0,931	0,859	0,847	0,828

A pesar que la variación de la demanda se repite cada 24 horas, el ciclo de llenado y vaciado del depósito no tiene por qué coincidir con un día exacto, por lo que, con el objetivo de disminuir la influencia del depósito en el balance energético y aportar una visión más general al análisis económico, la simulación se extiende a lo largo de un año. En cualquier caso, este valor de tiempo es muy superior al tiempo mínimo necesario para evaluar el largo plazo, $t_{p,T}$, que se estima en 10 días (Cabrera et. al, 2010), y es el valor de tiempo que implica que el máximo valor de la energía de compensación no representa un porcentaje superior al 1% de la energía de entrada. El intervalo de simulación en todos los casos es de una hora, intervalo de tiempo que coincide con la variación supuesta del consumo.

5.2.2.2. Resultados del diagnóstico energético

La siguiente tabla (Tabla 5-4) muestra los resultados obtenidos del diagnóstico energético. Para realizar este diagnóstico únicamente es necesario disponer de los datos más básicos del abastecimiento, no se requiere disponer de un modelo matemático del sistema ni se requiere de la realización completa de la auditoría. El diagnóstico permite evaluar cuál es el estado ideal del sistema a partir de las cotas de los nudos de consumo, su demanda y el valor de la presión mínima de servicio que requieren. Para comparar la situación ideal con la situación real del

sistema sólo se necesita conocer la energía aportada al sistema, esto es la suma de la energía de las bombas ($E_{sr,p}$) y de la energía natural ($E_{sr,n}$). Como en el ejemplo numérico que se está desarrollando la cota de la lámina de agua en el embalse es cero (siendo ésta la cota mínima de referencia para todo el sistema), la energía natural aportada es cero. La energía real aportada por las bombas se puede conocer a partir del consumo eléctrico reflejado en las facturas eléctricas, o como en el caso de este ejemplo (ficticio) a partir de la altura, el caudal y rendimiento de la bomba.

Tabla 5-4: Resultado del diagnóstico energético sobre los dos escenarios presentados

	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2
Energía mínima requerida por los usuarios (E_{uo}) (constante independientemente de si es sistema ideal o real)	158.176 kWh	158.176 kWh
Energía topográfica ideal (E_{ti})	74.644 kWh	74.644 kWh
Energía de exceso ideal (E_{ei})	72.142 kWh	0,00 kWh
Energía suministrada ideal total (E_{si})	304.962 kWh	232.820 kWh
Rendimiento ideal (η_{ai})	0,519	0,679
Energía suministrada real total (E_{sr})	661.917 kWh	463.867 kWh
Rendimiento real (η_{ar})	0,239	0,341

Los valores ideales son los que se han comentado anteriormente (0,519 y 0,679). Ambos están relacionados por el indicador ideal de mejora del suministro en directo ($I_{ds,i}$), que en este caso particular es 1,31. Las eficiencias reales (0,239 y 0,341) son, obviamente, más bajas porque incluyen las pérdidas en el sistema. Tal como se ha comentado, la diferencia, no importa si es ideal o real, se debe a la energía de exceso que requiere y que proporciona el depósito, dado que es la única diferencia entre ambos escenarios. Si la alimentación es en directo, la energía será la mínima necesaria para alcanzar los estándares de presión en el nudo más desfavorable (siempre que el grupo de presión esté ajustado y cuente con variador de frecuencia) en el otro caso, el depósito es quien impone un valor de altura constante en la bomba. En otras palabras, desde el punto de vista energético el depósito es un elemento “rígido”. Otra cuestión diferente es la forma de mejorar las ineficiencias reales (los valores ideales son el límite superior inalcanzable) sin importar el escenario considerado.

Por último, otro aspecto importante a considerar es la relación entre las eficiencias reales de ambos escenarios, es decir, el indicador real de mejora de suministro en directo ($I_{ds,r}$). En este caso, la relación entre ambos rendimientos reales es 1,43 ($=0,341/0,239$) que, aunque siendo superior tiene el mismo orden de magnitud que el ideal, $I_{ds,i}$. Por tanto, la pregunta a responder

es si, $I_{ds,i}$ constituye la referencia más baja que se puede esperar por el suministro en directo con respecto al indirecto. La Tabla 5-5 ofrece la respuesta si los rendimientos de las bombas son similares en ambos escenarios; $I_{ds,r}$ siempre será mayor que $I_{ds,i}$. Esto es así, porque todas las pérdidas de energía (que no existen en el caso ideal) son menores en el suministro directo, al disponer de menor altura en cabecera (ésta está ajustada) las sobrepresiones son menores, lo que implica menor caudal fugado (menores pérdidas por fugas de agua), la fricción en las tuberías es menor, pues menor presión implica menos fugas, lo que se traduce en menos caudal circulante por las tuberías y menos energía perdida por fricción en las tuberías. Debido a esto $I_{ds,i}$ es una buena referencia del margen de mejora.

El exceso de presión suministrado por el depósito a lo largo del día se puede eliminar por lo general con una válvula reductora de presión (VRP), excepto para la demanda pico cuando este exceso es cero, puesto que la elevación del depósito es la óptima. Su presencia no modifica los valores ideales pero sí se ven afectados (y mejorados) los valores reales, ya que como la presión se reduce a lo largo del día, las fugas son más pequeñas. En este caso particular con la instalación de una VRP cerca del nudo 2 (antes de la red) el nuevo valor de rendimiento real es 0,249 (antes 0,239). Sin importar el escenario la identificación precisa de las mejoras con la evaluación de coste y beneficio requiere de una auditoría energética.

5.2.2.3. Resultados de la auditoría energética

Para los escenarios anteriores se puede realizar la auditoría energética presentada en el capítulo anterior, ya que se cuenta con el modelo matemático de la red y la auditoría hídrica. La auditoría energética (desarrollada ampliamente en el Capítulo 4) va un paso más allá que el diagnóstico, pues requiere mucha más información. La Tabla 5-5 muestra los resultados para ambos escenarios. Las primeras filas se corresponden con el balance general del agua inyectada. Como se puede observar, la diferencia se debe a la cantidad de agua fugada (mayor en el primer caso dado que las presiones son mayores) pues el volumen demandado es el mismo en ambos escenarios. En cuanto a los términos de energía la Tabla 5-5 evidencia lo siguiente:

- La energía natural es cero, ya que el embalse tiene la cota más baja del sistema.
- La energía mínima requerida por los usuarios, E_{uo} , ya estimada en la Tabla 5-4, es como se ha dicho la misma en ambos escenarios.
- El exceso de energía entregada es diferente, ya que se tiene en cuenta tanto la energía topográfica real como la energía de exceso real. En el primer escenario ambos términos están presentes mientras que en el segundo, el exceso de energía es cero (la bomba se ajusta en todo momento a la energía requerida por el usuario más desfavorable). Por lo tanto, en el segundo escenario toda la energía entregada a los usuarios por encima de la presión requerida se debe a la energía topográfica real, que aunque supone una sobrepresión en los nudos de menor cota, es inevitable.

- La energía perdida por fugas también es menor en el segundo escenario debido a que la presión también es menor.
- Las pérdidas por fricción son menores, tal cual se ha comentado antes, porque los caudales circulantes son menores.
- En el suministro indirecto, y después de un año de simulación el término de energía de compensación (relacionado con la variación del nivel de agua en el depósito entre el instante inicial y el final) es prácticamente cero. En el segundo escenario, sin depósito, es nulo.
- Por último, aunque el rendimiento de las bombas es prácticamente el mismo en ambos escenarios (alrededor de 0,76), las pérdidas son diferentes porque los volúmenes bombeados y las alturas son distintas.

Tabla 5-5: Resultados de la auditoría energética para ambos escenarios

			ESCENARIO 1	ESCENARIO 2
VOLÚMENES (m³/año)				
V _{inyectado} (m ³ /año)			1.939.660	1.654.730
V _{consumido} (m ³ /año)			1.203.360	1.203.360
V _{fugado} (m ³ /año)			736.300	45.1370
Rendimiento volumétrico (η_v)			62.04%	72.72%
ENERGÍAS (kWh/año)				
ENERGÍA CONSUMIDA (kWh)	Energía útil	Energía mínima requerida por los usuarios (E _{uo})	158.176 (24.52%)	158.176 (34.10%)
		Exceso de energía entregada a los usuarios (E _{tr} + E _{er} / E _{tr} + 0)	85.907 (13.32%)	47.440 (10.23%)
	Energía perdida	Energía perdida en fugas (E _{fl})	151.806 (23.54%)	82.773 (17.85%)
		Energía perdida en fricción (E _{fr})	95.792 (14.85%)	71.508 (15.42%)
		Energía perdida en el estación de bombeo (E _{rp})	153.287 (23.76%)	103.945 (22.41%)
		Energía de compensación (ΔE_c)	49.24 (<0.01%)	0
	Energía consumida total		645.018	463.844
	ENERGÍA SUMINISTRADA (kWh)	Energía de eje (suministrada por las bombas) (E _{sr,p})		661.917
Energía natural (E _{sr,n})		0	0	

Es muy importante destacar que, debido a que en el primer escenario el nivel en el depósito puede alcanzar el nivel máximo permitido durante el intervalo de cálculo hidráulico (el cálculo en EPANET no es un proceso continuo), puede cometerse un error apreciable en la auditoría (la energía que entra no es exactamente la misma energía que sale). En otras palabras, el paso físico real difiere del paso hidráulico de cálculo. En el caso del suministro en directo, ambos intervalos van de la mano por lo que el error es prácticamente inapreciable. Esto se evidencia en la Tabla 5-5, cuando se compara la energía consumida con la suministrada. En el segundo escenario el error es prácticamente inapreciable (0,005%), mientras que en el primero, aunque no es significativo desde el punto de vista de la ingeniería, es bastante notable (2,55%). En particular este error puede minimizarse reduciendo el intervalo de cálculo hidráulico, en concreto para los intervalos simulados de 15, 5 y 1 minutos, el error se reduce a 0,95%, 0,18% y 0,06%, respectivamente. En cualquier caso, los resultados mostrados en la Tabla 5-5 corresponden a un intervalo de cálculo considerado de 1 hora, el intervalo de cálculo más frecuente en la simulación de redes a presión.

Con todo, el análisis de los resultados de la Tabla 5-5, pone claramente de manifiesto los inconvenientes energéticos del suministro indirecto. El consumo de energía en el suministro directo es el 70% del suministro con depósito de regulación, la misma relación que existe entre los rendimientos reales ($0,239 / 0,341 = 0,7$). Obviamente, su inverso es el valor del indicador de mejora de la eficiencia real por suministro en directo, $I_{ds,r}$.

Por otra parte, para mejorar el rendimiento real del sistema, no importa el escenario considerado, es necesario tener en cuenta el desglose energético de la auditoría, éste se analiza a continuación:

- El porcentaje que corresponde a la energía mínima requerida por los usuarios es la eficiencia real del sistema. En este caso hay una pequeña diferencia en el escenario 1 (0,239 en la
- Tabla 5-4, 0,245 en la Tabla 5-5) debido al error cometido (2,55%) en este caso.
- El exceso de energía suministrada a los usuarios es importante, aunque mucho menos relevante que las pérdidas vinculadas a las fugas y a la fricción. En el escenario 2, la energía topográfica real es menor que la ideal (47.740 kWh frente a 74.644 kWh). Esto se debe a que en el sistema las pérdidas por fricción son importantes.
- La energía topográfica sería mayor si el nudo más desfavorable (en este caso es el N12) estuviera situado en el extremo de la red (es decir, si el nudo 33 fuera el más alto). Obviamente la energía topográfica depende de la topografía de la red y de su configuración. Dos sistemas con los mismos desniveles topográficos, pueden suponer distintas energías topográficas reales dependiendo del entramado de tuberías y de la configuración de las mallas o las ramas.
- La energía embebida en fugas es muy relevante. Superior en el suministro indirecto, pues en este escenario la presión media de la red, en el tiempo y en el espacio, es de 55,73

mca, mientras que en el suministro en directo es de 40,53 mca. Parece claro que en este caso la primera acción para mejorar la eficiencia debe ser la reducción de la presión.

- La red está infradimensionada, lo que queda reflejado por las significativas pérdidas por fricción. Es evidente que las tuberías más críticas deberían tener un diámetro más grande.
- Como ya se ha mencionado, la instalación de una VRP en la red de suministro suele resultar una medida rentable. En este caso se podría reducir la presión media de 55,73 mca hasta 51,75 mca, con alrededor de una disminución del volumen fugado de 79.600 m³ al año. Las pérdidas por fricción se reducirían también porque los flujos circulantes por las tuberías también serían menores. Con todo, la instalación de una VRP se traduciría en una reducción del 4% de la energía total. En general, para los suministros indirectos las válvulas reductoras de presión son acciones con una buena relación coste/beneficio.
- Como sucede a menudo, las principales pérdidas se encuentran en la estación de bombeo, incluso con una eficiencia razonable (76%) en este caso también sucede. En términos absolutos, hay una diferencia importante entre el suministro indirecto y directo debido a que el volumen de agua a bombear es diferente y la altura también cambia.

5.2.3. Ventajas e inconvenientes del suministro en directo. Análisis económico

Las ventajas e inconvenientes de los depósitos de agua han sido ampliamente reportados en la literatura. En el lado positivo, se puede decir que éstos están diseñados con dos objetivos principales (van Zyl y Piller, 1996): para el suministro de agua a los consumidores con un grado de seguridad a un coste razonable y para proporcionar volúmenes de emergencia frente a eventualidades de incendio. Otro aspecto positivo del suministro indirecto, siempre subrayado, es la contribución a la reducción de la factura eléctrica, dado que permite que las bombas (siempre que éstas estén bien escogidas) trabajen en su punto de funcionamiento óptimo y sólo durante las horas en las que la energía sea más barata. El aspecto negativo, por otro lado también bien documentado (Clark et.al, 1996) es el impacto en la calidad del agua que se suministra, porque el tiempo de permanencia es mayor.

No es el objetivo de este trabajo discutir los pros y contras de los depósitos de regulación, aunque parece obvio que con el paso del tiempo, las compañías eléctricas han aumentado su fiabilidad dramáticamente y, por otro lado, ante posibles fallos eléctricos se puede recurrir a generadores de emergencia. Con respecto a su papel como reserva de volumen de emergencia, hay otras soluciones a este problema, desde los depósitos de compensación (sin los inconvenientes energéticos de los depósitos en cabecera) a los tanques comerciales, ubicados en o cerca de edificios o áreas estratégicas, listos para suministrar caudales máximos de emergencia. Estos inconvenientes son irrelevantes en el caso del uso agrícola, por esto los nuevos sistemas de riego presurizados tratan de no incluir depósitos.

Debido a que uno de los argumentos de más peso para el bombeo a depósito, la reducción de costes energéticos, está directamente relacionado con este trabajo, se ha realizado el análisis económico correspondiente a este caso práctico. Y la conclusión es muy clara, mientras que el consumo energético es un 30% menor (y las emisiones de GEI correspondientes) el ahorro económico es menor, alrededor del 25%, pero sigue siendo una reducción importante. Obviamente este porcentaje es muy dependiente de varios factores, entre ellos del tamaño del depósito, del patrón de demanda y del modelo tarifario (muy dependiente del país). En los cálculos que se presentan en este punto, los datos de partida han sido:

- La tarifa a considerar es la que corresponde a una potencia máxima de 450 kW (150 kW en este caso de estudio) con suministro de 1 a 36 kV. Esta tarifa considera tres periodos (8 horas valle, 12 horas llano y 4 horas pico). El precio del kWh para cada periodo horario es 0,090852 €; 0,133798 € y 0,165604 €, respectivamente.
- El término de potencia no se considera en este análisis, debido a que la potencia pico requerida es prácticamente la misma para ambos escenarios. En el primer escenario la bomba está funcionando prácticamente siempre en el mismo punto (110,78 l/s; 97,04 mca), y por tanto requiere la misma potencia (137,41 kW). En el segundo escenario la potencia solicitada varía ampliamente, pero la suma de la potencia máxima solicitada en la hora punta (10 am), en la que ambas bombas están funcionando a su velocidad nominal, es prácticamente la misma potencia (136,43 kW).
- El volumen del depósito (20 metros de diámetro y 5 metros de altura) es 1.570 m³, caso el 50% de la demanda diaria. Aunque hay muchos criterios, y muy diferentes, la mayoría de ellos más estrictos, el tamaño adoptado en este caso de estudio es un valor convencional.

A partir de estas hipótesis, los costes energéticos son respectivamente, 80.150 €/año y 59.948 €/año, una diferencia importante. Sobre todo teniendo en cuenta que la solución energética más barata minimiza los costes de inversión (el coste de la estación de bombeo es superior en el segundo de los casos debido al variador de frecuencia, pero la inversión principal, el depósito, se evita). Es obvio que con otros datos de partida, los resultados podrían ser diferentes, por ejemplo, cambiando el tamaño del depósito podría evitarse por completo las horas valle y pico (en el primer escenario el sistema funciona durante una hora pico), pero debería ser un depósito mayor y por tanto se incrementarían los costes de capital. Por tanto, de manera global y teniendo en cuenta también la inversión inicial, el suministro en directo supone también significativas ventajas económicas.

5.2.3.1. Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

Tal cual se ha visto a lo largo del Capítulo 2, las emisiones de GEI asociadas a la actividad de cualquier servicio se pueden clasificar en emisiones directas e indirectas. En el caso de las etapas de transporte y distribución del ciclo del agua las principales emisiones son las asociadas

a las emisiones indirectas, es decir aquéllas que están directamente relacionadas con el consumo de energía eléctrica. Las emisiones directas están presentes principalmente en las etapas de depuración y tratamiento. Existen otras emisiones indirectas, asociadas por ejemplo a los viajes, al transporte de los materiales y personal, la gestión de residuos, etc.

Por tanto, la reducción en el consumo eléctrico supone automáticamente una reducción en las emisiones de GEI asociadas al consumo. Para el cálculo de las emisiones indirectas asociadas al consumo eléctrico se recurre al factor de emisión de CO₂, también conocido como mix eléctrico (g CO₂/kWh), que representa las emisiones asociadas a la producción bruta de energía eléctrica, y que no tiene en cuenta la generación de energía por renovables, en las cuales se considera un factor de emisión de 0 g CO₂/kWh.

La evolución del mix de producción bruta de la energía eléctrica de la red española desde el año 2008 ha sido:

Tabla 5-6: Mix eléctrico red peninsular (g CO₂/kWh) (Datos: OCCC 2015)

2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
313	297	206	267	300	248	267

En el caso del ejemplo, la reducción en emisiones de GEI entre ambos escenarios (considerando el factor de emisión del 2014) es del 30% (obviamente igual a la reducción de la energía). En valores absolutos el suministro a depósito supone 176.732 kgCO₂ anuales mientras que el suministro directo emite 123.852 kgCO₂.

Aunque es posible consultar el factor de emisión de CO₂ mensual (por ejemplo en los informes mensuales del observatorio de la electricidad en España) los documentos revisados que utilizan factores de emisión para el cálculo de GEI, no consideran la variación a corto plazo, por ejemplo diario. Ha habido poca discusión de la variabilidad de este factor a corto plazo, que considere la contribución variable de los distintos tipos de generación para diferentes cargas de demanda a lo largo del día. Sin embargo, al igual que lo hacen las tarifas eléctricas, el factor de emisión puede variar durante periodos más cortos. Y de igual manera que afecta al diseño de las estaciones de bombeo, el coste horario de la electricidad podría afectar si se considera la minimización de las emisiones como criterio de diseño (Stokes et al., 2014). Tal cual se ha dicho, pocos estudios existen que consideren la variabilidad del factor de emisión como criterio de diseño, pero siguiendo algunas de las directrices presentadas en Stokes et al. (2014), sobre la consideración del factor de emisión, es posible evaluar la reducción de las emisiones de GEI en ambos escenarios, pues del mismo modo que varía el coste eléctrico a lo largo del día (siendo una de las principales justificaciones del uso de depósitos en cabecera), también se puede cuantificar la variación de GEI, pues se puede asumir que en el caso del bombeo a depósito solo se emiten

GEI cuando la bomba está en marcha, mientras que en el caso del suministro en directo las emisiones, al igual que el funcionamiento, es continuo.

Según la Figura 5-4 (utilizada en Stokes et al., 2015), es posible la evaluación diaria de las emisiones en ambos escenarios:

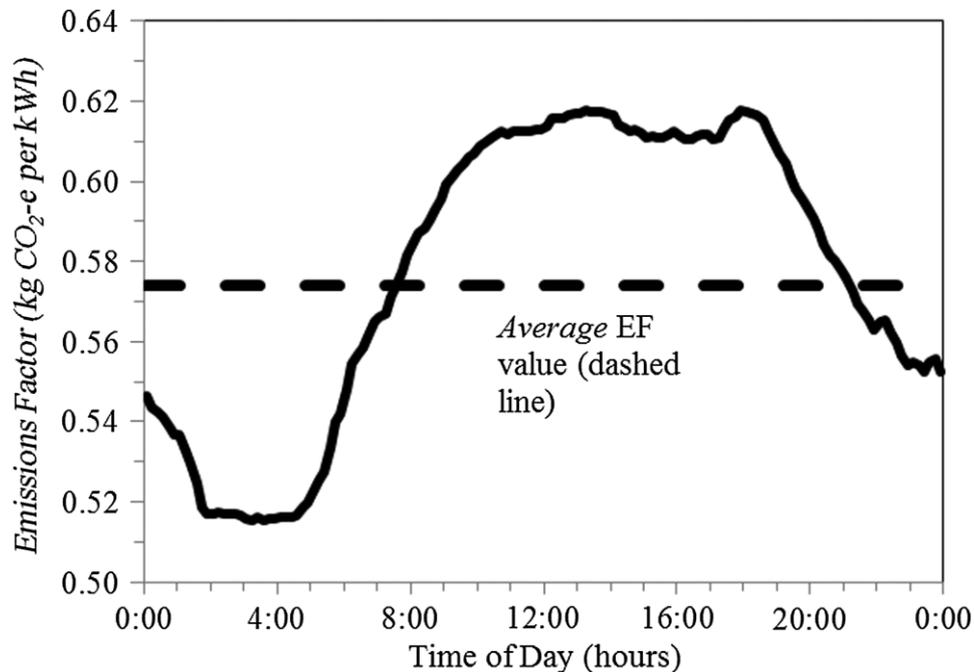


Figura 5-4: Factor de emisión (EF) estimado a 24 horas (línea continua), en comparación con el valor medio de EF (línea discontinua). (Stokes et al., 2014)

Teniendo en cuenta la variación del factor emisor mostrada en la figura anterior, el total de las emisiones de GEI descienden de 381.353 kgCO₂ para el suministro indirecto a 267.196 kgCO₂ para el suministro directo, lo que supone un descenso en las emisiones de gases de efecto invernadero del 30% igual al descenso del consumo de energía, y superior al descenso del coste energético que era del 25%. Si se compara la variación del precio de la energía con la variación del factor emisor (Figura 5-5), ambos siguen la misma tendencia, aunque intercambian prácticamente las horas llano con las horas punta, es decir de 11 a 18h las emisiones asociadas a la energía son mayores mientras que el precio es el correspondiente al periodo llano, mientras que para las horas de mayor coste (horas punta) de 18 a 22 horas, las emisiones empiezan a descender. En cualquier caso, el análisis aquí presentado debe ser considerado como una aproximación o una primera incursión en la optimización del diseño de redes con el criterio de minimizar las emisiones de GEI, considerando la variación horaria, pues el gráfico utilizado no sólo varía en función de las horas del día, sino que también lo hace para cada día, y lo que es más crítico, al igual que las tarifas horarias, para cada país.

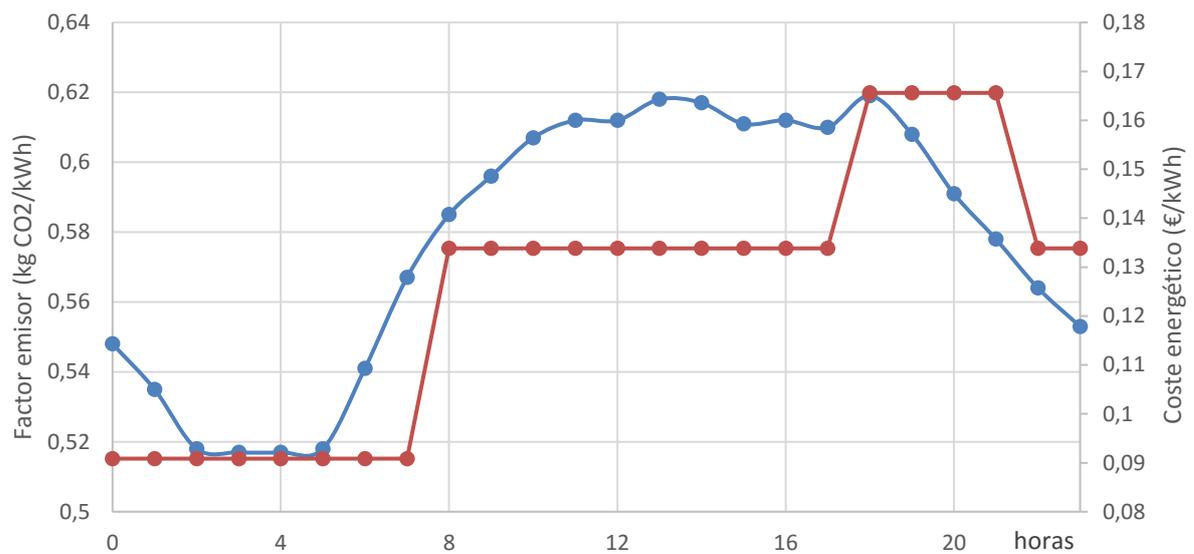


Figura 5-5: Evolución diaria del factor de emisión (EF) frente a la evolución del precio de la energía

5.3. Conclusiones

En este capítulo se han analizado las implicaciones energéticas (y por consiguiente económicas y ambientales) de disponer de un suministro directo, evitando los depósitos de regulación en cabecera. El nexo agua –energía es un tema de creciente importancia en todas las carteras políticas, una tendencia nacida en este siglo XXI que parece claro que seguirá en los próximos años. Las emisiones de GEI debe evitarse, o al menos, reducirse y los recursos naturales explotarse sabiamente en un mundo con una población que crece sin parar. Dado que en los últimos siglos estos problemas no se tenían en cuenta, la mayoría de los sistemas actuales de distribución de agua urbanos se han diseñado sin tener en cuenta estos hechos, los aspectos económicos y ambientales. Por eso, muchos de estos diseños basados en el suministro indirecto de agua, deberán ser repensados en los próximos años.

El uso de herramientas como el diagnóstico o la auditora energética, permiten evaluar ambos escenarios y la aplicación del indicador de mejora energética por suministro directo, cuantifica de una forma muy sencilla la mejora que sufriría el sistema al eliminar el depósito de regulación. Dejando a un lado las discusiones clásicas sobre tanques (que se pueden resumir en una mayor fiabilidad frente a menor calidad del agua) desde el punto de vista energético y económico, las conclusiones son claras: desde ambas ópticas, energética y económica, el suministro en directo es, con mucho, mejor.

Capítulo 6

Estrategias de mejora. Evaluación de acciones

6.1. Introducción

La tercera fase del protocolo de actuación es la evaluación de las acciones. El resultado del diagnóstico (margen de mejora) ofrece una visión general desde el punto de vista de la eficiencia, y requiere muy poca cantidad de datos. Si el resultado del diagnóstico es desfavorable, es decir, existe una importante diferencia entre el rendimiento ideal y el real, es necesario acometer un estudio en mayor profundidad. Ese análisis se fundamenta principalmente en la realización de la auditoría hídrica (conocer el destino del agua inyectada) y la auditoría energética (conocer el destino de la energía aportada), y es el punto de partida para la siguiente fase del proceso de mejora (Figura 6-1), la evaluación de las acciones para la mejorar la eficiencia. Cada una de las estrategias propuestas debe ir acompañada de una evaluación coste-beneficio. Pues sólo aquellas que resulten rentables desde el punto de vista económicas serán válidas.

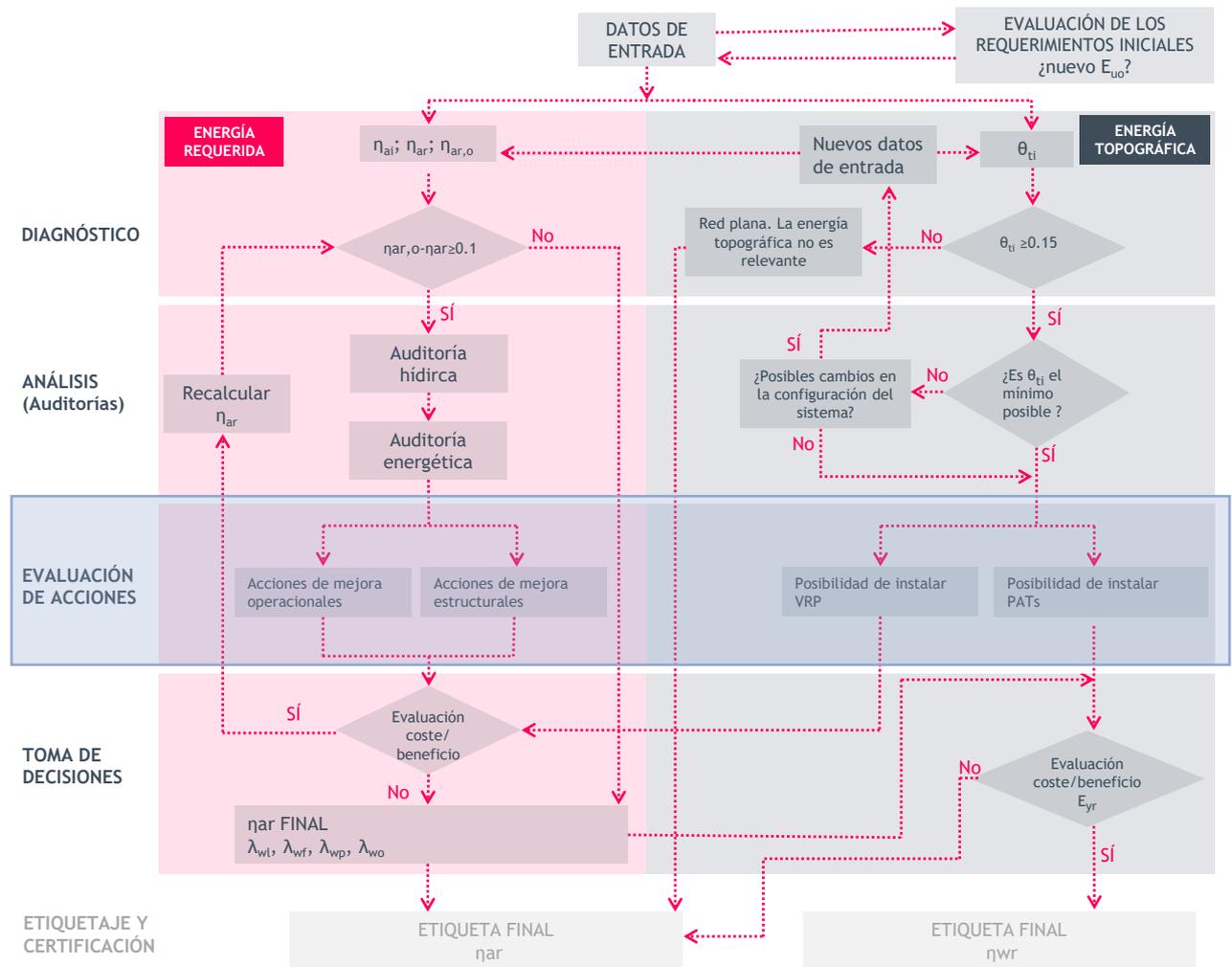


Figura 6-1: Diagrama de flujo para mejorar la eficiencia en PWTS. Evaluación de acciones.

En este capítulo se presenta un conjunto de posibles acciones de mejoras en los sistemas de abastecimiento de agua tanto urbana como de riego. De forma que cuando un abastecimiento finalice el proceso de evaluación, pueda escoger una o varias de estas medidas en función del resultado de sus auditorías. Las acciones de mejora se han organizado en dos grupos; medidas operacionales y medidas estructurales. Se definen las primeras como aquellas medidas que no requieren la sustitución ni la implementación de nuevos elementos en el sistema, sino únicamente la modificación de las condiciones de funcionamiento. Por el contrario, las medidas estructurales son aquellas que requieren de la incorporación de nuevos elementos o la sustitución de algunos de los elementos existentes. Se puede estimar a priori, que las primeras tendrán un coste de implementación menor que las segundas, pues no requieren de inversiones tan elevadas como las medidas estructurales.

Cabe destacar que algunas de las medidas que a continuación se describen tienen límites difusos entre el grupo al que pertenecen, en concreto las que hacen referencia a la reducción de la energía topográfica por modificaciones en el diseño. Pues dependiendo del tipo de acción que

se acometa para rediseñar el sistema, estas medidas pueden ser consideradas operacionales o estructurales. En resumen, se presentan a continuación ocho acciones posibles para mejorar la eficiencia de un sistema de distribución de agua a presión. Un análisis global indicará cuáles de ellas deben ser consideradas y un posterior análisis localizado de la solución valorará si procede acometerla.

Las medidas que a continuación se presentan y proponen, son una recopilación de diferentes estudios acometidos en el campo de la eficiencia energético. Algunos resultados y conclusiones han sido obtenidos a lo largo de este trabajo otros son una compilación de los estudios realizados sobre cada tema concreto por distintos autores.

Por último, y a modo de conclusión se incluye un ejemplo práctico. Sobre un caso de estudio ficticio creado exprofeso se aplican de forma consecutiva alguna de las medidas comentadas a lo largo del capítulo, con el objetivo de valorar de forma numérica los beneficios que aportan.

6.2. Medidas operacionales

Se proponen cuatro medidas dentro del grupo de medidas operacionales. Todas ellas no requieren de grandes inversiones de capital, sino de la modificación de las condiciones de funcionamiento, aunque es posible que esa modificación requiera de la inversión en nuevos elementos o elementos complementarios a los existentes. Se enumeran a continuación, para posteriormente analizar cada una de las acciones propuestas con valoraciones tanto de ahorro como de inversión, y analizando sobre qué resultado de la fase de análisis se recomienda este tipo de acción.

- OP1. Operar el sistema en su punto de funcionamiento óptimo (BEP, Best Efficient Point)
- OP2. Evitar cualquier excedente de energía
- OP3. Reducir al mínimo las fugas
- OP4. Minimizar las pérdidas por fricción

A continuación, se detalla cada una de las mejoras propuestas, con ejemplos de aplicación y cuantificación del ahorro energético y de forma muy general económico.

6.2.1. Operar el sistema en su punto de funcionamiento óptimo (BEP, Best Efficient Point)

Las bombas deben operar siempre lo más cerca posible del punto de funcionamiento de la instalación, para esto el punto de funcionamiento debe ser calculado para entregar el agua demandada por los usuarios o hidrantes, y hacerlo a la presión requerida (ni por debajo porque se incumplirían los estándares de calidad ni por encima porque se generarían sobrepresiones, y con ésta todos los problemas ya vistos en capítulos anteriores).

Operar en el punto de funcionamiento óptimo implica dos análisis complementarios, por un lado conocer y evaluar los requerimientos de presión y demanda de los usuarios (independientemente que se trate de un suministro urbano o de riego), y por otro, seleccionar el grupo de presión o estrategia de regulación que mejor se ajuste a los requerimientos del sistema. El primero de los estudios, más complejo en el caso de sistemas urbanos debido a la variabilidad en el tiempo de la demanda, debe contemplar el ajuste de las dos variables que lo definen. Es decir, suministrar a los usuarios la presión que requieren. El segundo parámetro es la demanda de agua, cuanto menor agua demanden los usuarios, menor será la energía asociada al suministro en las mismas condiciones de presión.

6.2.1.1. Reducción de la demanda

En cuanto a la reducción de la demanda de agua, en el caso urbano se puede agrupar en una serie de estrategias, la primera es la instalación de dispositivos de ahorro de agua. Éstos dispositivos pueden llegar a ahorrar el 7% para los grifos y el 23% para las duchas (Cobacho et al., 2005). La eficiencia energética asociada al agua en los hogares se puede aumentar mediante la utilización de aparatos más eficientes (por ejemplo, lavadoras o lavavajillas que utilicen menos agua total y menos agua caliente), instalaciones y accesorios (por ejemplo, cabezales de ducha, grifos o WC) y cambios en el comportamiento del consumidor (por ejemplo, puntos de ajuste de temperatura más bajos para el almacenamiento del agua en los calentadores o duchas más cortas). Los estudios indican que el uso del agua urbana se puede reducir de forma rentable hasta en un 30% con los productos comercialmente disponibles y los ahorros de energía asociados a este ahorro de agua pueden representar una gran oportunidad adicional (McMahon et al., 2000).

La segunda estrategia es la concienciación de los usuarios, obviamente el objetivo final de una empresa de suministro de agua es entregar toda el agua que éstos demanden. Cuanto menor sea la demanda de agua por parte de los usuarios menor será la energía asociada al suministro. La XII Encuesta Nacional publicada por AEAS (Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento) en 2014, cifra como media para 2012 en 112 litros por habitante y día el consumo de agua doméstica por habitante, es decir el agua utilizada por cada persona para consumo en el hogar. Esta cifra supone una reducción del 10% respecto al año 2010, y con una clara tendencia descendiente desde el año 2004 (148 l/hab día). En cualquier caso, esta misma encuesta también sitúa las ciudades españolas entre las que poseen un consumo más eficiente, así por ejemplo ciudades como Valencia, Barcelona, Bilbao o Sevilla se encuentran entre las más eficientes sólo por encima de Copenhague con un consumo de 104 l/hab día, y por debajo de ciudades como Londres, Lisboa o Estocolmo con 163, 173 y 198 l/hab-día, respectivamente.

Otra posibilidad, menos extendida en España pero de gran impacto, por ejemplo en Inglaterra, es la reutilización del agua de lluvia. A nivel mundial con el objetivo de diseñar y concebir edificios más sostenibles y resistentes al cambio climático, se están implementando tecnologías de

captación de aguas pluviales. En el Reino Unido se establece un objetivo de 80 litros por habitante (Ward et al, 2012). Sin embargo, estas tecnologías están siendo cuestionadas, pues se desconfía del impacto negativo sobre el medio ambiente que pueda suponer por un lado la emisión de GEI que supone el consumo de energía requerida para la desinfección ultravioleta (UV) y la del bombeo desde el depósito de almacenamiento subterráneo del edificio. Este segundo de mayor impacto dado que el bombeo es requisito mientras que la desinfección es opcional, demostrado que por ejemplo en un edificio de oficinas el consumo energético que supone el grupo de presión asociado al sistema de reutilización del agua de lluvia supone un 0,07% del total de energía consumida por el edificio (Ward et al, 2012), el ahorro de agua ofrecido por estos sistemas son significativos y no deben ser ignorados. En cualquier caso, y como con cualquier otra medida de las propuestas, se requiere de un análisis coste-beneficio, que además en este caso debe cuantificar la energía que requiere la propia tecnología.

En el caso de riego la situación es más compleja, pues cada tipo de cultivo requiere una cantidad de agua siendo ésta además dependiente de la climatología y otras condiciones agronómicas. Existen numerosos estudios que determinan estrategias para cuantificar el agua necesaria para cada cultivo en cada momento, pues no se trata sólo de regar sino de hacerlo de la forma más eficiente posible. Esto implica tener en cuenta en cada instante las condiciones climatológicas y el estado actual del cultivo y de la tierra. Básicamente, los métodos más utilizados para realizar la programación de riego se han desarrollado en dos vertientes, los que se basan en medir y monitorizar variables relacionadas con el estrés hídrico apoyados en sensores que permiten medir estas variables (Martin et al. 1990), y métodos basados en realizar balances de humedad en el suelo, que estiman las entradas y salidas de agua en el suelo. Y sobre estos dos métodos se han introducido diferentes variantes como por ejemplo corregir el balance de humedad con mediciones en tiempo real del estado hídrico suelo – planta – atmósfera (Casadesuset al., 2012). De forma complementaria, se continúan desarrollando nuevos estudios con el objetivo de optimizar el riego, tratando de aportar al cultivo sólo el agua que necesita, en función de sus características particulares: de su ciclo vegetativo, del tiempo, del espacio, de la cobertura de la planta y de los datos de suelo. Éste dependiendo de sus características físicas y químicas retendrá más o menos agua, por tanto la práctica del riego se basa en considerar el suelo como un depósito para almacenar agua que consumen las plantas y cuyas capacidades de almacenamiento se deben estudiar (Cea y Alonso, 2015).

Pero todos estos métodos que tienen en cuenta las necesidades agronómicas del cultivo y que se desarrollan hacia la sostenibilidad hídrica, no consideran el otro recurso implicado, la energía necesaria para realizar el riego. Por ejemplo, regar a la demanda supone que los grupos de presión funcionan precisamente cuando el cultivo lo demanda. Esta forma de funcionar no necesariamente tiene que suponer un gasto mayor de energía, dado que la cantidad de agua entregada se optimiza. La mejor opción para reducir la energía es no necesitarla, y por tanto si se reducen los consumos de agua se reduce la energía asociada a ella. Pero este tipo de

suministro seguramente no es la forma más económica de regar, pues siendo la energía la misma no se consume cuando ésta es más barata.

Están surgiendo nuevos estudios que abordan precisamente el consumo de energía y la optimización del riego programado, propiciados seguramente por el aumento abusivo del término de potencia y el precio de la energía. Por ejemplo, en Garcia et al (2015) se desarrolla un paquete informático que permite mediante algoritmos evolutivos reorganizar las peticiones de riego a una presión determinada teniendo en cuenta los diferentes precios de la energía y la potencia contratada, de manera que la programación de riego resultante logre minimizar el coste energético derivado del consumo eléctrico de las estaciones de bombeo. Estos autores comparan los resultados obtenidos mediante su algoritmo genético (Ant Colony Optimization) con programas de riego realizados con el mismo objetivo, concentrar los riegos en los periodos tarifarios más económicos, pero realizados por el método tradicional, es decir, donde el técnico define los turnos de forma manual auxiliado por cálculos sencillos. Por tanto, la gestión de la demanda de riego es una estrategia eficaz para reducir los costes energéticos, pero para ser optimizada requiere de herramientas complementarias dada la multiplicidad de variables y las restricciones que intervienen en la definición del problema. Por ejemplo, en el estudio presentado por estos mismos autores se han demostrado ahorros entre un 10 y un 35%.

Independientemente del grado de tecnificación en el cálculo, de la cantidad de variables consideradas o del método utilizado, lo que queda claro es que la programación del riego implica un claro ahorro económico y un mejor ajuste de las presiones y demandas (por consiguiente, disminución del gasto energético). Por tanto, es preciso contemplar esta cuestión en los nuevos diseños de redes de riego y revisar los existentes desde esta perspectiva.

Todas estas medidas, la reducción de la presión de servicio, y la reducción del consumo (tanto urbano como de riego), suponen un cambio en las condiciones iniciales. Es decir, el proceso de diagnóstico y de auditoría parte de la necesidad de entregar a los usuarios la energía mínima requerida por los usuarios, E_{uo} . Esta energía, E_{uo} , es directamente función de la presión mínima de servicio y la demanda de agua de cada usuario, por lo que cualquier modificación en alguno de estos dos parámetros modifica el requerimiento de energía y por tanto el numerador común del rendimiento ideal y rendimiento real.

Por tanto, y previo al proceso de mejora de eficiencia, el primer punto es la posibilidad de cambiar las condiciones de contorno, es decir de reducir la energía mínima a entregar. En el momento que esa energía realmente sea la mínima (presión de servicio mínima y demanda de los usuarios mínima) se puede iniciar el proceso. Por eso, medidas como la reutilización del agua de lluvia deben ser contempladas y evaluadas, previas al inicio del proceso propuesto o como parte de una medida operacional, pues condicionan los datos de partida y reinician el proceso con un nuevo valor de E_{uo} (Figura 6-2).

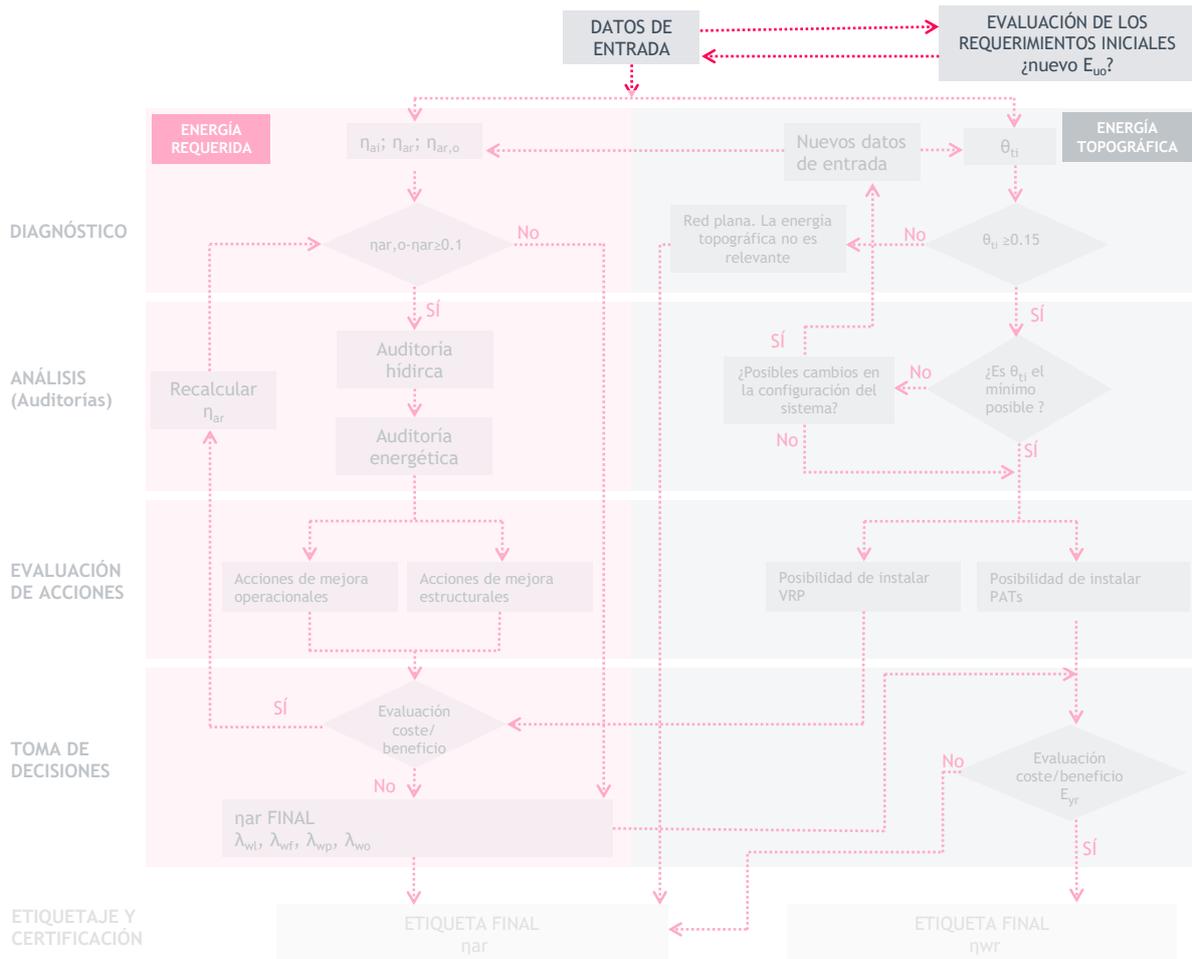


Figura 6-2: Diagrama de flujo para mejorar la eficiencia en PWTs. Cambios en las condiciones de contorno

6.2.1.2. Ajustar el sistema al BEP

Una vez determinados los requerimientos de caudal y presión del sistema, resta ajustar los grupos de presión al punto funcionamiento más favorable, así por ejemplo en el caso de riego, y tal como se ha comentado, el riego programado facilita el ajuste del sistema a este punto óptimo.

Se presenta a continuación un caso de estudio real y cuyas mejoras ya han sido implementadas por lo que es posible cuantificar en términos energéticos y económicos el ahorro supuesto por la implementación de las mejoras. Se trata de una red de riego en la que se han reajustado los turnos de riego, entre otras medidas acometidas, con el objetivo de propiciar que las bombas trabajen en su punto de funcionamiento óptimo. Se parte de la situación inicial cuyas características principales son las siguientes: se trata de una red con superficie total a regar de 8.500 ha, en los que se riega aproximadamente 126 días al año con un volumen total inyectado anual de 2.405.822 m³ (se trata de una red con muy pocas pérdidas de agua, pues el agua demandada por los hidrantes es de 2.331.821 m³). La presión requerida para el correcto

funcionamiento de los hidrantes es de 20 metros. La diferencia de elevación entre el hidrante más alto (35,5 m) y el más bajo (14,4 m) es de 21,1 metros. La cota de aspiración de la bomba se encuentra a 25 metros.

El riego en la situación de partida está estructurado en cuatro turnos de 2 horas aproximadas de duración cada uno, por tanto únicamente se riega en torno a ocho horas al día. Éstas tratan de ser las correspondientes a los periodos más económicos de la energía, en discriminación horaria de seis periodos, las coincidentes con el P5 y P6.

Uno de los principales inconvenientes de esta estratificación tarifaria es que estos periodos son variables a lo largo del año, lo cual no es un inconveniente en sí mismo, pues parece obvio que en agosto por ejemplo todas las horas del día sean consideradas P6, pues se espera que la intensidad de riego sea mayor y por tanto se disminuye el coste de la energía mientras que en diciembre, por ejemplo, el P6 se limita a las primeras ocho horas del día considerándose para las horas intermedias de la mañana (10 – 13 horas) el periodo más caro P1. El problema no reside en esta variación temporal de los periodos sino en la imposibilidad de modificar la potencia contratada con la compañía a lo largo del año.

La variación horaria a lo largo del año de cada uno de los periodos se muestra en la Figura 6-3.

Tarifa							6.X							
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun D<=14	Jun D>=15	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Fin de Semana Festivo
H1 (00-01h)	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
H2 (01-02h)	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
H3 (02-03h)	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
H4 (03-04h)	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
H5 (04-05h)	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
H6 (05-06h)	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
H7 (06-07h)	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
H8 (07-08h)	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
H9 (08-09h)	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P4	P2	P6
H10 (09-10h)	P2	P2	P4	P5	P5	P3	P2	P2	P6	P3	P5	P4	P2	P6
H11 (10-11h)	P1	P1	P4	P5	P5	P3	P2	P2	P6	P3	P5	P4	P1	P6
H12 (11-12h)	P1	P1	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P1	P6
H13 (12-13h)	P1	P1	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P1	P6
H14 (13-14h)	P2	P2	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P2	P6
H15 (14-15h)	P2	P2	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P2	P6
H16 (15-16h)	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P4	P2	P6
H17 (16-17h)	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P3	P2	P6
H18 (17-18h)	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P3	P2	P6
H19 (18-19h)	P1	P1	P3	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P3	P1	P6
H20 (19-20h)	P1	P1	P3	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P3	P1	P6
H21 (20-21h)	P1	P1	P3	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P3	P1	P6
H22 (21-22h)	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P3	P2	P6
H23 (22-23h)	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P4	P2	P6
H24 (23-00h)	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P4	P2	P6

Figura 6-3: Variación horaria a lo largo del año de los periodos de la tarifa 6X.

Se presenta a continuación el punto de funcionamiento de cada turno definido en el estado inicial del sistema. Se observa, una gran variedad en la energía y en la potencia necesaria. Los valores para un día normal del mes de mayo se resumen en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Punto de funcionamiento para cada turno. Estado inicial

	Caudal medio demandado (l/s)	Presión media requerida (mca)	Potencia media útil (kW)	Potencia media total (considerando el rendimiento del grupo), (kW)
Turno 1	660,49	70	453,55	575,47
Turno 2	722,88	67	475,13	588,25
Turno 3	692,94	69	469,04	581,47
Turno 4	504,30	75	371,04	503,09

Por tanto las potencias medias estimadas para cada uno de los turnos varían entre 503 kW y 590 kW. El coste de los periodos tarifarios se muestra en la Tabla 6-2:

Tabla 6-2: Coste del Término de Potencia y Término de energía para la tarifa 6.1A (año 2015, estado inicial).

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
T _p . Término de Potencia (€/KW)	39,139427	19,586654	14,334178	14,334178	14,334178	6,540177
T _e . Término de Energía (€/KWh)	0,026674	0,026674	0,026674	0,026674	0,026674	0,026674

En el estado inicial el sistema tenía contratada la misma potencia en todos los periodos horarios, siendo ésta de 610 kW, lo que teniendo en cuenta el coste del término de potencia suponía un coste mensual fijo e independiente de la energía consumida de 2405,45 € (en torno al 36% del total de la factura, dependiente del mes). Para la mayoría de meses del año la energía consumida en los periodos 1, 2, 3 y 4 es nula, dado que el riego se estructura en turnos de dos horas y en un total de cuatro turnos, basta con ocho horas diarias de funcionamiento, lo que en el peor de los casos supone abarcar dos periodos diferentes (obviamente P5 y P6, por ser los más económicos). Incluso con la elevada potencia contratada (610 kW) existe la posibilidad de su sobrepasamientos, por ejemplo a la vista de los valores de una de las facturas eléctricas de las que se dispone, existen picos de potencia de 695 kW y 701 kW, para el P5 y el P6, respectivamente. La energía consumida en ese mismo mes para ambos periodos son 3.864 kWh y 48.942 kWh, respectivamente, por lo que el coste de la energía asciende a 3.532,77 € (53,49% del total de la factura). El resto de porcentajes recaen en el término reactivo y en los costes por sobrepasamientos.

Por tanto una de las medidas previstas con el objetivo de reducir el coste de la factura eléctrica es estudiar la posibilidad de reducir ambos términos de la factura eléctrica, por una lado

contemplar la posibilidad de reducir la potencia contratada, parece lógico que la potencia contratada para los 4 períodos más caros y en los que el consumo de energía es nulo en todos los meses, es excesiva a todos los efectos. Por otro lado, reducir el término de energía que existe y no se puede evitar para los periodos P5 y P6. Siendo el coste de la energía el mismo para estos dos periodos no lo es el coste de la potencia, por lo que se debe estudiar la posibilidad de saturar el P6 o pagar el coste de sobrepasamientos en P5 reduciendo para este periodo también la potencia contratada.

Independientemente de toda esta estructura y combinaciones tarifarias de potencias y energías, queda claro que el principal objetivo pasa por reducir la energía requerida, independientemente del momento del día en que se requiera. Para ello la medida estudiada en este primer punto es el ajuste de los grupos a su punto de funcionamiento óptimo. En este caso todos los turnos se pueden dar en uno o dos periodos (dependiendo del mes), por lo que uno de los objetivos debe ser que durante todo el periodo de operación el punto en el que opera la bomba sea lo más uniforme posible.

Por la propia configuración del sistema, errónea en su diseño, es posible reajustar los grupos de presión para evitar excesos de presión por medio de la sectorización, medida que será abordada más adelante. Pero de forma general, teniendo en cuenta la cota del hidrante más alto es de 35,5 metros, la presión que requiere es 20 metros y que el embalse desde donde aspira la bomba se encuentra a 25 metros, una altura aportada de la bomba de 70 metros (funcionamiento inicial de las bombas) supone en el nudo más alto una presión de 58 metros (muy por encima de la requerida). Por tanto la primera medida es reducir la altura que aportan las bombas, lo que equivale a ajustarlas a su punto de funcionamiento óptimo.

En la siguiente figura (Figura 3-12) se muestran estos tres sectores: Sector Alto, Sector Medio y Sector Bajo. Se trata de uno de los ejemplos vistos en el Capítulo 3.

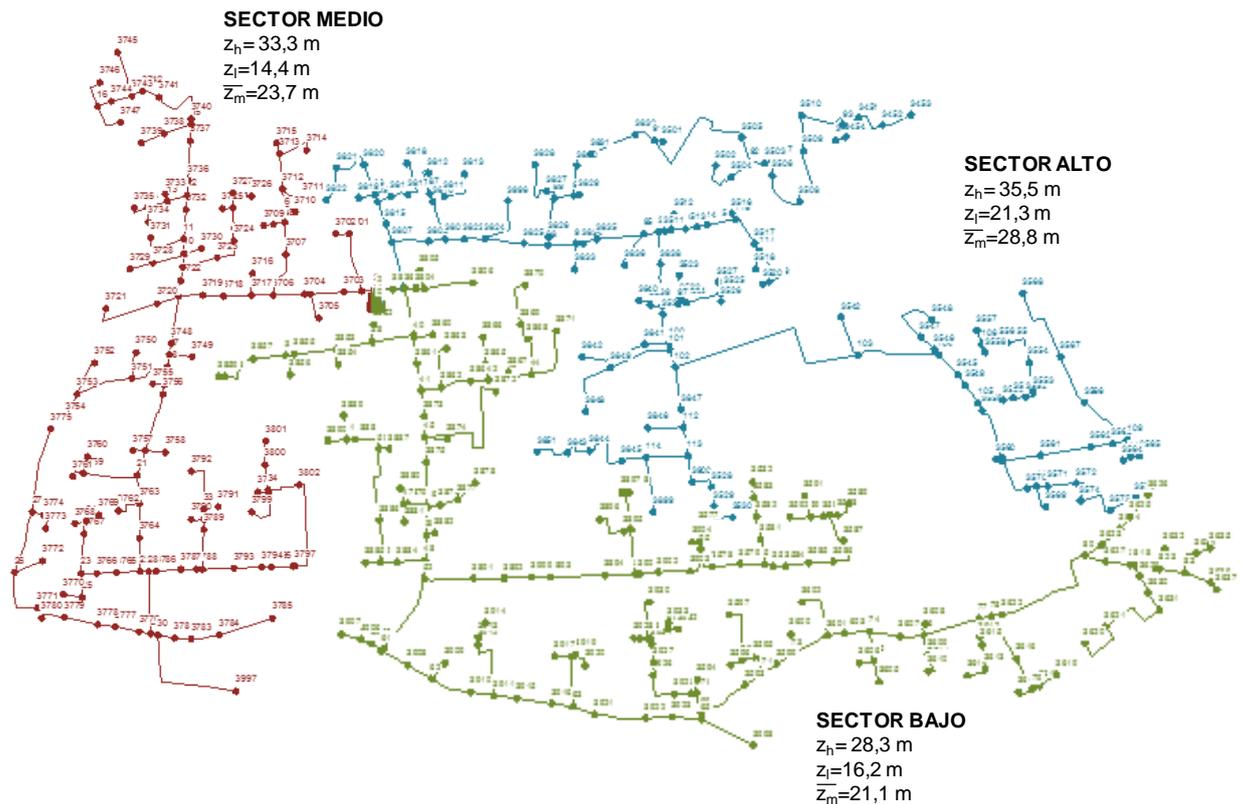


Figura 6-4: Sectores de la red de riego Estado final.

Sin entrar en detalles por tratarse de un caso muy concreto, las medidas adoptadas en el grupo de presión formado inicialmente por 5 bombas consisten en ajustar su punto de funcionamiento, por un lado parando una de ellas (pues no se requiere al reducir las presiones entregadas y sectorizar la red) y por otro, ajustando el funcionamiento de las otras cuatro. Todo ello una vez se ha sectorizado la red para cada uno de los turnos de riego que también han sido reordenados con el objetivo de que las demandas sean lo más equilibradas posible. De hecho el caudal medio para los cuatro turnos es prácticamente el mismo, por lo que en la tabla que a continuación se muestra se ofrecen valores medios de los sectores teniendo en cuenta que el funcionamiento para cada turno es prácticamente el mismo. Los valores que a continuación se muestran son los valores medios durante las 8 horas de funcionamiento (4 turnos de 2 horas).

Tabla 6-3: Puntos de funcionamiento para cada turno. Estado final

	Caudal medio demandado	Presión media requerida	Potencia media útil	Potencia media total (considerando el rendimiento del grupo)
Sector Alto	184,14 l/s	39,6 mca	71,5 kW	89,5 kW
Sector Medio	192,20 l/s	40,5 mca	76,4 kW	97,95 kW
Sector Bajo	299,2 l/s	29,7 mca	87,2 kW	106,5 kW

A la vista de la tabla anterior se observa una reducción de potencia media considerable, reduciéndose la energía diaria consumida aproximadamente a la mitad. En cuanto a la contratación eléctrica, tal como se ha comentado anteriormente, no parece tener mucho sentido contratar una potencia elevada para los periodos en los que ni tan siquiera se espera poner en marcha las bombas. Obviamente, el hecho de reducir la potencia contratada en algunos periodos implica el riesgo de tener sobrepasamientos con el sobrecoste que suponen, pues la necesidad de poner en marcha las bombas o de requerir más agua de la esperada es una posibilidad que siempre puede existir, por este motivo se debe contemplar como una variable más a la hora de estudiar la mejor estrategia de contratación. En este caso y con los nuevos requerimientos de potencia y de energía, la potencia contratada para los cinco primeros periodos se ha reducido de 555 a 10 kW, dejando únicamente el P6 a 617 kW. Lo que supuso una reducción del coste del término de potencia a 429,11 €/mes, inferior al 11% de la factura eléctrica. En cuanto al término energético, para el mismo mes del año pero una vez aplicadas las medidas, 2.768 kWh y 53.533 kWh para el P5 y P6, lo que supone un coste total del término variable de 2.984,08 €/mes (193,14+2.790,94, respectivamente). A estos dos términos hay que sumar además los impuestos y tasas correspondientes, y el sobrepasamiento en el periodo P5, pues habiéndose reducido la potencia contratada en este periodo a 10 kW, la potencia máxima alcanzada en algún momento dentro de ese periodo es de 244 kW. Por tanto el coste del sobrepasamiento, en este mes concreto supuso 386,10 € un valor importante pero inferior al hecho de pagar para ese mismo periodo una potencia contratada de 617 kW ($617 \text{ kW} \times 31 \text{ días} \times 0,039272 \text{ €/kW} = 751,15\text{€}$). Es decir el hecho de asumir el sobrepasamiento supone un ahorro frente a contratar una potencia mayor, por si acaso, de 738,98 €/mes (más del 15% de la factura actual).

La extensión de estos ahorros mensuales, mostrado a modo de ejemplo sobre el mes de mayo, supone un ahorro anual en términos energéticos y económicos más que considerable. Se compara a continuación los valores obtenidos sobre este sistema en el año 2012 (previo a las medidas acometidas), y los valores correspondientes al sistema en 2015, con el sistema perfectamente desacoplado con los grupos de presión trabajando sin originar sobrepresiones; y modificado la contratación eléctrica.

Tabla 6-4: Comparación de resultados entre el estado inicial y después de las mejoras.

	ha	kWh	kWh/ha	€	€/ha	m ³	Tp /factura	Te /factura
2012	8.385	840.672	100,26	122.876	14,65	2.653.212	24,30%	75,70%
2015	8.614	513.005	59,55	48.590	5,64	2.578.433	10,28%	89,72%
% ahorro		39%	41%	60%	61,5%	3%	58%	-18%

A la vista de la tabla anterior, se observa que el ahorro en el coste energético por m³ inyectado en el sistema es del 59% con un ahorro en valores absolutos de más de 75.000 € anuales que representa un 60% de la factura inicial. Por otro lado, la inversión necesaria para acometer las mejoras, en esta caso, adaptar las bombas que quedaban en funcionamiento y acometer el desacoplamiento de la red en los tres sectores, supuso un coste total que asciende a 355.000 €. Por tanto un tiempo de recuperación de la inversión de algo más de 4 años y medio.

Los valores de rendimientos reales y de energía topográfica se detallaron en el Capítulo 3 (Caso práctico 2. Consideraciones a la energía topográfica), el objeto del ejemplo sin considerar cuestiones económicas ni tanto grado de detalle, era cuantificar en términos de rendimientos la mejora que supondría la sectorización del sistema. Así, el rendimiento real en el caso inicial era de 0,23 aumentado a 0,33 en el caso de la red desacoplada. Del mismo modo, el término topográfico del sistema descendió de 0,28 a 0,22, un descenso en el indicador de la energía topográfica que se ha traducido directamente en una reducción de más del 39% de la energía consumida, y más del 60% de ahorro económico (si bien éste último se debe a la combinación de diferentes factores, como es el estudio de la factura eléctrica).

6.2.2. Evitar cualquier excedente de energía

Entregar sólo la presión requerida. Entregar en cada momento la presión que requiere el sistema implica principalmente ajustar el funcionamiento de las bombas. Esta solución se puede englobar en el grupo de medidas estructurales en el caso que se requiera la instalación de variadores de frecuencias para poder ajustar en cada momento la altura que se entrega. Con estas medidas se pueden esperar ahorros entre 10 – 15%. Algunas compañías comerciales, estiman que la combinación de estas dos primeras medidas pueden suponer un ahorro de hasta un 60% (Grundfos, 2014). Como se verá en los siguientes puntos, la estimación de ahorro que se propone con la combinación de las dos primeras medidas es más conservadora, entre el 30 y el 45%.

Existe una condición inevitable que al fin y al cabo es la causante principal del exceso de energía, la demanda variable de los usuarios. Principalmente en los usos urbanos, los habitantes que son los usuarios finales del servicio requieren agua a diferentes horas del día y en diferente

cantidad. Esta variabilidad en la demanda es la causa principal del exceso de energía, pues las redes deben ser dimensionadas atendiendo a la situación de demanda más desfavorable, es decir cuando el consumo es máximo y la presión disponible mínima. Aun cuando la demanda fuera constante, la necesidad de llegar al usuario más elevado o más alejado con la presión de servicio mínima, generaría sobrepresiones en los usuarios que se encuentran en cotas más bajas, o más cercanas al punto de suministro. En el caso que la energía esté disponible de forma natural, se convierte en un problema puramente estructural, pues las tuberías deben ser más resistentes, las fugas serán mayores, y el estrés que sufren las tuberías también aumentará. Por el contrario si la energía debe ser aportada, el problema se convierte en una cuestión energética y económica. Pero en cualquier caso estas sobrepresiones derivadas de la presión mínima de servicio deben ser asumidas por el sistema, y por eso se incluyen en el cálculo del rendimiento ideal en forma de energía topográfica. El sistema es el que es, con los usuarios a la cota que se encuentren, y por tanto idealmente podrá lograr una eficiencia tal que asegure la calidad del servicio, lo que implica servir a todos los usuarios a la presión mínima requerida.

Por tanto, teniendo en cuenta la variabilidad de la demanda, y las máximas alturas requeridas, el grupo de presión debe ser elegido para suministrar el máximo caudal y a la máxima altura requerida, consecuencia de la altura del nudo más desfavorable, más la presión de servicio, más las pérdidas de carga existentes desde el grupo hasta éste. El problema reside, en lo que ocurre cuando las demandas ya no son tan altas, y por tanto el exceso de presión que se genera cuando las demandas descienden, lo que aumenta las presiones disponibles en la red. Frente a esto, se pueden plantear diferentes opciones, pero todas ellas relacionadas con regulación del funcionamiento de los grupos de presión, la puesta en marcha y parada de bombas, o la incorporación de bombas de velocidad variable.

El rendimiento real de una bomba es la combinación de muchos rendimientos, el rendimiento del variador de frecuencia, el del motor y el de la bomba (Giner et al. 2015). Para determinar el rendimiento de una bomba girando a velocidad distinta de la nominal se recurre a las leyes de semejanza, según éstas los puntos de isorrendimiento se sitúan sobre una parábola que pasa por el origen del diagrama H-Q e intersecta con el rendimiento a velocidad nominal. Pero en la realidad estas parábolas sufren una deformación, de forma que según disminuye el valor de la velocidad también se reduce el valor del rendimiento con respecto al supuesto por las leyes de semejanza. Existen algunas expresiones que corrigen la teoría de la semejanza para tener en cuenta la deformación de las parábolas de igual rendimiento (Ioan Sârbu, 1998). A falta de ensayos, lo normal es recurrir a las leyes de semejanza, pero los ensayos en campo son clave, no sólo para poder verificar el valor del rendimiento corregido con respecto al teórico, sino porque los grupos de presión no siempre son como los descritos por el fabricante, pues existe unas horas de funcionamiento previas, desgaste, errores en la descripción técnica, etc. Tal como se concluye en Giner et al. (2015), disponer de una base de datos fiable con históricos de funcionamiento de las bombas, se traduce en un estudio del coste más acertado y en una

evaluación del ahorro más real. Además la implementación de una metodología de ensayos y evaluación gráfica de resultados permite identificar medidas básicas de muy baja o nula inversión que pueden suponer un gran potencial de ahorro energético. Así, por ejemplo los autores de este estudio cuantifican en el caso práctico de su estudio, en un ahorro de más del 4.800% con respecto a la inversión inicial (es decir, 48 € de ahorro por cada euro de inversión) con la implementación de simples medidas. En este caso la instalación de un by-pass en los variadores de frecuencia mediante un contacto controlado por el propio variador (de esta forma se elimina las pérdidas energéticas introducidas por el variador cuanto éste no se requiere) y la elección de una adecuada la velocidad de giro (aquella velocidad que optimice el compromiso entre las pérdidas del variador y los beneficios que suponen). De forma complementaria, también fue determinante en este estudio el análisis del precio de la energía, es decir, elegir el periodo tarifario más adecuado (horas llano) unido a la reducción de la potencia contratada. La combinación de estas cuatro simples medidas, supusieron un ahorro importante, y lo que es más destacable con un periodo de retorno de 0,02 años.

Todas estas medidas, por tanto, consisten en seleccionar la estrategia de regulación más adecuada. El estudio de la estrategia de regulación contempla una gran cantidad de variables, los modelos de las bombas a instalar con sus curvas características, la distribución de bombas de velocidad fija y de velocidad variable, el rendimiento de cada una de ellas, la elección de velocidad de giro mínima y máxima, las tarifas eléctricas, las potencias a contratar, las horas de funcionamiento, el caudal y la altura, etc. Por este motivo, muchas investigaciones se centran en diseñar una herramienta que permita encontrar de forma ágil las mejores alternativas de regulación, como la desarrollada en Gómez et al. (2015). Más allá de las herramientas, lo destacable son los resultados obtenidos en la bibliografía consultada y los parámetros y variables que se tienen en cuenta, como los caudales de consigna, los rendimientos de los motores eléctricos y las tarifas eléctricas. Al final, el estudio de diferentes escenarios de regulación con distintos valores de velocidad mínima y máxima del variador y distintas combinaciones de bombas tanto fijas como variables, permite cuantificar el ahorro estimado frente a la inversión prevista. Por tanto, el modelo hidráulico permite obtener diferentes escenarios y debe ser utilizado como apoyo a la decisión, de cara a descartar o validar diferentes alternativas. Pero como complemento al modelo hidráulico se requiere un modelo energético que permita cuantificar no sólo en términos energéticos sino también económicos cada medida o solución propuesta.

6.2.3. Reducir al mínimo las fugas

Se trata de una medida operacional si las pérdidas se reducen por medio de un control activo de fugas o por medio del control de la presión. Esta misma medida se englobaría dentro de las medidas estructurales en el caso que se renovaran tuberías. Según un estudio patrocinado por la Comisión Europea, la reducción de fugas pueden suponer ahorros de hasta el 33% (EEA, 2014).

Sin datos oficiales para los sistemas de riego, el orden de magnitud debe de ser similar pues aunque las redes son más jóvenes, éstas se encuentran peor gestionadas. En resumen, más del 10%.

Independientemente que la reducción de las fugas sea consecuencia de medidas operacionales (gestión de la presión, control activo de fugas) o estructurales (renovación de tuberías) supone un ahorro energético por muchas vías, por un lado se reduce el agua que se inyecta a la red y por otro se reduce la energía perdida por fricción. Así pues, si h_{f1} y h_{f2} son las pérdidas por fricción antes y después de la fuga y Q_l es el caudal fugado, entonces, el balance entre lo suministrado y lo entregado al usuario sería:

$$Q_s = Q_d + Q_l \quad (6-1)$$

$$H_s = h_{f1} + h_{f2} + H_d \quad (6-2)$$

Siendo Q_s , el caudal suministrado al sistema, y Q_d el caudal entregado a los usuarios (caudal demandando), de igual forma que H_s es la altura suministrada en cabecera mientras que H_d es la altura suministrada al usuario, combinación de la cota del nudo más la presión mínima de servicio ($Z_{\text{nudo}} + (p_0/\gamma)$).

La energía debida a las fugas se obtiene como suma entre la energía embebida en la fuga (es decir la energía que se lleva el agua al fugar), y calculada según la ecuación 6-3., y la energía adicional por fricción, dado que existe un exceso de caudal, existe más energía por fricción. Suponiendo la fricción proporcional al cuadrado del caudal con un factor de fricción constante, la expresión 6-4 permite estimar dicha energía:

$$E_{\text{perdida (embebida)}} = \gamma Q_l (H_s - h_{f1}) \quad (6-3)$$

$$E_{\text{perdida (fricción)}} = \gamma h_{f1} \left[Q_s - Q_d \left(\frac{Q_d}{Q_s} \right)^2 \right] \quad (6-4)$$

Resultando una energía total debida a las fugas igual a:

$$E_{\text{perdida (total)}} = \gamma \left[Q_l H_s + Q_d h_{f1} \left[1 - \left(\frac{Q_d}{Q_s} \right)^2 \right] \right] \quad (6-5)$$

Donde obviamente su valor sería cero si $Q_l=0$.

Desarrollando aún más cada uno de los términos de la expresión anterior, con el objeto de poder estimar cómo afecta la reducción en las fugas en la reducción total asociada a ellas, se tiene:

$$Q_l H_s = Q_l [H_d + j_1 L_1 (Q_d + Q_l)^2 + j_2 L_2 (Q_d)^2] \quad (6-6)$$

Siendo j_1 , las pérdidas de carga unitarias asociadas al tramo por el que circula tanto el caudal demandado (Q_l) como el caudal fugado (Q_l). Y j_2 , la pérdida de carga unitaria del tramo de la tubería sin fugas y por la que únicamente circula el caudal que demanda el usuario (Q_d). Por tanto una reducción del caudal de fugas (Q_l), también afectará a la altura en cabecera requerida, H_s .

$$\frac{Q_l H_s}{Q_l' H_s'} = \frac{Q_l [H_d + j_1 L_1 (Q_d + Q_l)^2 + j_2 L_2 (Q_d)^2]}{Q_l' [H_d + j_1 L_1 (Q_d + Q_l')^2 + j_2 L_2 (Q_d)^2]} \quad (6-7)$$

Siendo H_d , y h_{f2} ($j_2 \cdot L_2 \cdot Q_{d2}$) independientes del valor del caudal fugado, la reducción del caudal afecta a la altura requerida en cabecera ($j_1 \cdot L_1 \cdot (Q_d + Q_l)^2$), siendo función del cuadrado de su valor y dependiente del valor de j , por tanto cuanto mayor sea j , es decir más infradimensionada se encuentre la red, más repercusión tendrá la reducción del volumen fugado con respecto a la energía asociada a él.

El otro término de la expresión, está relacionado de nuevo con las pérdidas de carga unitarias en el tramo de la red que lleva asociada las fugas, y el cuadrado del valor del caudal, pero además también se relaciona con el cuadrado de la relación entre el caudal demandado y el caudal fugado, por lo que cuanto mayor sea la relación $x = Q_d / (Q_d + Q_l)$ (rendimiento volumétrico de la red, la relación entre el caudal demandado y el inyectado), mayor será la repercusión de la reducción del caudal fugado en la red.

$$Q_d h_{f1} \left[1 - \left(\frac{Q_d}{Q_s} \right)^2 \right] = Q_d [H_d + j_1 L_1 (Q_d + Q_l)^2 + j_2 L_2 (Q_d)^2] \left[1 - \left(\frac{Q_d}{Q_d + Q_l} \right)^2 \right] \quad (6-8)$$

Por tanto, este segundo término de la ecuación relaciona directamente la reducción de la energía asociada a las fugas con el valor del caudal demandado. De nuevo, expresando este término con respecto a la reducción del caudal fugado ($Q_l' < Q_l$) se tiene:

$$\frac{Q_d h_{f1} \left[1 - \left(\frac{Q_d}{Q_d + Q_l} \right)^2 \right]}{Q_d h_{f1} \left[1 - \left(\frac{Q_d}{Q_d + Q_l'} \right)^2 \right]} = \frac{H_d + j_1 L_1 (Q_d + Q_l)^2 + j_2 L_2 (Q_d)^2}{H_d + j_1 L_1 (Q_d + Q_l')^2 + j_2 L_2 (Q_d)^2} \left[\frac{1 - \left(\frac{Q_d}{Q_d + Q_l} \right)^2}{1 - \left(\frac{Q_d}{Q_d + Q_l'} \right)^2} \right] \quad (6-9)$$

Aplicando estas expresiones a un sencillo esquema, se puede obtener gráficamente la reducción de la energía asociada a la reducción del caudal fugado, que tal cual se ha visto, será función del valor de la pérdida de carga unitaria en los tramos de tuberías por los que circula tanto el caudal demandado como el caudal fugado, y del caudal demandado. Así por ejemplo, en la siguiente gráfica se muestra la variación del porcentaje de la energía total asociada a las fugas por la reducción del caudal fugado para un valor de j igual a 3 m/km:

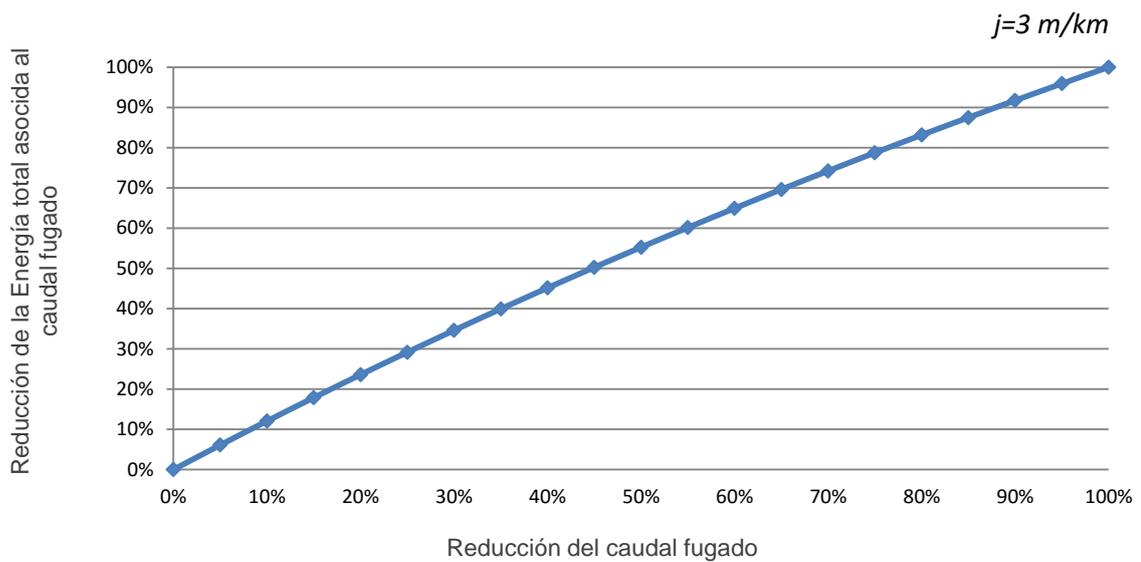


Figura 6-5: Reducción de energía total según el porcentaje de reducción de fugas.

Así por ejemplo, en el caso concreto que las pérdidas de carga unitarias sean de aproximadamente 3 m/km, una reducción del caudal fugado del 25% supondría una reducción de la energía total de 29,14%. Un valor aún mayor en el caso de redes con diámetros más ajustados, es decir con mayores *j*. Esta variación se puede observar en la gráfica siguiente (Figura 6-7):

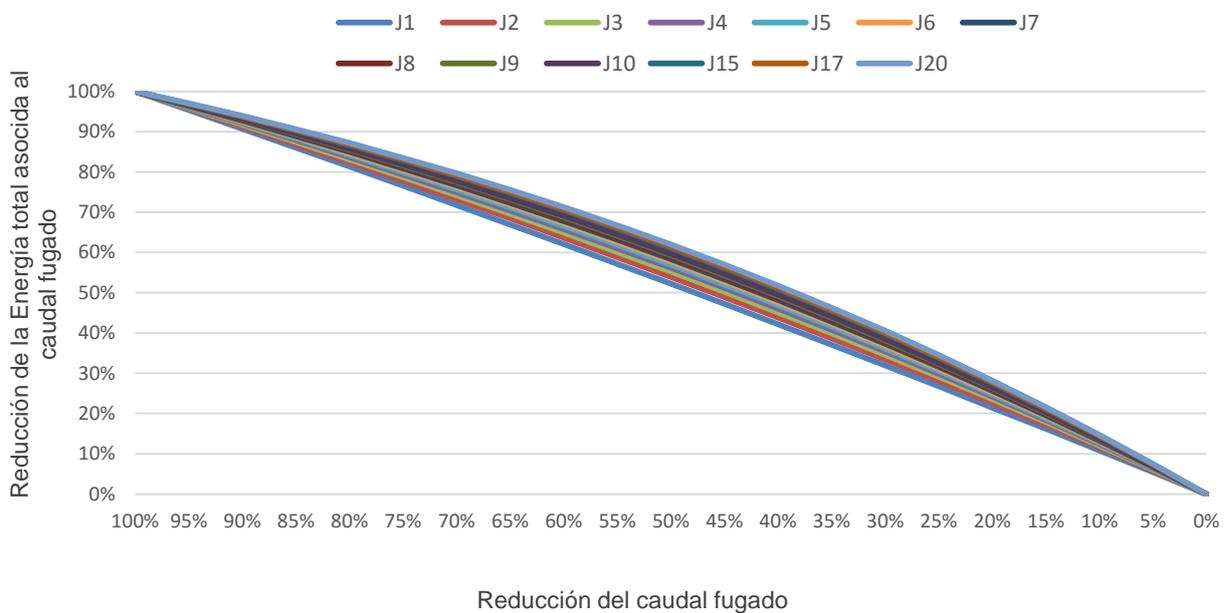


Figura 6-6: % de reducción de energía total asociada a las fugas según el % de reducción de fugas en función de *j*.

A la vista de esta gráfica (Figura 6-7), se puede observar que para redes con valores de pérdidas de carga de 6 m/km una reducción del 50% en el caudal fugado supone una reducción de la energía asociada a las fugas del 58%. Esta reducción de la energía sólo contabiliza la directamente debida a las fugas, es decir la suma de la energía embebida en la fuga y la asociada a la fricción que genera el caudal fugado, pero sería aún mayor si se considerara el cambio de potencia (menor caudal y menor altura) en el grupo de presión.

En cuanto a la relación de la reducción de la energía debida a la disminución de fugas con respecto al caudal demandado, no supone tanta variación. Se puede ver en la siguiente gráfica para valores de $x=Q_d/(Q_d+Q_f)$ desde 0,1 a 0,8.

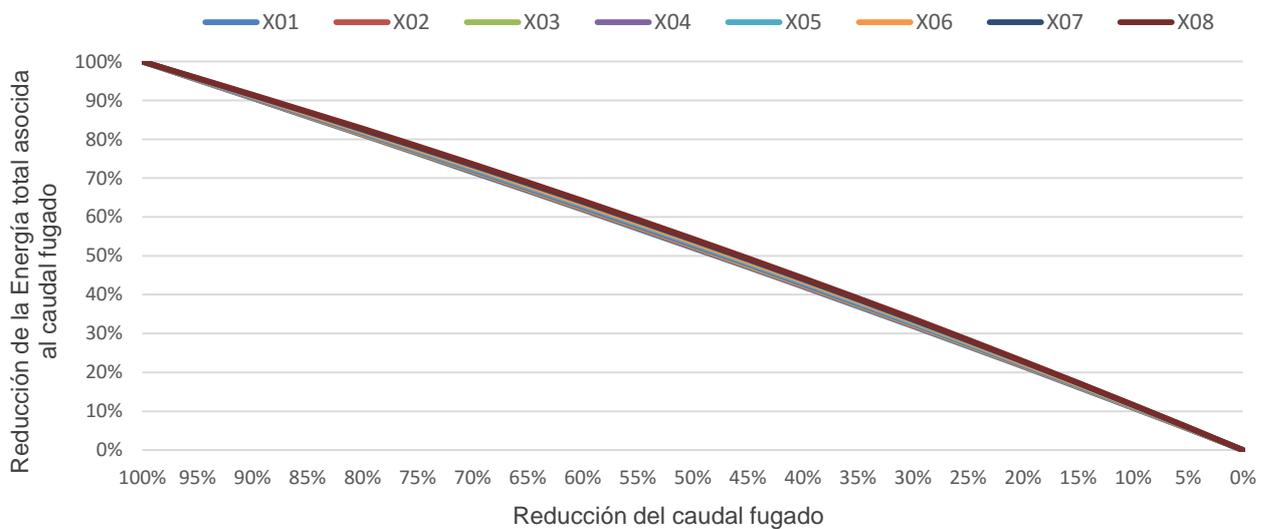


Figura 6-7: % de reducción de energía total asociada a las fugas según el % de reducción de fugas en función de x .

Así, por ejemplo para un valor de $x=0,67$ (Q_d/Q_s), es decir un rendimiento volumétrico de la red del 67%, una reducción del 50% en el caudal fugado supone una reducción de la energía asociada del 54,5%.

Por tanto, el beneficio en la reducción de la energía asociada a las fugas depende por un lado, y en mayor medida, del valor de las pérdidas de carga unitarias en la red y por otro del rendimiento volumétrico inicial del sistema, pero en cualquier caso, no se trata de una relación lineal, es decir, independiente del porcentaje en que se reduzca el caudal fugado, la reducción de la energía asociada a esa reducción será mayor. A modo de conclusión, la siguiente gráfica muestra cómo varía la reducción de la energía en función de j y de x , para una reducción del 30% en el caudal fugado:

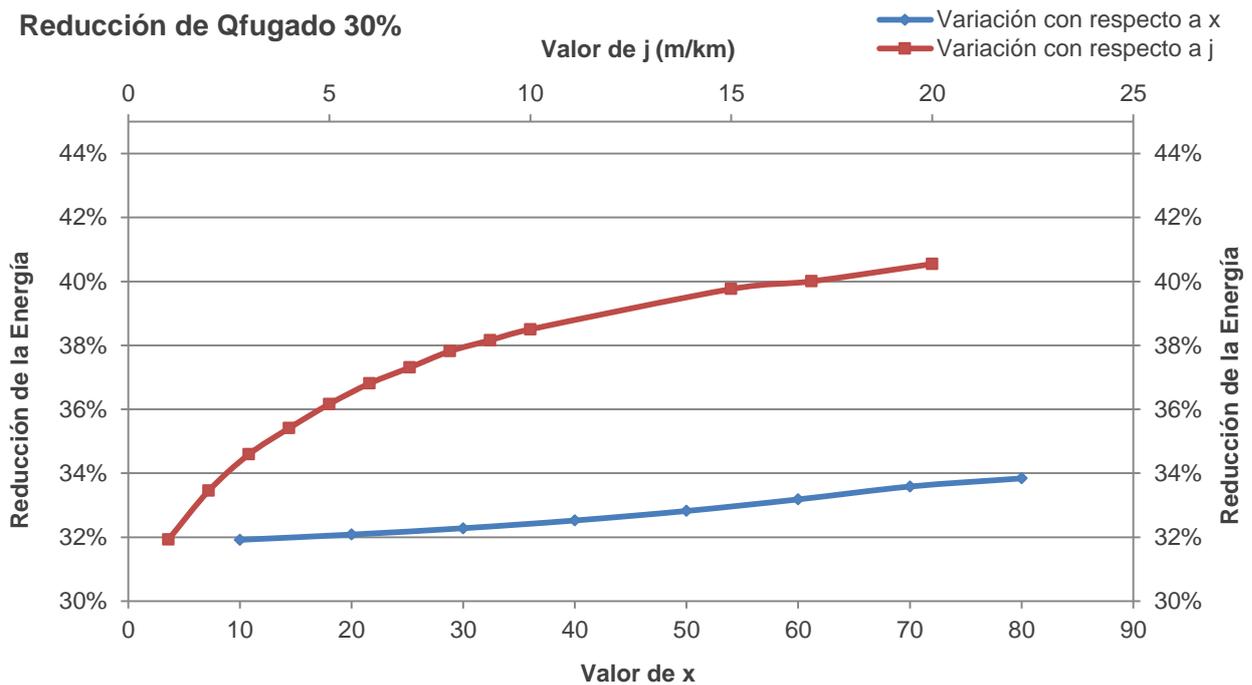


Figura 6-8: Variación de la reducción de la energía en función de x y j, para una reducción del caudal fugado del 30%

6.2.4. Minimizar las pérdidas por fricción

De nuevo, es operativa si se reducen por medio de medidas como una distribución más uniforme del flujo (por ejemplo, reasignando los turnos de riego, operando válvulas de corte o limitadoras de caudal). Esta medida es estructural en el caso de sustituir tuberías por otras de diámetro mayor o la instalación de nuevas tuberías con el objetivo de modificar el trazado buscando configuraciones más racionales que eviten elevadas pérdidas locales. Se pueden estimar ahorros de hasta el 10%.

Al igual que con las fugas, las pérdidas por fricción repercuten no sólo en el término de la energía perdida por fricción, sino que además una reducción en las pérdidas de carga implica una altura menor requerida en cabecera, y por lo tanto la posibilidad de menores potencias contratadas y por supuesto menor energía consumida por las bombas.

La energía disipada debida al rozamiento del agua con las tuberías del sistema es, tal cual se vio en el capítulo de la auditoría energética:

$$E_{rf}(t) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{j=1}^l (q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k)) \cdot \Delta h_j(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \quad (6-10)$$

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:

$$q_j = q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k) \quad (6-11)$$

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, tal como se ha descrito en el punto anterior. Pero atendiendo a las pérdidas por fricción, los términos que afectan directamente a la energía asociada a la fricción es por un lado el caudal fugado, tal como se ha visto, y por otro el término resistente de la tubería, es decir directamente proporcional a la longitud de la tubería y elevado a cinco en cuanto a su diámetro. Por tanto tres estrategias claras (tres variables condicionan su valor) que afectan en diferente medida a la energía asociada a la fricción.

La siguiente expresión simplifica la expresión de la energía por fricción para una única tubería en un determinado instante de tiempo, las conclusiones extraídas para una tubería son extensibles al sumatorio de todas las tuberías para todos los instantes de tiempo:

$$E_{rf} = \gamma \cdot (q_{uj} + q_{lj}) \cdot \Delta h_j \quad (6-12)$$

Considerando la expresión de Darcy-Weisbach para el cálculo de las pérdidas por fricción se tiene:

$$E_{rf} = \gamma \cdot (q_{uj} + q_{lj}) \cdot \frac{8fL}{\pi^2 g D_j^5} (q_{uj} + q_{lj})^2 \quad (6-13)$$

Por un lado se persigue la reducción del caudal circulante, bien reduciendo el caudal demandado, q_{uj} , o el caudal fugado, q_{lj} . Ambos términos se encuentran presentes elevados al cubo, por lo que una reducción por ejemplo 20% en el caudal circulante por esta tubería genérica, supondría una reducción de la energía asociada a la fricción de más del 50% ($\approx 0.8^3$). Para ello, se puede recurrir bien a las medidas comentadas en el primero de los puntos de este apartado respecto a la reducción de la demanda (reutilización de agua de lluvia, concienciación de los usuarios, sistemas más eficientes de riego, etc.) o bien a las medidas de reducción de fugas comentadas en el capítulo de las auditorías.

Las otras dos posibles mejoras están asociadas a la resistencia de la tubería, por un lado la reducción de la longitud de la tubería o lo que es lo mismo, dado que los usuarios están donde

están, la reducción del camino recorrido por el agua. Cualquier reducción en el camino del agua supone una reducción de igual valor en la energía asociada a la fricción. Por tanto, es aquí en el único punto donde los viejos diseños radiales (suministro lo más centrado posible) cobran sentido, pues este razonamiento es idéntico a la reducción de costes de instalación, cuanto menor sea la longitud desde cabecera a los puntos de consumo menor será el coste de la instalación de la tubería. Pero tal cual se verá, para reducir en la medida de lo posible la energía topográfica se deben plantear nuevos diseños.

La última variable implicada, el diámetro, se encuentra elevada a la quinta potencia, lo que implica que los cambios de diámetro suponen grandes cambios en el término de fricción, mucho más que la variación de los recorridos. La determinación de los diámetros de las tuberías por tanto es una cuestión clave en cualquier abastecimiento, por este motivo existen infinidad de métodos, con el objetivo de determinar el diámetro óptimo de cada tuberías para las condiciones de funcionamiento de un abastecimiento.

Atendiendo a las diferentes variables a adoptar a la hora de diseñar un sistema de distribución, se pueden definir múltiples estrategias de dimensionado hidráulico de una red (Pérez et al., 2009) para la consecución de unas condiciones de servicio adecuadas; sin embargo, también podemos diseñar estrategias de operación del sistema para dotarlo de mayor fiabilidad, para optimizar los costes energéticos, o incluso podemos diseñar sistemas de protección contra fenómenos transitorios. Independientemente del enfoque del diseño, se trata de concebir el sistema o la estrategia más adecuada para conseguir un determinado estado hidráulico en la red. La diferencia estriba en las consideraciones que se adoptan en los diferentes modelos. Una red de distribución está constituida por una gran variedad de elementos, pero sin duda las tuberías son el componente principal, desde el punto de vista funcional las tuberías son los elementos que permiten transportar el agua y el resto de elementos son medios auxiliares a esta función (regulación, control, medida, etc.), y desde el punto de vista económico, cuando se trata de redes de cierto tamaño, la suma de las partidas que dependen de las tuberías conforman la parte más importante de la inversión.

Obviamente, en el diseño de una red de distribución intervienen variables hidráulicas que caracterizan funcionalmente el sistema, pero si el objetivo económico está presente en el problema, se deben considerar los costes asociados a cada uno de los elementos y su relación con las variables hidráulicas. Lógicamente además de las relaciones que ligan entre sí las variables hidráulicas y que corresponden a leyes físicas del comportamiento del sistema, se pueden plantear diversas restricciones funcionales. Por ejemplo, restricciones de velocidad, limitar la velocidad a un valor mínimo, en torno a 0,5 m/s, reduce el tiempo de permanencia del agua en la red, problemas de deposiciones y otros de tipo sanitario mientras que limitar la velocidad a valores máximos, sobre 2,5 m/s, evitará problemas de erosión de material de la tubería y sobrepresiones que podrían sobrevenir por efecto de golpe de ariete. Restricciones de presión en los puntos de consumo y restricciones en el uso de materiales de tuberías o de

diámetros, condiciones pues de tipo constructivo, pueden aconsejar la utilización de unos materiales en detrimento de otros, o incluso seleccionar diversos material en función del diámetro de la tubería, estableciendo como práctica habitual un diámetro mínimo o un conjunto de diámetros comerciales no muy numeroso, de forma que se reduzca el tamaño de los stocks de materiales de repuesto.

Por otro lado, cabe la posibilidad de cerrar el problema de diseño mediante la aplicación de criterios económicos. En primer lugar se puede efectuar una primera clasificación de los costes que intervienen, en costes de construcción o costes fijos, aquellos ineludibles que hay que realizar para establecer la red de distribución, y costes de explotación o costes variables, que son los derivados del uso del sistema.

Tabla 6-5: Primera clasificación de los costes que intervienen en el diseño de una red (Pérez et al., 2009)

COSTES DE CONSTRUCCIÓN (costes fijos)	TUBERÍAS	
	ACCESORIOS	Acoplamiento, anclajes, juntas, valvulería
	OBRA CIVIL	Excavación, relleno, asentamiento, depósitos
	INSTALACIONES	Estaciones de bombeo, sistemas de control y regulación, protección
COSTES DE OPERACIÓN (costes variables)	ENERGÉTICOS	
	MANTENIMIENTO	
	PERSONAL	

De todos los costes que aparecen en la Tabla 6-5 hay que destacar por su representatividad en la formulación del problema del diseño, en cuanto a los costes de construcción el relacionado con las tuberías, y en cuanto a la explotación de la red, el coste energético. Por tanto el problema del dimensionado económico puede ser resumido bajo el siguiente planteamiento: minimizar los costes de construcción y los costes de explotación sujeto a las restricciones de tipo funcional. Es importante tener en cuenta la consideración a la hora de formular el problema de referir los costes a la misma base temporal, por tanto los costes de construcción se expresan en unidades monetarias, y los de explotación en unidades monetarias por año. Para reducir los costes de construcción a cantidades por año, se necesita multiplicar las mismas por el factor de amortización.

Por tanto desde la diferenciación entre el diseño de redes nuevas o ampliaciones, y la mejora y rehabilitación de redes existentes, se plantean diferentes métodos a la hora de seleccionar los diámetros óptimos en cada caso. Si se trata de diseñar nuevos sistemas de abastecimiento, dejando de lado el diseño funcional de una red, es decir aquel que considera únicamente las

variables hidráulicas (método de la velocidad o pendiente hidráulica mínima) el modelo de Programación Lineal trata de minimizar el coste total del sistema compuesto por la amortización anual de la inversión a realizar, tanto en el conjunto de tuberías de la red como en el equipo de bombeo (determinar la altura en cabecera), con la condición de que se satisfagan a la vez todos los requisitos hidráulicos.

Otro asunto diferente pero relacionado es la renovación y sustitución de tuberías, y la influencia de los costes del agua y la energía, en la renovación de éstas (Pardo, 2010). Muchos son los factores que afectan a la selección de las mejores tuberías que deben ser sustituidas, y los criterios de selección engloban cuestiones como las pérdidas de agua y la energía asociada a las tuberías. Es posible relacionar las pérdidas de agua y los costes de mantenimiento de la red, dado que si se disminuyen los recursos empleados en la rehabilitación y mantenimiento, las pérdidas al igual que las roturas aumentan, por tanto se debe llegar a un punto óptimo en el que los costes totales asociados al mantenimiento y al agua fugada sean mínimos. Por tanto, la selección del momento en que una tubería debe ser sustituida no es trivial. En Pardo (2010), se plantea el cálculo del periodo óptimo de renovación considerando más costes que la metodología clásica que aborda el problema de forma global, considerando únicamente la influencia de los costes del agua fugada (el coste del agua en sí misma y la energía asociada), los costes sociales y los de oportunidad. Éste contempla los siguientes costes:

- costes de renovación (C1)
- coste de reparación (C2)
- coste del agua fugada (C3), ,
- coste ambiental del agua (C3a) y el coste energético (C3b)
- coste social (C4)
- coste de oportunidad (C5).

A la vista de la siguiente gráfica que aplica el método del periodo de renovación a un ejemplo de un abastecimiento concreto, se puede observar cómo influye cada uno de los costes, y que la influencia del coste energético en el proceso de renovación es mínimo.

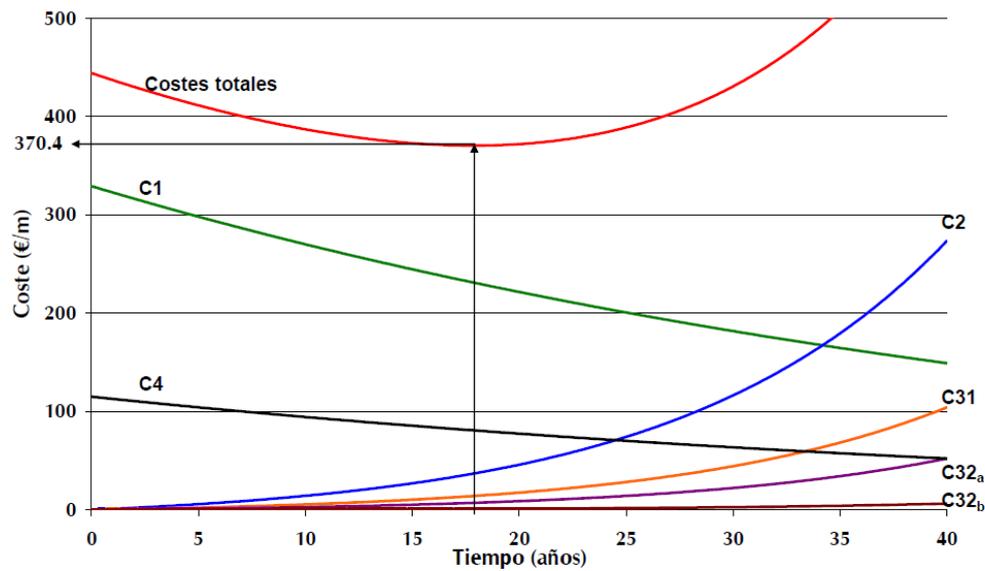


Figura 6-9: Representación de los costes totales asociados a la renovación de un tubería (Pardo, 2010).

Otra consideración diferente es la influencia del coste energético no en la renovación de la tubería por cuestiones de desgaste sino en la sustitución por cuestiones de excesiva fricción, es decir de un diseño incorrecto o de la modificación de las condiciones de funcionamiento. Este cálculo requiere del estudio concreto de cada caso, pero se hace imprescindible realizar inicialmente la auditoría energética que determinará la influencia real de la fricción en el total de las energías consumidas, dependiendo de este porcentaje será más sencillo determinar si vale la pena el cálculo de la inversión necesaria en la sustitución de diámetros.

6.3. Medidas estructurales

El segundo grupo de las medidas de mejora de la eficiencia consiste en las denominadas medidas estructurales. Son aquéllas que requieren de sustitución, implementación o construcción de elementos nuevos en el sistema. Tal cual se ha dicho anteriormente, algunas de las estrategias que se han comentado se podrían englobar en este grupo, pues requerirían de la sustitución de elementos estructurales, como por ejemplo la renovación de tuberías, pero independientemente del grupo al que pertenezcan o del nombre que se le haya asignado, la medida debe ser estudiada y validada por la inversión que supone y el ahorro que conlleva. A continuación se enumeran las cuatro estrategias estructurales propuestas, y posteriormente se explican en detalle. La última de ellas se aplica a un caso real.

- EST1. Utilizar bombas más eficientes
- EST2. Recuperar o reducir la energía topográfica:
- EST3. Mejorar viejos diseños de distribución y suministro

- EST4. Evitar las pérdidas no incluidas en los apartados anteriores

A continuación, se detalla cada una de las mejoras propuestas, con ejemplos de aplicación y cuantificación del ahorro energético y de forma muy general económico.

6.3.1. Utilizar bombas más eficientes

Las bombas más viejas deben ser remplazadas por bombas más eficientes. Se están alcanzando rendimientos hidráulicos de las bombas superiores al 95%, obviamente en bombas nuevas. El rendimiento de éstas (independientemente de su valor) va menguando por el paso de los años. Los ahorros esperados se cifran entre 20-30% (OJEU, 2012).

La estrategia es clara, las bombas más viejas y con menores rendimientos deben ser modificadas o remplazadas por bombas más eficientes. La reducción del rendimiento es evidente; por un lado por cuestiones de evolución de la tecnología (hoy en día se fabrican bombas con mayores rendimientos), y por otro por la pérdida de capacidad que sufren los elementos con el tiempo y el uso (el desgaste de los materiales, la colmatación de los filtros, etc.).

Es la gran cantidad de variables que influyen en el rendimiento real de una bomba, que se requiere tal como se ha comentado efectuar ensayos de campo que permitan conocer el estado de una bomba real. Se requiere además conocer las estrategias que permiten aumentar la eficiencia de los conjuntos de los grupos de presión.

El Banco Iberoamericano de Desarrollo (BID) publica en el 2011 la primera edición del Manual de Eficiencia energética, en concreto la Evaluación para sistemas de bombeo de agua. Un completo documento (que ya se ha comentado en capítulos anteriores) que evalúa y permite identificar y cuantificar todos los tipos de pérdidas que pueden darse en la estación de bombeo, teniendo en cuenta todos los elementos que lo forman. Se presenta a continuación un resumen de los puntos de ese documento que afectan a la eficiencia de los grupos de presión, y lo que puede resultar de más utilidad, una serie de medidas estructurales que permiten aumentar la eficiencia del grupo dependiendo del elemento dónde se produzcan las pérdidas.

Se parte del gráfico que presenta el Manual del BID en cuanto a las pérdidas energéticas con los elementos electromecánicos del sistema de agua.

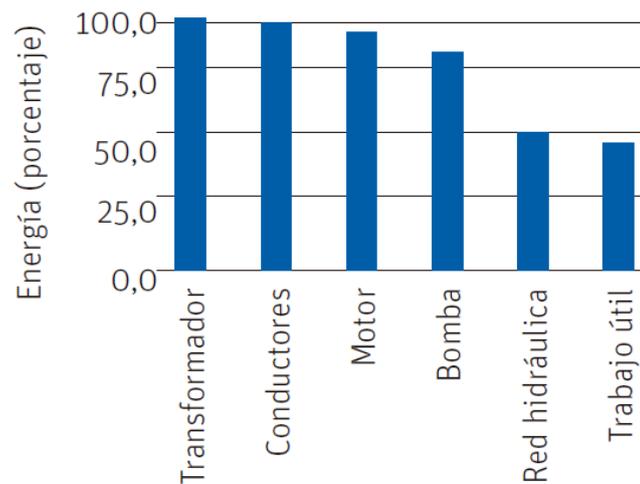


Figura 6-10: Pérdidas energéticas típicas en los componentes electromagnéticos de un sistema de agua (BID, 2011)

A la vista de la gráfica anterior, puede suponerse que la mayor pérdida de energía se da en la transformación de energía mecánica en hidráulica, es decir en la propia bomba, que en algunos casos puede alcanzar valores del 45%. En ese rango del 40-45% es donde se encuentran las oportunidades de optimización y mejora. Pero atendiendo a cada uno de los elementos que forman el grupo de presión, se comentan de forma general las principales pérdidas y las estrategias para reducirlas.

Pérdidas en el transformador y en conductores

Dado que las pérdidas en el transformador están directamente relacionadas con el factor de potencia, para reducirlas es necesario trabajar con un factor de potencia cercano a la unidad. Las principales causas de valores bajos del factor de potencia son:

- El aumento de las pérdidas por efecto Joule
- Las posibles caídas de voltaje en las líneas de alimentación que se relacionan con un incremento de la corriente demandada con lo que se reduce la capacidad de carga instalada.

Conocidas las principales causas de las pérdidas en estos elementos, las medidas de reducción de pérdidas consisten en:

- Mejorar el enfriamiento de los transformadores
- Incrementar el calibre de los conductores
- Optimizar el factor de potencia: En general un valor inferior al 90% merece tomar acciones para compensarlo por ejemplo con baterías de condensadores, para alcanzar valores más cercanos a la unidad.

Pérdidas en el motor

Los motores eléctricos son los encargados de transformar la energía eléctrica en mecánica. Las pérdidas típicas en un motor eléctrico pueden desglosarse como:

- Pérdidas eléctricas en el estator y el rotor, éstas varían con la carga
- Pérdidas en el hierro (núcleo), son independientes de la carga
- Pérdidas mecánicas por fricción y turbulencia del viento (son independientes de la carga)
- Pérdidas de carga por dispersión (son dependientes de la carga)

Por tanto la eficiencia de un motor eléctrico relaciona su habilidad de convertir la potencia eléctrica en potencia mecánica útil. Todas las pérdidas comentadas influyen en el valor de esta eficiencia, pero de manera general se puede establecer que la eficiencia máxima se da cuando operan entre el 75 y el 95% de su potencia nominal, disminuyendo ligeramente cuando se incrementa y de manera significativa cuando se reduce. Las principales medidas a aplicar para incrementar la eficiencia de los motores son:

- Corregir los desequilibrios de voltaje
- Sustituir el motor eléctrico por un motor de alta eficiencia
- Optimización de la eficacia del motor

La reducción del 30% en las pérdidas de un motor con un rendimiento de 82%, puede suponer un nuevo valor de rendimiento del 87,4%. El criterio general consiste en considerar que si el potencial para mejorar la eficiencia de los motores rebasa el 5%, es todavía más recomendable la sustitución del conjunto bomba-motor, dado que el potencial de ahorro se asegura en ambos componentes y la medida puede ser sumamente rentable.

Pérdidas en la bomba

Las mayores pérdidas energéticas en el conjunto de los elementos de las estaciones de bombeo, se presenta en la etapa de transformación de energía mecánica a potencia manométrica.

La siguiente figura representa los flujos de pérdidas de la bomba centrífuga:

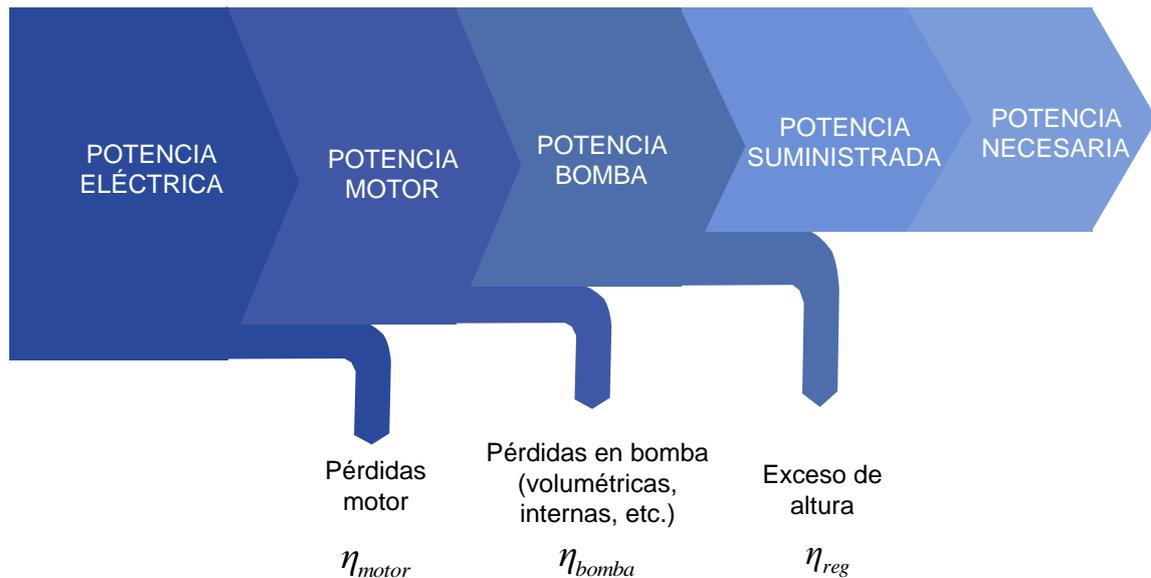


Figura 6-11: Diagrama energético global de las bombas centrífugas.

Los principales aspectos a diagnosticar en estos sistemas son:

- La eficiencia electromecánica actual
- Las condiciones de operación del sistema
- Las características de las instalaciones y pérdidas energéticas en el sistema de conducción

Durante su operación las bombas sufren pérdidas naturales como resultado del desgaste de los mecanismos hidráulicos, esto implica que no se pueda mantener la misma eficiencia que la de la bomba nueva. A continuación se enumeran los diferentes tipos de pérdidas que se presentan en las bombas (clasificándolas entre pérdidas externas e internas):

Pérdidas internas:

- Pérdidas de carga derivadas de la viscosidad del fluido. Un ejemplo de pérdidas de carga lo constituyen las pérdidas por choques en la entrada del difusor.
- Pérdidas por fugas: en una bomba, las pérdidas por fugas internas tienen como causa el juego que necesariamente ha de existir entre partes móviles como el impulsor y partes fijas.
- Pérdidas por rozamiento interno.

Pérdidas externas:

- Fugas externas: Éstas se producen en los lugares donde el eje atraviesa a la carcasa de la máquina. Una parte del caudal que entra a la bomba se deriva antes de ingresar en el impulsor y se pierde.
- Pérdidas por rozamiento externo: Rozamiento mecánico en las empaquetaduras que existen en los ejes y rozamiento mecánico en los cojinetes de la bomba.

Las principales medidas para incrementar la eficiencia de las bombas, pasan por adecuar el equipo de bombeo al punto real de operación, el procedimiento consiste en definir al menos dos puntos de operación donde opere el equipo de bombeo. Posteriormente se deben analizar las características del equipo instalado y valorar si es recomendable adecuarlo a las operaciones reales, sin embargo es importante tener en cuenta que cualquier modificación, por ejemplo el recorte en el diámetro del impulsor puede modificar las curvas de rendimiento de las bombas. Se muestra en el cuadro siguiente las acciones correctivas propuestas por el BID según la ubicación del punto de operación con el objetivo de incrementar la eficiencia de la bomba.

Tipo de bomba	Ubicación del punto de operación	Acción correctiva propuesta
Vertical multietapa	Por encima de la curva de la bomba	Incrementar etapas hasta lograr hacer pasar la curva de la bomba por el punto de operación.
		Sustituir los impulsores por nuevos impulsores de mayor diámetro, siempre que sea posible.
	Por debajo de la curva de la bomba	Eliminar etapas hasta lograr hacer pasar la curva de la bomba por el punto de operación.
		Recortar los impulsores al tamaño requerido para que la curva de la bomba pase por el punto de operación.
Horizontal	Por encima de la curva de la bomba	Sustituir los impulsores al tamaño requerido para que la curva de la bomba pase por el punto de operación
	Por debajo de la curva de la bomba	Recortar los impulsores al tamaño requerido para que la curva de la bomba pase por el punto de operación.

Figura 6-12: Acciones recomendadas para ajustar las curvas del equipo de bombeo a la condición real de operación (BID, 2011).

A la vista de todas las medidas propuestas en el Manual de Eficiencia energética del BID del que se han extraído todas las estrategias anteriores se desprende una cuestión común a casi todas las acciones correctivas, que tanto en la selección de las bombas como en la instalación de las mismas ha de tenerse en cuenta que éstas han de incorporar un plan de mantenimiento, tanto correctivo como preventivo.

Por tanto habrá que prever aspectos como la facilidad de montaje y la disponibilidad de piezas de repuesto, además de asegurar que en caso de avería las bombas se puedan aislar del resto de instalaciones. Se calcula que los costes anuales de mantenimiento suponen entre un 10 y un 20 por ciento del valor de compra de los equipos (Espert y García-Serra, 2013). La Figura 6-13 lo ejemplifica.

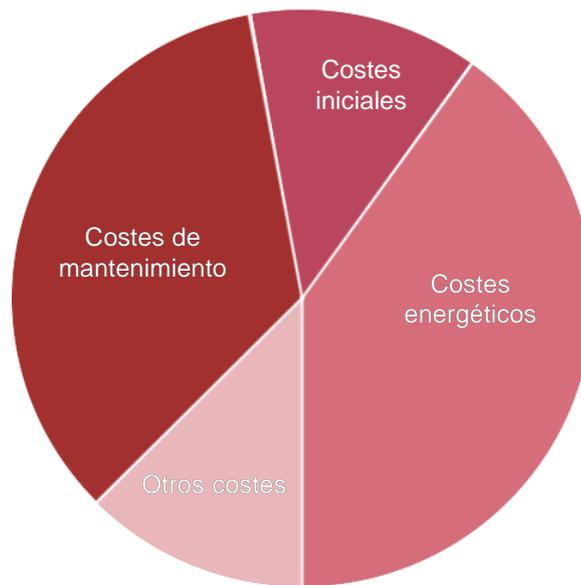


Figura 6-13: Proporciones típicas en el análisis del coste de vida de una bomba industrial de tamaño medio

6.3.2. Recuperar o reducir la energía topográfica

Por medio de la instalación de bombas trabajando como turbinas (PATs) para la recuperación de energía o con la sectorización del sistema, de forma que éste quede dividido en escalones de presión, es posible reducir la energía topográfica. Otra medida que también permite la reducción de la energía topográfica es suministrar energía adicional a los sectores más altos con rebombes (bombas booster). El ahorro esperado por medio de este tipo de medidas puede alcanzar el 15%.

La energía topográfica es aquella que es necesaria introducir en el sistema condicionada por la altura del consumo más desfavorable. El trazado concreto del sistema determinará si la introducción de una VRP, con el objetivo de reducir la presión de exceso, disipa únicamente energía topográfica o además disipa energía de exceso. Independientemente de que la energía que se logre disipar con una VRP sea topográfica o de exceso, lo que se logra es reducir la presión en el sistema y por tanto el caudal fugado. Al reducir la presión, la energía útil entregada a los usuarios se reduce, pero la energía total que se suministra al sistema se mantiene prácticamente idéntica, pues previamente se ha introducido. Los únicos términos que realmente se ven afectados por la introducción de una VRP, y que sí condicionan que la energía total a suministrar sea algo menor, es la energía embebida en las fugas y la fricción, consecuencia de la reducción del volumen fugado.

Por tanto la introducción de VRP no evita que la energía topográfica se deba aportar, ya que la energía topográfica es consecuencia directa del trazado del sistema, por tanto la única opción para evitar realmente esa energía es modificar el trazado (layout) del sistema. Mientras el layout

de la red siga siendo el mismo, la energía topográfica podrá disiparse e incluso recuperarse, pero previamente deberá haber sido introducida. Ya se vio la consecuencia sobre el término de energía topográfica (Capítulo 3) de la sectorización sufrida en una red de riego, y las consecuencias en ahorro económico de esta disminución; sumada esta medida a la programación de turnos de riego, la energía consumida en el sistema se vio reducida de 100,26 kWh/ha a 59,55 kWh/ha, es decir más del 40%; con una reducción en la factura eléctrica de más del 60% (consecuencia de un descenso del término topográfico de 0,28 a 0,22).

El objetivo de estas medidas es implementar esquemas de funcionamiento distintos a los actuales en los sistemas con altos niveles de energía topográfica, se trata de una de las medidas más obvias a simple vista, ya que desde el punto de vista energético no tiene mucho sentido bombear toda el agua que requiere la red a una altura elevada, por ejemplo hasta un depósito de regulación o hasta el usuario más desfavorable, aportándole al agua una energía innecesaria.

Se presenta a continuación otro ejemplo para ilustrar esta medida (Gómez, 2014), en el que desde el punto de vista de la calidad del suministro y teniendo en cuenta la complejidad topográfica real de esta zona, la solución actual puede entenderse. La red cuenta con importantes desniveles, por lo que inicialmente se consideró que la mejor solución con el fin de garantizar el suministro era elevar toda el agua demandada por el sector hasta una altura mayor que la altura requerida por el nudo más desfavorable. El principal problema de esta solución es que el resto de consumidores del sector se encuentran a cotas mucho menores que el más desfavorable, por lo que una vez el agua abandona el depósito y llega al usuario más elevado, el sistema debe bajar la presión antes de llegar a los nudos más bajos, pues sino se alcanzarían presiones superiores a los 8 bares. La nueva situación propuesta consiste en bombear al depósito sólo parte de la demanda total del sector suministrando en directo al resto del sector.

En definitiva, la modificación consiste en abastecer desde el depósito únicamente a los usuarios que se encuentran en una cota superior, más cercana a la altura del depósito y que el resto del sector que se abastezca en directo con la nueva bomba, evitándose la actual sobreelevación de buena parte del agua que consume este sector. El esquema que ilustra la medida de mejora se muestra en la (Figura 6-14, situación actual y situación propuesta).

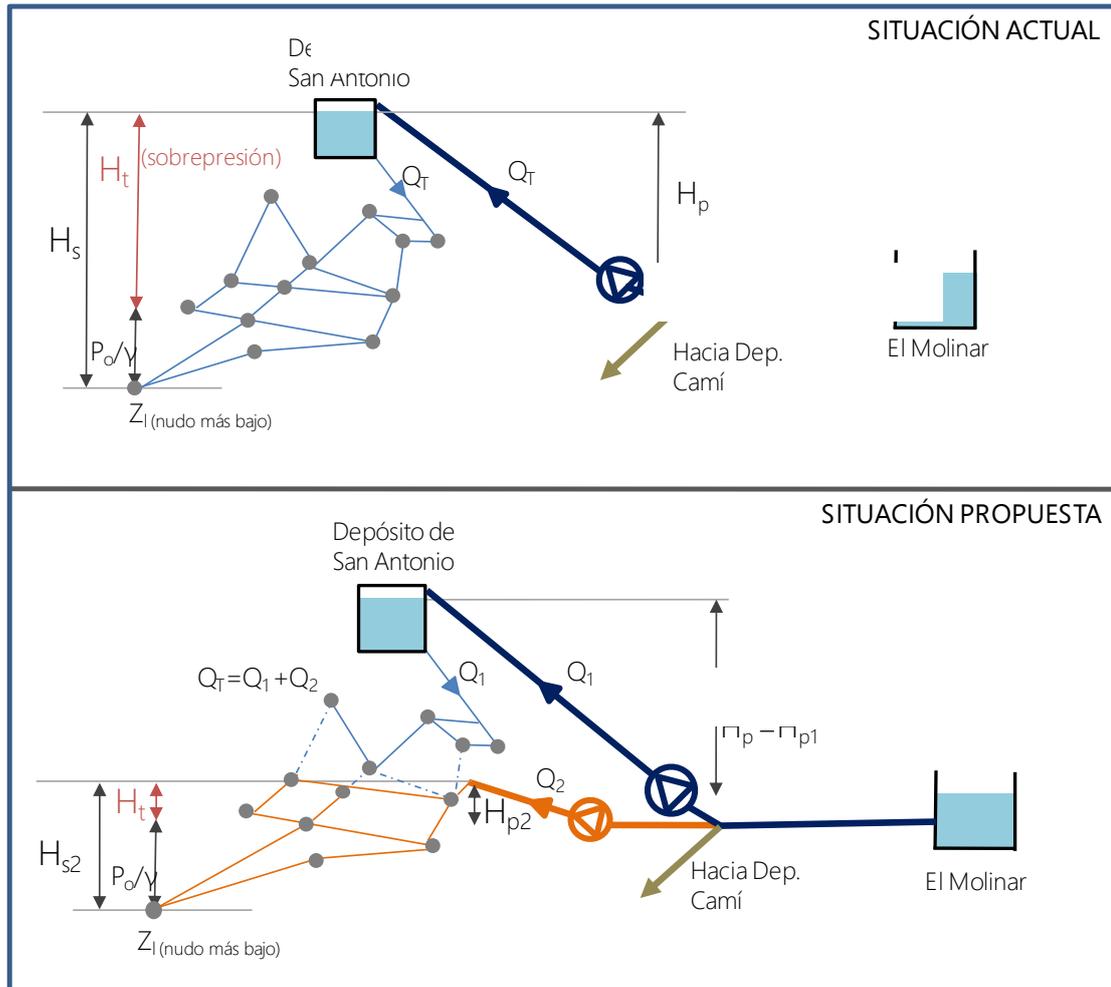


Figura 6-14: Esquema del funcionamiento propuesto del Rebombear

Los cálculos realizados con ayuda del modelo matemático de la red (que permite introducir y modificar las condiciones de funcionamiento de una manera relativamente sencilla y fiable) indican que la nueva bomba funcionaría las 24 horas del día según la demanda de los usuarios, y la bomba actual trabajaría sólo una hora al día, lo que reduciría la energía de eje que la zona demanda en 324 kWh/día, que comporta un ahorro de 15.330 €/año. Conocido el ahorro calculado, queda pendiente estimar el gasto necesario. Esto es, calcular la inversión necesaria que debe contemplar, además del gasto que supone instalar una nueva bomba, la incorporación de nuevas conducciones. Es decir, el análisis coste – beneficio de la actuación. Este análisis debe contemplar todas las posibles actuaciones e inversiones adendas de las posibles desventajas adicionales que se confieren a la nueva configuración, pues el control del sistema es más complejo, y la reducción del volumen de agua bombeado al depósito y requerido por éste implicaría una menor renovación.

Otra opción de cara a reducir la cantidad de energía topográfica o de exceso en el sistema, es tratar de recuperarla. Para ello habrá que recurrir a las conocidas como PATs (Pump As

Turbine). El uso de una bomba trabajando como una turbina para recuperar la energía disipada es generalmente considerado como la solución más rentable, pero no exenta de complejidad. Se han propuesto varias soluciones técnicas para reemplazar las válvulas reductoras de presión por dispositivos de producción de energía (Paish, 2002; Sammartano et al., 2013), pero no son elementos tan sencillos de seleccionar como una válvula, dado que en condiciones hidráulicas variables éstas deben equiparse con los correspondientes elementos reguladores que permitan extraer el mayor rendimiento posible.

En la red de distribución de agua, un sistema de producción de energía debe hacer frente a gran variabilidad en las condiciones de funcionamiento, es decir, los valores de caudales y alturas disponibles son dependientes de las demandas aguas abajo de este tipo de elementos, y tratándose de sistemas urbanos (sistemas vivos), éstas variables no son constantes. El diseño de estos tipos de elementos de generación de energía hidroeléctrica suelen realizarse bajo una estrategia de funcionamiento variable. El método de diseño permite identificar las curvas de rendimiento de la PAT que maximizan la energía producida por un patrón de distribución de flujo y la presión de cabecera asignada (Carravetta et al., 2012). La dinámica computacional de fluidos (CFD) se muestra como una alternativa adecuada para la evaluación de la curva de rendimiento que cubre el limitado número de datos experimentales con los que suele contar, estas técnicas permiten simular nuevos escenarios próximos a la realidad sin necesidad de acometer los correspondientes ensayos.

6.3.3. Mejorar viejos diseños de distribución y suministro

Las redes se han diseñado tradicionalmente dejando de lado criterios de eficiencia energética, primando en la mayoría de casos la reducción del coste de instalación o la seguridad y simplicidad del sistema. Por ejemplo, los depósitos tradicionalmente han sido construidos en el punto más alto para garantizar la presión a los usuarios, lo que al mismo tiempo conlleva un aumento del exceso de presión. Cambios en el tipo de suministro (como el suministro en directo evitando los depósitos de regulación en cabecera) pueden ahorrar hasta un 30 % (Gómez et al., 2015a).

El aumento de la población en zonas urbanas con el correspondiente incremento de la demanda de agua no ha ido acompañado, en muchos casos, de un crecimiento ordenado de las infraestructuras hidráulicas necesarias para atender esta demanda. Este hecho, unido a una insuficiente tasa de renovación de tuberías, ha propiciado que muchas redes se vuelvan incapaces de satisfacer la demanda de todos los consumidores de forma simultánea. A medida que los sistemas se vuelven más ineficientes, los gestores tienen que buscar soluciones para garantizar el suministro, y la incorporación de nuevos depósitos ha sido y sigue siendo una de las medidas más populares.

Con la existencia de estos depósitos, los picos de demanda se laminan y la red es capaz de abastecer a los usuarios de forma continua. De esta forma, los sistemas se protegen frente a acusados cambios en la demanda de agua y los usuarios ante posibles servicios intermitentes. Del mismo modo, estos depósitos garantizan un volumen de reserva, muy útil de cara a garantizar el suministro ante cualquier incidencia en la red.

Por ello, y tal como se ha podido comprobar en capítulos anteriores, el funcionamiento de este tipo de depósitos no siempre es mejor alternativa, y una de sus principales problemas deriva de la ineficiencia global que introducen al sistema. Por ejemplo, los aljibes domésticos son un punto importante de pérdidas energéticas como cualquier elemento que suponga la despresurización de la red, la diferencia es que este gasto corre a cuenta de los usuarios, pero lo pague quien lo pague es una ineficacia a todos los efectos.

Si bien eliminar un depósito puede ser una solución arriesgada (desde el punto de vista de la seguridad de suministro y de la sencillez del control), los resultados mostrados sobre los beneficios energéticos y también económicos y medioambientales no deberán dejar lugar a dudas sobre la idoneidad de los nuevos diseños. Al hecho de que se puede tratar de una solución con un coste de factura eléctrica menor (habría que estudiar cada caso concreto), lo que es innegable es que el coste principal de inversión del depósito se evitaría.

En definitiva, además de los inconvenientes conocidos y demostrados sobradamente (Cobacho et al., 2008) como son los problemas de calidad o el bajo rendimiento global de las redes que cuentan con estos esquemas de suministro (Soriano et al., 2010), está el problema asociado de la distorsión de los flujos de agua en la red. Conocer el estado de los sistemas de distribución de agua es imprescindible para mejorarlos, y el punto de partida debe ser, en la mayoría de casos, conocer el destino del agua que no se consume o no se contabiliza. Sin este diagnóstico difícilmente se pueden fijar estrategias adecuadas que conduzcan a sistemas más eficientes. En definitiva, la presencia de estos elementos la mayoría de veces imposibilita la gestión sostenible.

Uno de los principales motivos de la presencia de estos elementos en los sistemas de distribución de agua es la seguridad que aportan a los consumidores frente a los posibles cortes de agua. En países en desarrollo, y especialmente en las zonas áridas o densamente pobladas, la intermitencia del servicio es una práctica común. Sin embargo esta práctica lejos de ser una solución acertada lleva consigo graves inconvenientes (Totsuka et al., 2004). La intermitencia genera una disponibilidad desigual del servicio dentro de la red. Los consumidores de sistemas con cortes de agua tienden a dejar sus grifos abiertos con el objetivo de obtener la mayor cantidad de agua una vez que el servicio se reanuda. Con el servicio rearmado, los caudales máximos son mayores que los esperados, aumentando las pérdidas de presión en la red, y en consecuencia los usuarios más altos o más alejados del punto de suministro siempre obtendrán menos agua que los que se encuentran más cerca. Por otro lado, la intermitencia lleva consigo un alto grado de riesgo de contaminación, dado que la continua despresurización de la red

favorece la intrusión de agua contaminada por las juntas o fisuras en la red, hecho bien conocido y recientemente comprobado experimentalmente (Fox et al., 2015).

La intermitencia del servicio también lleva asociado un coste global elevado si se tiene en cuenta los gastos adicionales que deben asumir los usuarios en la instalación de elementos auxiliares como tanques de almacenamiento, grupos de presión domiciliarios, o instalaciones alternativas al suministro de la red. Además, a la larga existe un mayor gasto de agua, porque los consumidores ante el miedo a la escasez tienden a almacenarla cuando el servicio está en funcionamiento, sustituyéndola al día siguiente por agua nueva cuando el sistema se restablece (McIntosh, 2003; IWWA, 2000). Y en cuanto al sistema de tuberías, el flujo intermitente genera variaciones continuas de presión que aceleran la fatiga y la rotura de éstas, por los cambios bruscos y continuos de la tensión que soportan sus paredes. A esta situación desfavorable para las tuberías, hay que añadir el hecho de que al aumentar la contaminación en su interior también debe incrementarse la limpieza de éstas por un lado y los agentes desinfectantes por otro, lo que supone un mayor coste asociado al agua.

Por tanto, la existencia de aljibes son una consecuencia de la estrategia de interrumpir el servicio cuando el abastecimiento es ineficiente, dado que el sistema no es capaz de abastecer de forma continua a lo largo del día, el usuario se asegura de disponer de agua cuando la pueda necesitar.

Por otro lado, la existencia de aljibes lamina las puntas de consumo. Un sistema que cuente con estos elementos presentará una modulación horaria en el consumo más plana, si bien el usuario no modifica su rutina y la demanda permanece invariante tanto en volumen como en distribución horaria, la red sí modifica su demanda dado que el usuario se desacopla de la red al interponer un depósito entre ambos. El abonado demanda a su depósito y no al sistema. Por tanto, con la existencia de estos elementos, el sistema queda protegido frente a acusados cambios de la demanda y los usuarios ven en ellos una seguridad que no tienen con el suministro intermitente del agua. Pero estos elementos cuentan con importantes inconvenientes que imposibilitan una gestión eficiente del sistema, se presentan a continuación algunos de ellos:

Pérdidas en la calidad del agua

Uno de los inconvenientes más claros de la utilización de aljibes domiciliarios es la pérdida de la calidad del agua que finalmente se entrega al consumidor. Al tiempo de residencia del agua en la red, es decir el tiempo que transcurre desde que ésta es inyectada en el sistema hasta que llega a la acometida, hay que sumarle el tiempo que el agua permanece almacenada en el aljibe doméstico hasta que es consumida. El tiempo que pasa el agua en una red influye en numerosas características de la calidad del agua, por ejemplo el sabor y el olor, la precipitación de los sólidos disueltos en el agua (tanto sales inorgánicas como cantidades menores de materia orgánica) o la formación de subproductos de las sustancias de desinfección. La edad del agua no

es directamente medible pero puede estimarse con trazadores que proporcionen una aproximación del tiempo de residencia (Machell y Boxall, 2012).

Al deterioro de la calidad del agua con el paso del tiempo, hay que añadir la posibilidad de contaminación directa en el depósito, la intrusión de contaminantes directamente o por falta de estanqueidad a través de sus contornos. Por último, hay que considerar la pérdida de desinfectante mientras el agua permanece en el depósito, sobre todo cuando ésta tiene una escasa tasa de renovación o mezcla.

Estos inconvenientes se agravan dependiendo de las características de los depósitos, por ejemplo la edad del depósito, el material o los protocolos de limpieza (Schafer et al., 2012). Estadísticamente los depósitos que se limpian tres o más veces al año poseen un porcentaje menor de algunas bacterias y un valor de turbidez inferior al 60% con respecto a los que se limpian con menor frecuencia. Además de la influencia de la temperatura en la proliferación de bacterias y en la pérdida de cloro residual. Al respecto conviene decir que en España los aljibes están tan arraigados que no están prohibidos, salvo en algunas poblaciones. La actual normativa de calidad de guas vigente (BOE, 2003) en su artículo 11 apartado 4, establece que *“El gestor de los depósitos públicos o privados de la red de abastecimiento o la red de distribución, cisternas, y el propietario de los depósitos de instalaciones interiores, vigilará de forma regular la situación de la estructura, elementos de cierre, valvulería, canalizaciones e instalación en general, realizando de forma periódica la limpieza de los mismos, con productos que cumplan lo señalado en el artículo 9. La limpieza deberá tener una función de desincrustación y desinfección, seguida de un aclarado con agua”*. Sin duda una excesiva responsabilidad para el presidente de la comunidad de vecinos.

Consecuencias energéticas

La estimación de las ineficiencias energéticas derivadas de la existencia de estos elementos es relativamente sencilla de evaluar. Cuando el agua entra en el depósito se libera inmediatamente la presión en la tubería. Pero para poder hacer uso de ésta en el interior de la vivienda se requiere una presión mínima, por lo que el agua debe ser re-presurizada. En el caso de que los aljibes se encuentren en el techo de las viviendas, esto es sencillamente por gravedad, en el caso de que se encuentre en los sótanos o plantas bajas, se requiere de un grupo de presión domiciliario. Pero en ambos casos tiene lugar una pérdida de presión real, lo que significa una pérdida de energía. Ésta es fácilmente cuantificable considerando el volumen que se despresuriza por la presión disponible en la red antes del depósito de almacenamiento, pues la energía almacenada por el agua es el producto de la presión por el volumen.

Implicaciones económicas

Desde el punto de vista económico también se ha evidenciado que a largo plazo la existencia de estos elementos suponen un coste mayor frente a una red bien dimensionada (Cabrera et al., 2013). Los costes de operación y mantenimiento vinculados a los aljibes domésticos, son

mayores que los costes totales que supondrían la renovación de la red con el objetivo de garantizar el suministro continuo a presiones adecuadas, y por tanto posibilitar la eliminación de estos elementos.

El principal problema de esta operación de renovación desde la óptica económica reside en que mientras la inversión inicial de la adecuación de la red recae en la empresa que gestiona el servicio, el mantenimiento de los aljibes lo asumen los abonados. Pero a la larga, la suma de todos los costes asociados a los aljibes repartidos por la red es mayor que el coste total que supondría su eliminación. Estos costes contemplan por un lado el coste de la energía desperdiciada por la despresurización de la red. Por otro lado, y quizás uno de los costes más fáciles de identificar, la limpieza de los depósitos (al menos una vez al año). Si estos depósitos no se mantienen correctamente, difícilmente se puede garantizar la calidad del agua suministrada, razón por la cual algunas ciudades, es el caso de Zaragoza (Ayto. de Zaragoza, 2011), los han prohibido.

Los costes anuales de operación y mantenimiento de estos elementos pueden resultar hasta tres veces mayores que el coste anual de renovación de la red, siendo esta diferencia mucho mayor si se considera que el usuario en muchos casos sustituye el agua que bebe del grifo (2 litros por persona y día) por agua embotellada, con el correspondiente coste que esto supone

Por tanto, desde un punto de vista económico, resulta más rentable a largo plazo mantener y actualizar la red para evitar el servicio intermitente y por tanto prescindir de los aljibes domiciliarios, que recurrir en el corto plazo y en la inmediatez de las soluciones parciales a estos elementos.

Errores habituales en la medida

Dado que la existencia de los aljibes desacoplan el consumo del usuario de la red, los medidores situados antes de estos elementos no contabilizan directamente el agua que el usuario consume en valor y tiempo, sino que deben registrar el caudal de llenado de estos depósitos.

La curva de error de un contador nuevo puede ser lo suficientemente precisa para contabilizar los bajos caudales que se dan en el llenado de los aljibes. Sin embargo, después de varios años de vida las condiciones metrológicas de estos contadores se deterioran y el volumen no registrado aumenta, incrementando las conocidas pérdidas aparentes del sistema y reduciendo su eficiencia. La comparación de ambas configuraciones (Cobacho et al, 2008), cifra en un error global del contador (dependiendo de la clase del contador) cercano al 20% en el caso de sistemas con aljibes domiciliarios, llegándose a alcanzar valores de más del 30% pasados los ocho años de vida del contador.

Por tanto el uso de estos elementos es un factor crítico en el total del agua no contabilizada en el sistema.

Mayor complejidad en la buena gestión de la red

Los depósitos modifican la demanda temporal de la red, no tanto en volúmenes globales, dado que aunque con desfases de tiempo el caudal acaba consumiéndose, pero sí en cuanto a la caracterización horaria del consumo. La desagregación en pérdidas reales y pérdidas aparentes se basa principalmente en el comportamiento prácticamente opuesto de ambas. Mientras que las pérdidas reales varían con la presión, las aparentes lo hacen con el patrón de consumo.

La existencia de aljibes domiciliarios desvirtúa por completo este principio. Dado que el agua es almacenada para disponer de ella cuando el usuario la necesite, el comportamiento en el consumo del usuario no se traslada a la red. El sistema únicamente refleja cuando se llena el depósito pero no cuando se consume el agua. Estos elementos, se convierten por tanto en un impedimento para la aplicación de los métodos más utilizados para el conocimiento del estado de la red. La buena gestión de un sistema, parte del conocimiento de éste. La imposibilidad de realizar un balance hídrico correcto, redundará en la dificultad de realizar un modelo matemático o establecer estrategias para la reducción de pérdidas de agua.

Los aljibes, la defensa de los abonados ante sistemas ineficientes, son innecesarios en redes estancas. Por tanto, el primer paso para revertir esta situación es atacar a las pérdidas de agua, por supuesto a las fugas pero también al caudal no facturado o no medido. Ya se ha visto, que a largo plazo y desde casi todos los puntos de vista, resulta más rentable mantener y actualizar la red para evitar el servicio intermitente que recurrir a soluciones parciales, inmediatas y poco meditadas, como la instalación de depósitos domiciliarios.

Tal cual se ha visto, y se ha justificado en numerosos estudios a lo largo de los años, los depósitos domiciliarios son ineficientes desde casi cualquier óptica. La pérdida de la calidad del agua, de energía, el bajo rendimiento, la incorrección en la facturación o, en fin, el superior gasto económico que en su conjunto conllevan son razones que aconsejan su eliminación.

6.3.4. Evitar las pérdidas no incluidas en los apartados anteriores

Uno de los puntos de pérdidas de energía importante que no se ha comentado todavía y cuyo estudio y sustitución puede suponer un ahorro energético, es la sustitución de bombeos que aspiran de depósitos de rotura de carga por bombeos con aspiración directa de red.

Cuando en puntos del sistema urbano de distribución de agua la presión es insuficiente para abastecer a los usuarios, pues la presión mínima de servicio suele garantizar altura suficiente para las primeras plantas del edificio, se recurre a grupos de bombeo para aportar la presión necesaria a los usuarios a partir de la tercera o cuarta planta. De igual forma, se recurre a estos elementos cuando se requiere abastecer a sectores de cotas altas de la red, los cuales no pueden ser suministrados directamente desde cabecera. Estos elementos pueden aspirar desde depósitos atmosféricos alimentados desde la propia red (depósitos de rotura de carga) o bien pueden aspirar directamente de la red.

En el caso de aspirar de un depósito, el agua cuando llega a él desde la red se despresuriza, pues ésta llega con una presión determinada (suministrada en cabecera) y pasa directamente a presión atmosférica. Este tipo de sistemas que suponen una clara pérdida de energía tiene su justificación en la seguridad que ofrecen al abastecimiento, de una parte un depósito en condiciones normales de funcionamiento siempre garantiza el suministro de agua, y por otra, los transitorios que pueden generarse por la puesta en marcha y parada de los grupos de presión no afectan a la red de distribución aguas arriba del depósito.

En el caso de aspirar directamente desde la red, la bomba aprovecha la presión disponible en el punto de aspiración, por lo que la altura que debe suministrar es menor y por tanto la energía consumida también lo es. El ahorro económico también desciende en estos casos, pues además del propio ahorro en el consumo de energía, el ahorro de la potencia contratada puede ser relevante, más aun teniendo en cuenta el sustancial aumento del precio del término fijo en las tarifas eléctricas. En contra a esta solución se encuentra la principal ventaja de aspiración desde depósito, la aparición de un transitorio hidráulico debido a una maniobra en el grupo de presión puede afectar a la red de distribución aguas arriba, pues no cuenta con el depósito como elemento barrera, afectando a la red y a los usuarios que cuelgan de ella (Soriano et al., 2014). Este hecho impone la necesidad de disponer de sistemas de protección adecuados contra transitorios hidráulicos.

Económicamente, la valoración coste-beneficio debe contemplar de un lado el coste de la instalación de estos elementos de protección, y por otro el estudio necesario que garantice la seguridad del sistema de distribución. El beneficio es claro, por un lado la reducción inmediata de la factura eléctrica (término fijo y variable) y de otro la innecesaria construcción del depósito, en el caso que no exista.

6.3.4.1. Caso de estudio. Sustitución de bombeos aspirando de depósitos de rotura por aspiración directa de red

Se presenta a continuación un caso real en el que se ha aplicado esta medida con consecuencias de ahorro energético formidables. Se trata de la eliminación del depósito de rotura de carga por aspiración directa de la estación de bombeo de Adsubia-Cabanes en Jávea. Sin entrar en los detalles de la red, se presenta de forma general la configuración del sistema. Los resultados detallados de este estudio pueden verse en Espert et al. (2015). En la Figura 6-15 se muestra el esquema simplificado del sistema y su representación en ALLIEVI (programa utilizado para la simulación en régimen transitorio de los dos escenarios de trabajo; con depósito de rotura de carga y con aspiración directa),).

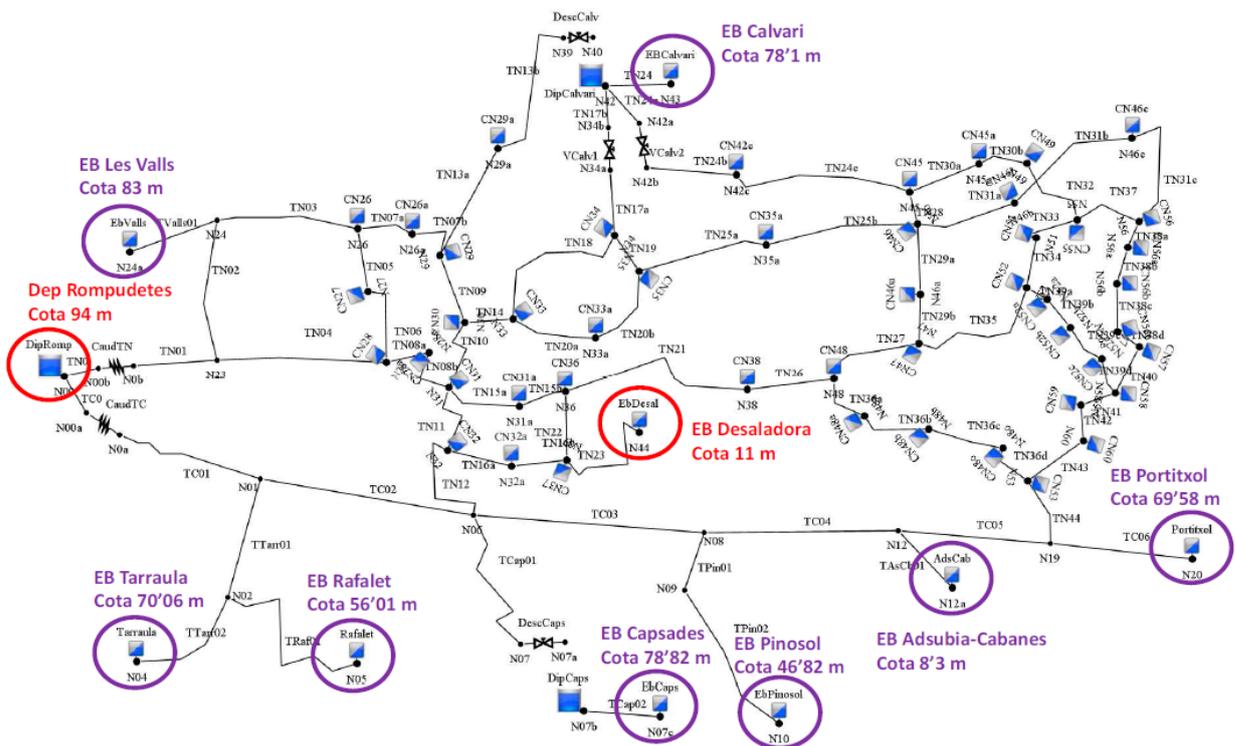


Figura 6-15: Esquema simplificado de la red de distribución de agua de Jávea modelado con ALLIEVI.

La altura piezométrica de los puntos de alimentación de la red son 94 metros (depósito de Rampuquetes) y 80,32 metros a la salida de la estación de bombeo de la Planta Desaladora. A la vista de las alturas del sistema, se observa como el agua se despresuriza al entrar a los depósitos para luego volver a ser presurizada por las estaciones de bombeo que aspiran el agua de ellos para abastecer a sus respectivas zonas de consumo. De todas estas estaciones de bombeo, la pérdida de energía más importante se produce en la estación de bombeo de Adsubia-Cabanes. Con una importante singularidad, el municipio es potencialmente turístico, por lo que su consumo es estacional. En verano, la época de mayor consumo, la presión en el punto de descarga al depósito de rotura de dicha estación es de 6,2 bar, con un caudal medio impulsado de 100 l/s. En estas condiciones la pérdida de potencia se cuantifica en 62 kW. En invierno, la situación es diferente, en el punto de descarga la presión prácticamente es la misma, 6,8 bar mientras que el caudal impulsado desciende a 30 l/s. La potencia perdida es entonces de 20,4 kW.

El ahorro en la factura eléctrica que estas pérdidas de potencia implican justifica el estudio realizado por los autores con el fin de verificar la viabilidad de las solución (aspiración directa de red) propuesta.

La situación actual de funcionamiento de la estación del estudio se muestra de forma esquemática en la Figura 6-16. En la situación inicial (Escenario 1) la estación de bombeo aspira desde el depósito de rotura de carga alimentado por la red de distribución. La potencia total del

equipamiento es de 750 kW, correspondientes a cinco bombas multicelulares horizontales en paralelo. Estos grupos descargan a un colector con una presión aproximada de 15,5 bar. A partir de este punto se alimenta por medio de dos conducciones independientes a los dos depósitos situados a 153 metros y 122 metros. El caudal circulante al depósito más elevado se controla por medio de una válvula de accionamiento, mientras que el otro se regula mediante la correspondiente válvula de llenado con flotador. En esta situación los grupos impulsan desde un colector común a la presión de 15,5 bar, debido a la diferencia de cotas entre la estación de bombeo y la cota del depósito más elevado (153 metros – 14 metros), aunque es superior a la necesaria para alcanzar el depósito que se encuentra a 122 metros. La solución ejecutada, no sólo permite reducir el consumo por el aumento de la presión disponible en la aspiración, sino que además reduce la altura a aportar por las bombas.

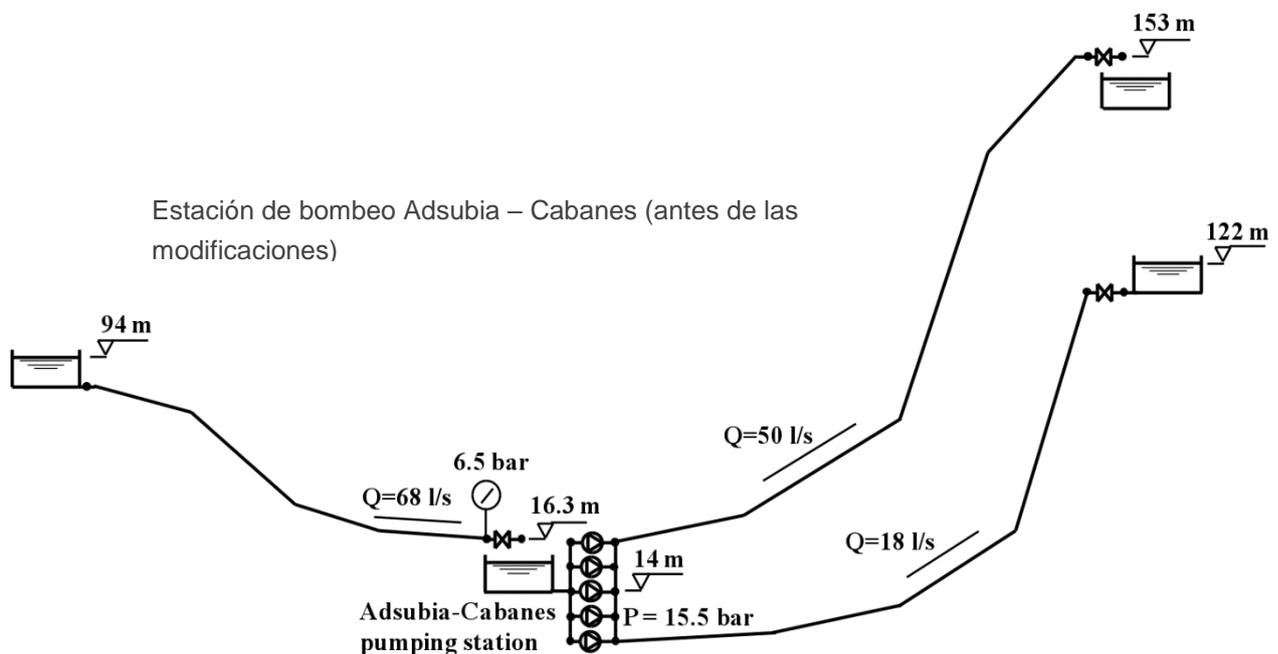


Figura 6-16: Situación inicial de la estación de bombeo de Adsubia-Cabanes. Escenario 1

En la Figura 6-17 se indica, de nuevo de forma esquemática, la modificación propuesta. La estación de bombeo ahora tendría dos impulsiones independientes. Un conjunto formado por tres bombas para impulsar el caudal necesario al depósito más elevado y otro conjunto formado por dos bombas para alcanzar el depósito situado a inferior cota. Todos los grupos aspiran de un colector común conectado a la red de distribución en el mismo punto donde inicialmente se encontraba el depósito de rotura de carga.

Con la nueva configuración propuesta, por un lado se evita la despresurización de la red y el consiguiente desperdicio de energía presente en el fluido antes del depósito. Aprovechando de esta forma los 65 bar de presión en el punto de aspiración, lo que reduce el requerimiento de

altura de las bombas a 55 mca en el caso de los grupos de menor caudal (20 l/s) y a 80 mca para las tres bombas que alcanzan el depósito más alta (30 l/s), teniendo en cuenta que ahora además al ser independientes cada uno puede ajustarse menor a los requerimientos de altura.

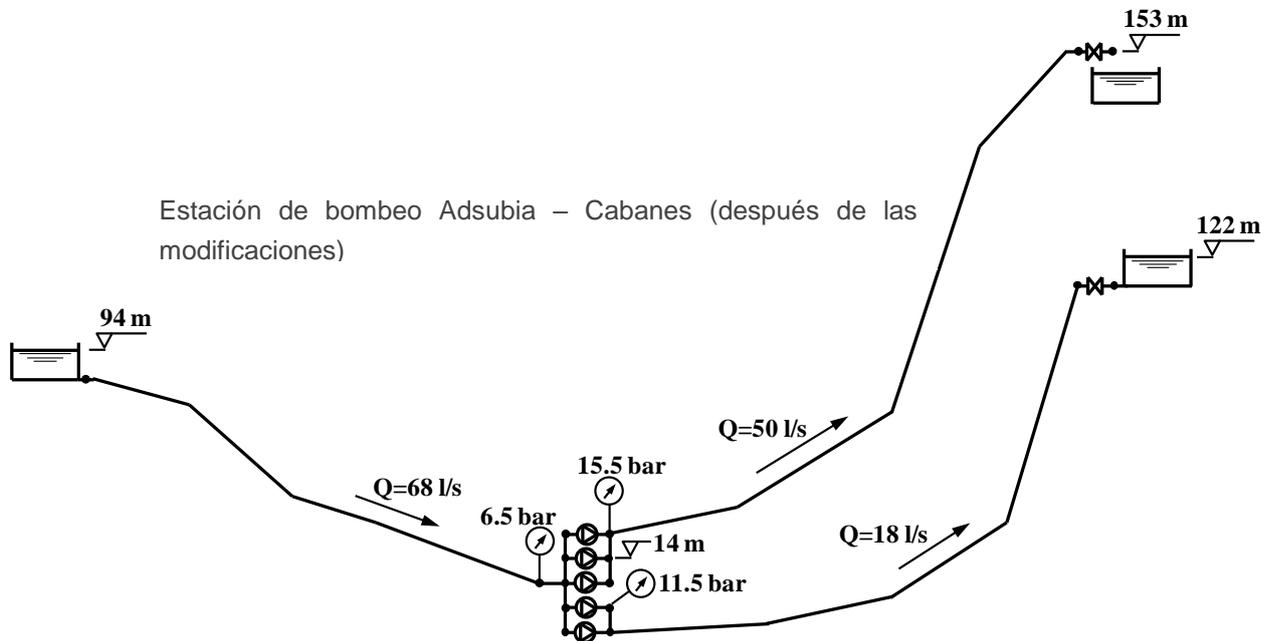


Figura 6-17: Situación propuesta de la estación de bombeo de Adsubia-Cabanes. Escenario 2

El principal problema de la nueva configuración reside en la posible aparición de oscilaciones de presión excesivas en el sistema debido a paradas accidentales de los grupos de presión. El sistema de protección contra transitorios hidráulicos en este caso está formado por un conjunto de calderines conectados unos al colector de aspiración, otros al colector de impulsión hacia el depósito menos elevado y el resto al colector de impulsión hacia el depósito más elevado. Además para reducir las necesidades de protección de los calderines se instala una válvula de alivio intercalada con una válvula de cierre.

En conclusión, las modificaciones ejecutadas en la estación de bombeo y en funcionamiento desde julio de 2014, han supuesto un ahorro energético considerable, tal como puede observarse en la Tabla 6-6.

Tabla 6-6: Consumo eléctrico medio de la estación de bombeo Adsubia – Cabanes

	Escenario 1	Escenario 2
Potencia eléctrica contratada (kW)	320 kW	190 kW
Consumo energético medio (kWh/día)	3.664 kWh/día	1.857 kWh/día
Coste medio energético (€/día)	593,26 €/día	300,68 €/día

Tanto el consumo energético como el coste medio diario se han reducido aproximadamente al 50%. El ahorro anual en energía eléctrica se estima en unos 652,3 MWh, lo que supone una reducción de la emisión de GEI de 293,5 Tm de CO₂e/año. El ahorro económico anual (debido por un lado a la reducción de la potencia contratada y por otro a la reducción del consumo de la energía eléctrica) se cuantifica en 106.792 €/año.

6.4. Ejemplo de aplicación

Se presenta a continuación un ejemplo de aplicación que reúne de forma secuencial algunas de las medidas comentadas a lo largo de este capítulo. Partiendo de un sistema inicial de riego se van analizando cómo afectan a las diferentes energías del sistema cada una de las medidas comentadas. Todos los análisis de funcionamiento del sistema se han realizado con EPANET, con el fin de garantizar que los cambios introducidos en el sistema mantienen y garantizan el correcto funcionamiento desde el punto de vista de las presiones. Los análisis energéticos se realizan siguiendo la auditoría energética comentada en profundidad en el capítulo 4, y que permite ir comparando los distintos escenarios. Los resultados de esta auditoría han sido obtenidos con ITAEnergy.

6.4.1. Breve descripción del sistema inicial

Se plantea inicialmente un sistema de riego de tipología ramificada que abastece a todos los hidrantes desde un único punto de captación. Se trata de una red ficticia creada con el objetivo de cuantificar energéticamente las mejoras comentadas. Los datos básicos de la red se muestran en la Tabla 4-8 y su esquema viene representado en la Figura 6-18.

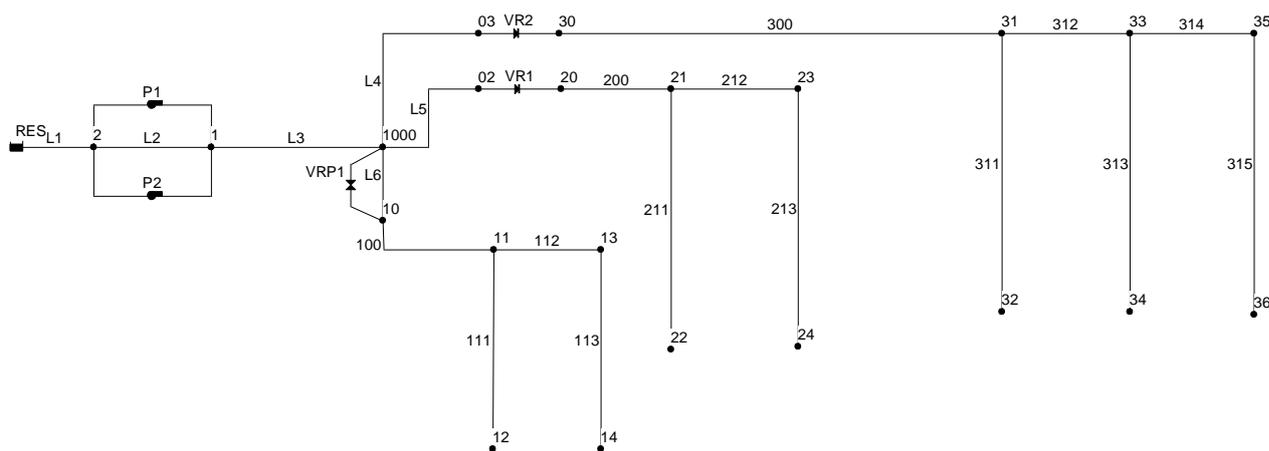


Figura 6-18: Esquema de la red del sistema inicial.

Las tuberías y nudos que no aparecen en la tabla siguiente se corresponden con nudos y tuberías auxiliares, es decir que no demandan ningún tipo de caudal (ni consumido ni fugado) y no introducen ningún tipo de pérdidas. Por ese motivo sus características no se introducen en el sistema. El sistema inicial ya cuenta con una VRP situada a la entrada del sector más bajo, ésta reduce ligeramente la presión para mantenerla más cercana la presión mínima de suministro (éste es el único elemento de regulación del sistema inicial).

Se ha asignado a todos los nudos una curva de modulación, dos curvas diferentes para todo el sistema. Estas curvas de modulación, con un total de 24 factores horarios representan el caso que los hidrantes tengan una demanda variable a lo largo de todo el día, siendo esta la forma común de simular una red de riego a la demanda. Estos patrones de consumo son estimados y pueden estar alejados de la realidad pues se desconoce en cada momento el caudal que demanda cada hidrante, pero son válidos para simular (a modo de ejemplo) el caso inicial de un sistema de riego de estas características.

Tabla 6-7: Datos básicos de los nudos y las tuberías

Tubería	Longitud (km)	Diámetro (mm)	Nudo	Elevación (m)	Demanda base (l/s)	Coefficiente emisor ($m^{3-\gamma} / s$)	Modulación de la demanda
100	500	350	11	10	20	0.12122	Demanda 2
111	500	200	12	0	20	0.02660	Demanda 1
112	500	300	13	15	20	0.12122	Demanda 1
113	500	200	14	10	20	0.02660	Demanda 2
200	1000	350	21	45	20	0.10826	Demanda 1
211	500	175	22	50	20	0.08356	Demanda 2
212	500	300	23	50	20	0.05817	Demanda 2
213	500	175	24	55	20	0.05649	Demanda 1
300	3000	450	31	75	15	0.39056	Demanda 1
311	600	200	32	80	15	0.05649	Demanda 2
312	500	350	33	80	15	0.09895	Demanda 2
313	600	200	34	85	15	0.05364	Demanda 1
314	500	300	35	85	15	0.09842	Demanda 1
315	600	200	36	90	15	0.09182	Demanda 2
			RES	40	-	-	-

Se ha supuesto para la red inicial unas fugas del 33%. Éstas se han distribuido a lo largo de todo el sistema por medio de coeficientes emisores asociados a los nudos, de esta forma las fugas se suponen dependientes de la presión, con emisores nodales y exponente $\gamma=1,1$). El volumen de agua total demandado por los hidrantes es de 21.600 m³ diarios.

Existe un único grupo de presión (formado por dos bombas iguales en paralelo) que abastece a todo el sistema. Las curvas características de estas bombas se muestran en la Tabla 4-9. La presión mínima que debe garantizarse en todos los hidrantes para el correcto funcionamiento de éstos es de 10 mca.

Tabla 6-8: Características de las bombas

BOMBA	Curva característica (H en mca y Q en m ³ /s)	Curva de rendimiento
P1 = P2	$H = 74,251 + 0,2969 Q - 0,0011 Q^2$	$\eta = 15,703 + 0,7098 Q - 0,00195 Q^2$

Los resultados de la auditoría energética para un día de funcionamiento son los que se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 6-9: Auditoría energética del sistema inicial (kWh/día)

Energía total aportada	13.916,22	
Energía aportada por las bombas	10.382,93	74,61 %
Energía de la bomba P1	5.191,46	50 %
Energía de la bomba P2	5.191,46	50 %
Energía natural	3.533,30	25,36 %
Energía total consumida	13.916,22	
Energía entregada a los hidrantes	5.891,16	42,33 %
Energía mínima requerida	3.432,59	58,27 %
Energía topográfica	1.623,76	27,56 %
Energía de exceso	834,805	14,17 %
Energía disipada por fricción	517,093	3,72 %
Energía disipada en las válvulas	1.625,00	11,68 %
Energía perdida a través de las fugas	3.385,68	24,33 %
Energía perdida en las bombas	2.497,28	17,95 %
Energía perdida en la bomba P1	1.248,64	50 %
Energía perdida en la bomba P2	1.248,64	50 %

A la vista de los resultados de la auditoría realizada, se observa que las bombas aportan el 74% de toda la energía que se inyecta en el sistema, el otro 26% está disponible por la propia altura del embalse de forma natural, aunque todo el caudal es impulsado por las bombas. En cuanto a las energías consumidas, sólo el 41,7% de todo lo inyectado se entrega a los hidrantes, y de toda esta energía útil realmente sólo el 63,5% sería estrictamente necesaria para garantizar la presión mínima y el caudal demandado, el resto se entrega en forma de sobrepresiones, que todavía sería mucho mayor si no existiera la VRP que disipa casi 12% de toda la energía entregada. Es decir que se inyecta un porcentaje de energía elevado que luego se disipa o se suministra innecesariamente, pues la presión media en la red a lo largo del día es de 57 mca (cuando sólo se requieren 10 mca). El porcentaje de la energía perdida en las fugas es ligeramente inferior al porcentaje existente de fugas (21%).

Estos inconvenientes se deben a que el grupo de presión se ve obligado a trabajar en múltiples puntos de funcionamiento, por lo que el conjunto de las dos bombas debe barrer desde el mínimo de (139,7 l/s; 61,3 mca) hasta (498,88 l/s; 80 mca), como se ve en la gráfica siguiente. La curva de consigna representa la altura mínima que debe haber en cada instante en cabecera para que en el punto más desfavorable del sistema (nudo 36) se satisfaga la demanda de caudal con el valor de presión mínima que garantiza el servicio. Tal como se puede observar, la curva característica de la asociación de las dos bombas en paralelo garantiza la presión mínima requerida para el caudal máximo, pero lógicamente no puede adaptarse al funcionamiento de los diferentes puntos de la curva de consigna, que por otra parte es muy plana, es decir existe una gran variedad de caudal pero la altura en cabecera requerida apenas varía 10 metros. Esto se debe a que no existen grandes pérdidas de carga en el sistema por lo que aunque el caudal varíe, prácticamente no lo hace la fricción.

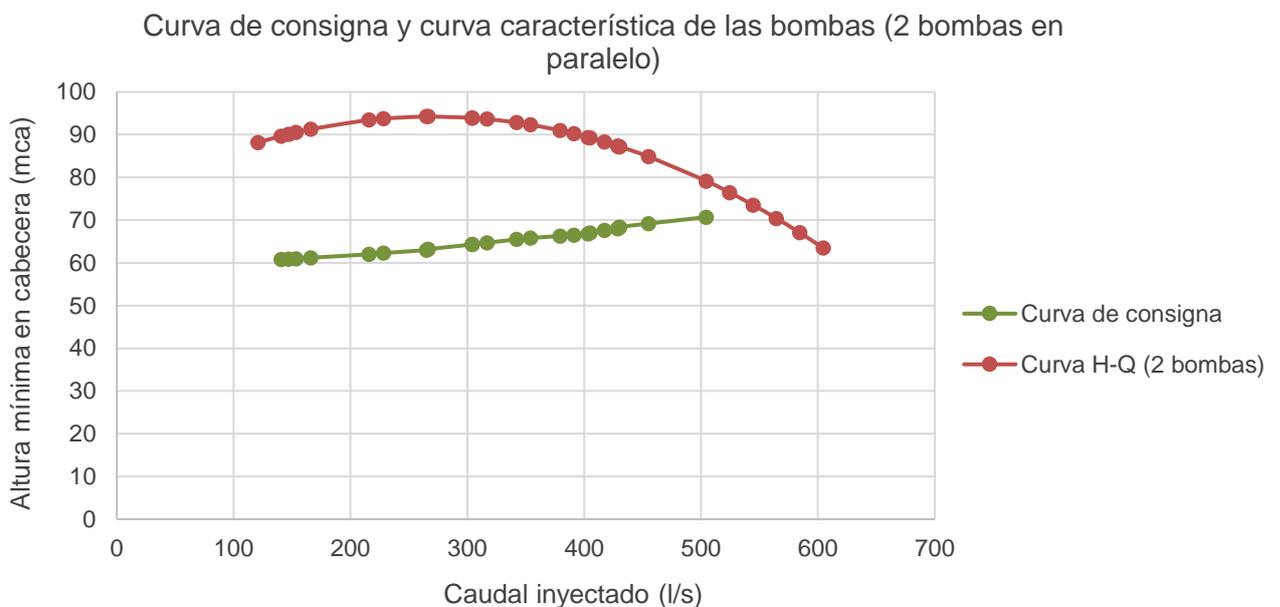


Figura 6-19: Curva de consigna frente a la curva característica del grupo de presión.

Por tanto en este sistema inicial, con las características comentadas y teniendo en cuenta que trata de simular un sistema de riego a la demanda, el consumo energético total del sistema es de 13.916 kWh/día de los cuales 10.383 kWh/día son aportados por el grupo de presión, y por tanto suponen un coste económico.

Se plantea a continuación una sucesión de medidas (inicialmente operacionales) sobre el presente sistema y se valora energéticamente el ahorro acumulado que presenta cada una de ellas.

6.4.2. Medidas OP.3 y OP.4. Reducción de las fugas y de la fricción por reducción de la presión

Dado que el sistema inicial mantiene una presión media casi 40 mca por encima de la estrictamente necesaria, la solución más sencilla a priori es reducir esa presión. La reducción de la presión logrará por un lado reducir las fugas (son dependientes de la presión), por otro al reducir el caudal que circula por las tuberías, consecuencia de reducir el caudal fugado, la fricción en éstas también se verá reducida, pues las pérdidas de carga son proporcionales al caudal al cuadrado, aunque tal cual se ha visto en la curva de consigna (Figura 6-19) plana prácticamente, la reducción de la energía perdida por fricción se deberá a la disminución del caudal pues prácticamente las pérdidas de carga no se verán afectadas.

Se instalan dos válvulas reductoras de presión al inicio de cada uno de los ramales principales, y se establece una consigna diferente para la VRP1. Al inicio de la tubería 100 (VRP1, se modifica su consigna), de la tubería 200 (VRP 2) y de la tubería 300 (VRP 3), taradas con distintas consignas.

Tabla 6-10: Regulación de las VRP del sistema

Válvula	Consigna inferior	Consigna superior
VRP1	10 mca	-
VRP2	25 mca	35 mca
VRP3	35 mca	40 mca

El resultado de la auditoría energética una vez introducida esta medida es la que se muestra a continuación. Se mantienen los resultados del caso inicial para facilitar la comparación.

Tabla 6-11: Auditoría energética tras aplicar las medidas OP3 y OP4 (kWh/día)

	SISTEMA INICIAL		OP3-OP4. REDUCCIÓN DE LA PRESIÓN	
Energía total aportada	13.916,22		11.497,09	
Energía aportada por las bombas	10.382,93	74,61 %	8.660,21	75,33
Energía de la bomba P1	5.191,46	50 %	4.330,10	50 %
Energía de la bomba P2	5.191,46	50 %	4.330,10	50 %
Energía natural	3.533,30	25,36 %	2.836,89	24,67
Energía total consumida	13.916,22		11.497,09	
Energía entregada a los hidrantes	5.891,16	42,33 %	4.101,58	35,67
Energía mínima requerida				83,69 %
Energía topográfica	3.432,59	58,27 %	3.432,59	
Energía de exceso	1.623,76	27,56 %	570,109	13,9 %
Energía de exceso	834,805	14,17 %	99,093	2,42 %
Energía disipada por fricción	517,093	3,72 %	312,037	2,71
Energía disipada en las válvulas	1.625,00	11,68 %	3.859,68	33,57
Energía perdida a través de fugas	3.385,68	24,33 %	1.059,49	9,22
Energía perdida en las bombas	2.497,28	17,95 %	2.164,31	18,82
Energía perdida en la bomba P1	1.248,64	50 %	1.082,15	50 %
Energía perdida en la bomba P2	1.248,64	50 %	1.082,15	50 %
Mejora respecto al inicial			17,34%	

Con la medida implementada, los resultados de la auditoría energética se ven alterados y reducidos, por un lado el balance de caudales varía con respecto a la situación inicial en la que el rendimiento volumétrico del sistema ($V_{consumido}/V_{inyectado}$) era del 67%, en la situación de mejora con la reducción de las presiones el rendimiento aumenta a un 82,73%, con una reducción del volumen fugado diario de más de 6.389 m³.

Esta reducción del volumen fugado está directamente relacionada con la reducción de la energía que se pierde por fugas y la que se pierde en fricción en las tuberías, ambas se reducen prácticamente a la mitad (60% la energía por fricción y 31% la energía perdida en fugas), a cambio se disipa más energía en las válvulas que son las responsables de reducir la presión, la presión media en la red ha disminuido a 36,8 mca de los 57 mca iniciales.

A pesar del aumento de la energía disipada en las reductoras de presión (más del doble), el balance global es positivo, pues la energía que se inyecta en el sistema ha sufrido una reducción del 17,34%. Esta reducción de la energía aportada está relacionada con la reducción del caudal

que por un lado debe bombear el grupo de presión, y por otro, al que se inyecta desde el embalse.

Pese a la mejora mostrada, el problema principal del sistema, la variedad de puntos de funcionamiento, se mantiene. La bomba se ve obligada a trabajar entregando mucha más presión de la requerida por los hidrantes y en una gran variedad de puntos de funcionamiento, por lo que aunque las válvulas disminuyen la presión no evitan que previamente ésta se haya suministrado.

6.4.3. Medidas OP1: Operar en el BEP

Con el fin de evitar la variedad de puntos de funcionamiento del grupo de presión, se distribuye el volumen total consumido por cada uno de los hidrantes a lo largo del día en diferentes periodos, es decir se programa la demanda de los hidrantes. De esta forma el volumen total diario obtenido por cada hidrante será igual al inicial pero únicamente funcionará unas horas determinadas, siendo mayor la demanda puntual por los hidrantes (pues concentran todo el volumen requerido en menos horas) pero fija y siempre igual.

Si se programan los turnos se logra evitar el principal problema de la instalación dado que ahora la bomba únicamente deberá trabajar en tres puntos de funcionamiento diferentes.

Se establecen, por tanto, tres turnos de ocho horas (Figura 6-20). La selección de la agrupación de turnos se ha hecho atendiendo a las cotas del sistema y por tanto a los requerimientos de altura mínima en cada zona.

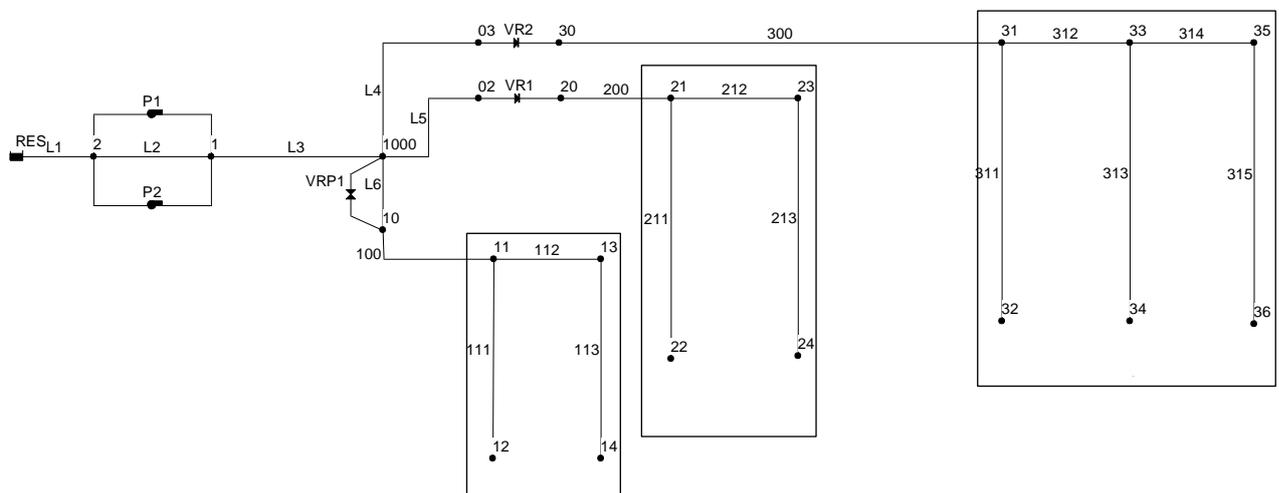


Figura 6-20: Esquema de la red del sistema inicial.

Tal cual se ha dicho la curva de consigna se ha visto reducida a tres puntos. Sin cambiar las bombas (pues se trata de medidas operacionales y por tanto no se recurre a la instalación o

sustitución de nuevos elementos), a la vista de la gráfica siguiente se observa claramente la nueva relación existente entre la curva característica de la asociación de bombas y la nueva curva de consigna. Tanto esta curva de consigna como la anterior tienen en cuenta la cota disponible de aspiración (40 metros), por tanto lo que se muestra es directamente la altura requerida por las bombas.

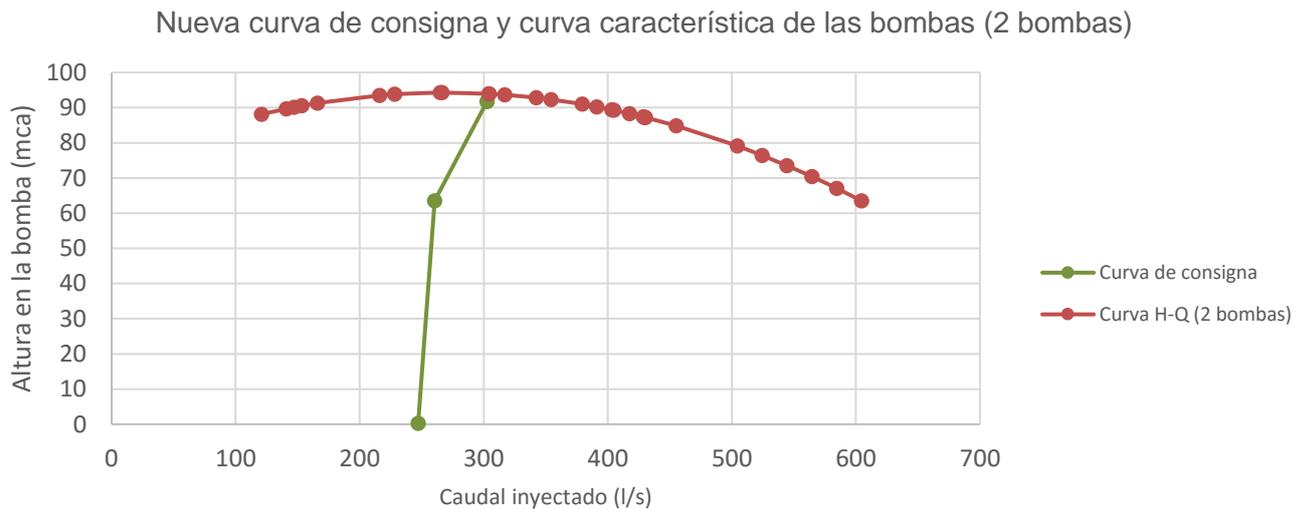


Figura 6-21: Curva de consigna frente a la curva característica del grupo de presión.

Se mantiene el mismo funcionamiento en el grupo de presión, a pesar de que a la vista de la gráfica anterior se observa que para satisfacer el primer punto de exigencia del sistema, sería posible prescindir de las bombas. De esta forma los resultados obtenidos (Tabla 6-12) son consecuencia únicamente de reducir los distintos puntos de funcionamiento del sistema. Con el mismo objetivo se han eliminado las VRP del supuesto anterior.

Tabla 6-12: Auditoría energética tras aplicar la medida OP1 (kWh/día)

	SISTEMA INICIAL	OP3-OP4. REDUCCIÓN DE LA PRESIÓN	OP1. ACOTAR EL PUNTO DE FUNCIONAMIENTO (RIEGO PROGRAMADO)	
Energía total aportada	13.916,22	11.497,09	10.705,08	
Energía aportada por las bombas	10.382,93	8.660,21	8.066,79	75,35 %
Energía de la bomba P1	5.191,46	4.330,10	4.033,39	50 %
Energía de la bomba P2	5.191,46	4.330,10	4.033,39	50 %
Energía natural	3.533,30	2.836,89	2.638,29	24,65 %
Energía total consumida	13.916,22	11.497,09	10.705,07	

Energía entregada a los hidrantes	5.891,16	4.101,58	5.064,30	47,31 %
Energía mínima requerida	3.432,59	3.432,59	3.443,31	67,99 %
Energía topográfica	1.623,76	570,109	1.348,55	26,63 %
Energía de exceso	834,805	99,093	272,438	5,38 %
Energía disipada por fricción	517,093	312,037	1.565,30	14,62 %
Energía disipada en las válvulas	1.625,00	3.859,68	1.489,89	13,92 %
Energía perdida a través de las fugas	3.385,68	1.059,49	707,269	6,61 %
Energía perdida en las bombas	2.497,28	2.164,31	1.878,32	17,55 %
Energía perdida en la bomba P1	1.248,64	1.082,15	939,162	50 %
Energía perdida en la bomba P2	1.248,64	1.082,15	939,162	50 %
Mejora respecto al inicial		17,34%	23,07 %	

La medida acometida ha logrado por un lado reducir las fugas con respecto al sistema inicial, aumentando el rendimiento volumétrico a un valor de 89%. Por otro lado, la reducción de la energía consumida en el sistema se ha reducido un 23% con respecto al original. Esta reducción se debe principalmente a trabajar con presiones más homogéneas, la presión media en la red ha descendido a 32 mca, lo que supone la reducción del volumen fugado, y por tanto de la energía perdida en fugas. A diferencia del caso anterior, la energía por fricción en las tuberías se ha incrementado, pues el caudal puntual que circula por las tuberías es mayor. Toda la demanda de los hidrantes se concentra en 8 horas (inicialmente estaba distribuido en 24 horas), por tanto la fricción aumenta a pesar de la reducción del caudal fugado, pues aumenta considerablemente el caudal demandado en cada hora. Al eliminar dos de las válvulas reductoras, la energía disipada en éstas lógicamente también se ve disminuida.

La principal reducción de energía se da en las bombas. La siguiente gráfica muestra la principal razón, ahora éstas sólo funcionan en tres puntos de funcionamiento, mientras que inicialmente trabajaban con caudales mucho más bajos y alturas mayores en algunos instantes del día, y con caudales mucho más altos y presiones menores, en otros instantes. La incorporación i de VRP (primera medida) lo único que hace es desplazar la curva hacia la zona de caudales menores (menor caudal fugado), pero a cambio las bombas proporcionan más presión que luego debe ser disipada en las válvulas.

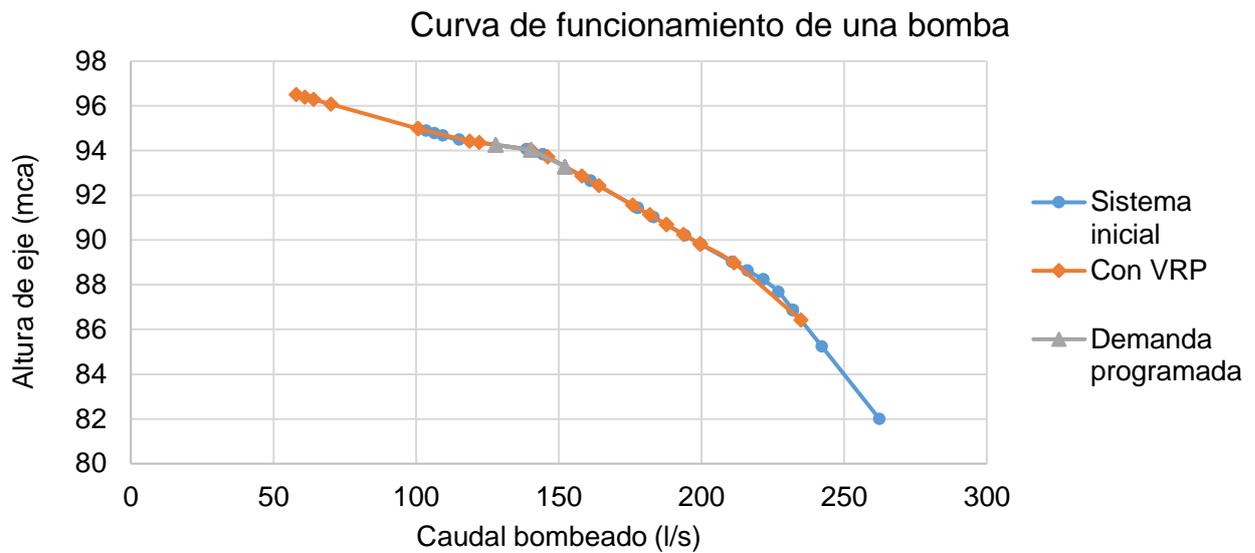


Figura 6-22: Curva de funcionamiento en los tres sistemas de una bomba.

Siendo la reducción de energía consumida por las bombas un 22,31 % menor que en el sistema inicial, el consecuente ahorro económico podría ser mucho mayor si se realizara un estudio en profundidad de la mejor selección de turnos, evitando las horas punta de la tarifa eléctrica (esto supondría reducir las horas de riego aumentando el caudal demandado para cada hora).

6.4.4. Medida OP2: Evitar excedentes de energía

Revisando la comparación de la curva de consigna con el riego programado y el funcionamiento del grupo se observa como claramente las bombas están inyectando más presión de la necesaria, por tanto aunque luego esta presión se disipe en las válvulas o por fricción de las tuberías, previamente ha sido introducida. Por tanto, la mejor solución para evitar esta sobrepresión es regular el sistema de presión, según los tres estados distintos de la red (riego para cada sector). Esta regulación es posible dado que el sistema queda sectorizado según los turnos de riego que coinciden además con las zonas de similares cotas.

La regulación del sistema es el siguiente:

Tabla 6-13: Regulación del grupo de presión

	Turno 1 (0-8h)	Turno 2 (8-16h)	Turno 3 (16-24h)
Bomba 1	Parada	(260,68 l/s; 63,97 mca) $\alpha=91,5\%$	(152,14 l/s; 93,28 mca)
Bomba 2	Parada	Parada	(152,14 l/s; 93,28 mca)

Con la regulación propuesta, los nuevos resultados de la auditoría energética son:

Tabla 6-14: Auditoría energética tras aplicar la medida OP2 (kWh/día)

	SISTEMA INICIAL	OP3-OP4. REDUCCIÓN DE LA PRESIÓN	OP1. ACOTAR EL PUNTO DE FTO. (RIEGO PROGRAMADO)	OP2. EVITAR EXCEDENTES DE ENERGÍA (REGULACIÓN GRUPO)	
Energía total aportada	13.916,22	11.497,09	10.705,08	7.584,94	
Energía aportada por las bombas	10.382,93	8.660,21	8.066,79	5.036,12	66,4 %
Energía de la bomba P1	5.191,46	4.330,10	4.033,39	3.617,71	71,84 %
Energía de la bomba P2	5.191,46	4.330,10	4.033,39	1.418,41	28,16 %
Energía natural	3.533,30	2.836,89	2.638,29	2.548,82	33,6 %
Energía total consumida	13.916,22	11.497,09	10.705,07	7.584,94	
Energía entregada a los hidrantes	5.891,16	4.101,58	5.064,30	4.204,34	55,43 %
Energía mínima requerida	3.432,59	3.432,59	3.443,31	3.443,31	81,9 %
Energía topográfica	1.623,76	570,109	1.348,55	604,093	14,37 %
Energía de exceso	834,805	99,093	272,438	158,155	3,76 %
Energía disipada por fricción	517,093	312,037	1.565,30	1.427,58	18,82 %
Energía disipada en válvulas	1.625,00	3.859,68	1.489,89	0	0 %
Energía perdida en fugas	3.385,68	1.059,49	707,269	452,897	5,97 %
Energía perdida en bombas	2.497,28	2.164,31	1.878,32	1.500,12	19,78 %
Energía perdida en la bomba P1	1.248,64	1.082,15	939,162	1.195,38	79,69 %
Energía perdida en la bomba P2	1.248,64	1.082,15	939,162	304,734	20,31 %
Mejora respecto al inicial		17,34%	23,07 %	45,50 %	

Por un lado, de nuevo se reduce el volumen fugado, aumentando su rendimiento a un nuevo valor de 92%, debido principalmente al ajuste sufrido de las presiones, que ahora tiene un valor medio para toda la red de 16,1 mca, mucho más cercano a la presión mínima requerida para el correcto funcionamiento de los hidrantes.

En cuanto a las energías consumidas, la energía perdida en las fugas ha descendido en más de un 86% con respecto a la original, pues la presión tal cual se ha dicho se ha ido reduciendo desde una valor de 57 mca a 16,1 mca, teniendo en cuenta que ahora la energía de exceso sólo representa el 3,76% de la energía entregada a los hidrantes (energía útil). Esta energía de exceso es consecuencia de que la presión en el nudo más desfavorable se encuentre por encima de la presión de referencia. El valor de este exceso de energía sería mayor si se considerara en

el cálculo el nudo crítico de cada sector (370,22 kWh), que representaría un 8,81 % del total de energía útil (siendo la energía útil la misma, se considere la suma de cada sector o el sistema global).

La energía por fricción, aunque inferior al caso anterior (antes de regular el sistema de bombeo), sigue siendo muy superior a la energía perdida por fricción inicialmente, esto se debe a que los diámetros iniciales de las tuberías no estaban dimensionados para concentrar la demanda total diaria de cada sector en sólo un tercio del día. Este hecho se convierte en la limitación hidráulica principal (otra cuestión es lo que el cultivo o el suelo tolere) para un ajuste más fino de los turnos de riego en los que se evite en la medida de lo posible la puesta en marcha de las bombas durante las horas punta del día.

Cabe destacar que el mayor ahorro de energía con respecto al sistema anterior (no al inicial) se debe al consumo de las bombas. Éstas no se han sustituido, siguen funcionando con la misma curva característica y la misma curva de rendimiento, el principal cambio reside en los puntos de funcionamiento actuales. El total de la energía consumida en las bombas con respecto al escenario anterior es del 62,4%, parte de esta reducción se debe al aumento del rendimiento porque éstas funcionan más cercanas a rendimientos más elevados (20%) pero principalmente se debe a que la energía útil aportada por las bombas (altura y caudal) es menor (43%).

La siguiente gráfica (Figura 6-23) permite visualizar los cambios tanto en los requerimientos de la instalación entre el riego a la demanda y el riego programado, como la adaptación del grupo de presión a medida que se han ido añadiendo soluciones.

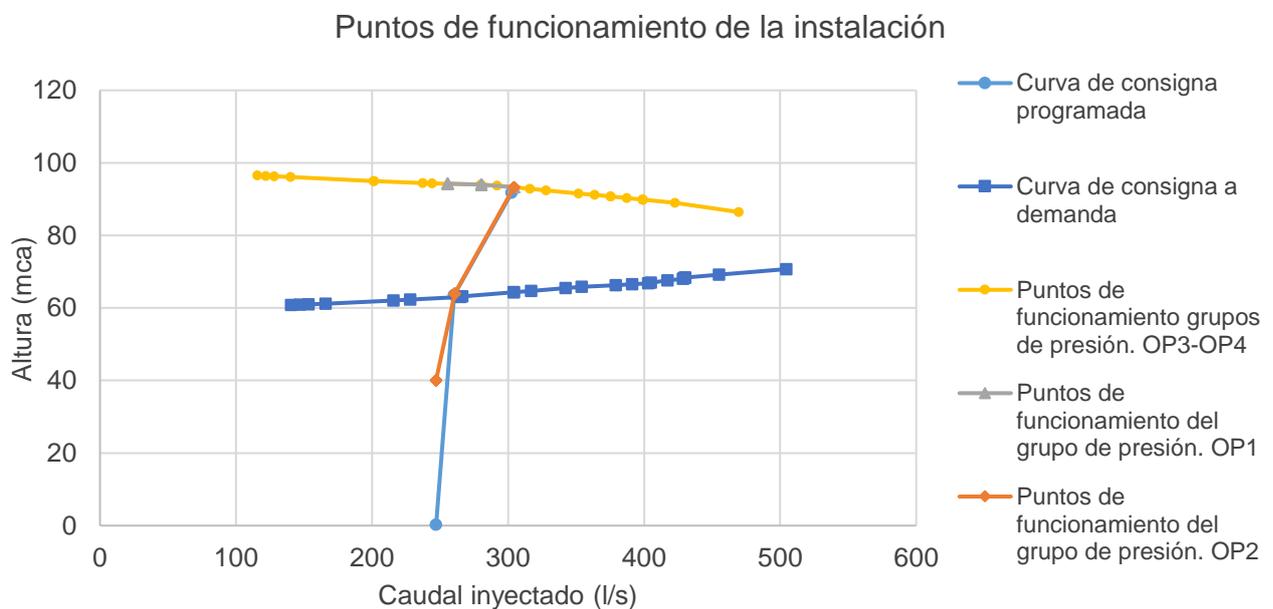


Figura 6-23: Puntos de funcionamiento de la instalación y del grupo de presión.

6.4.5. Medida EST1: Recurrir a bombas más eficientes

El rendimiento medio de los grupos de presión, es el correspondiente a una bomba que está funcionando en puntos para los que no fue seleccionada, a pesar de eso los rendimientos son elevados (70,21%). Una de las primeras medidas estructurales pasa por aumentar la eficiencia de los grupos por la sustitución de otros con mayores rendimientos óptimos.

Para simular esta situación, sin modificar los grupos se ha elevado su curva de rendimiento, de forma que trabajando en los mismos puntos de funcionamiento, ahora la energía perdida por las bombas (consecuencia de los rendimientos hidráulicos de los grupos) será menor.

En este caso, los resultados de la auditoría son idénticos a los anteriores (Figura 6-20), exceptuando claro está la energía perdida y en consecuencia la consumida por las bombas. La energía útil entregada por éstas es igual pues los puntos de funcionamiento en cuanto a caudal y altura son idénticos (mismo punto de curva característica), la única diferencia reside en una nueva hipotética curva de rendimiento mejorada.

Tabla 6-15: Auditoría energética tras aplicar la medida EST1 (kWh/día)

	SISTEMA INICIAL	OP3-OP4. REDUCCIÓN DE LA PRESIÓN	OP1. ACOTAR EL PUNTO DE FTO. (RIEGO PROGRAMADO)	OP2. EVITAR EXCEDENTES DE ENERGÍA (REGULACIÓN GRUPO)	EST1. BOMBAS MÁS EFICIENTES (AUMENTO DEL RENDIMIENTO)
Energía total aportada	13.916,22	11.497,09	10.705,08	7.584,94	6.859,86
Energía aportada por las bombas	10.382,93	8.660,21	8.066,79	5.036,12	4.311,03
Energía de la bomba P1	5.191,46	4.330,10	4.033,39	3.617,71	3.019,99
Energía de la bomba P2	5.191,46	4.330,10	4.033,39	1.418,41	1.291,04
Energía natural	3.533,30	2.836,89	2.638,29	2.548,82	2.548,82
Energía total consumida	13.916,22	11.497,09	10.705,07	7.584,94	6.859,85
Energía entregada a los hidrantes	5.891,16	4.101,58	5.064,30	4.204,34	4.204,34
Energía mínima requerida	3.432,59	3.432,59	3.443,31	3.443,31	3.443,31
Energía topográfica	1.623,76	570,109	1.348,55	604,093	604,063
Energía de exceso	834,805	99,093	272,438	158,155	158,157
Energía disipada por fricción	517,093	312,037	1.565,30	1.427,58	1.427,58

Energía disipada en las válvulas	1.625,00	3.859,68	1.489,89	0	0
Energía perdida en fugas	3.385,68	1.059,49	707,269	452,897	452,897
Energía perdida en las bombas	2.497,28	2.164,31	1.878,32	1.500,12	775,034
Energía perdida en P1	1.248,64	1.082,15	939,162	1.195,38	597,672
Energía perdida en P2	1.248,64	1.082,15	939,162	304,734	177,362
Mejora respecto al inicial		17,34%	23,07 %	45,50 %	50,71 %

La mejora con respecto a la energía consumida total del sistema inicial es del 45,50 %, mientras que la reducción de la energía consumida por las bombas entre ambos sistemas es del 58,48 %. Esta mejora se debe, tal cual se ha dicho únicamente al aumento del rendimiento hidráulico de las bombas, pasando de un rendimiento medio para ambas de 70,21% a un nuevo rendimiento medio de 83,23%.

En cualquier caso, la sustitución de unas bombas por otras más eficientes únicamente ha supuesto, en este caso concreto, una mejora del 5,21 %. Una variación muy inferior al resto de mejoras operacionales propuestas y que en principio requerirían de una inversión menor.

6.4.6. Medida EST3: Reducción de energía por fricción por cambio de diámetros

La primera medida operacional realizada ha supuesto la reducción de la energía perdida por fricción al reducir el caudal fugado, mediante el control de la presión por medio válvulas reductoras de presión. La reducción del caudal fugado con cada medida acometida ha supuesto una reducción en la energía por fricción, pero el hecho de agrupar las demandas (riego programado) supone caudales punta más estables pero mayores. Caudales circulantes para los que la red no estaba diseñada, por este motivo las altas pérdidas de cargas unitarias han supuesto mayores pérdidas de energía por fricción a pesar de la reducción del caudal fugado.

La última de las medidas acometidas en este ejemplo, agrupada dentro de las medidas estructurales consiste en la sustitución de aquellos diámetros de tubería que supongan mayores pérdidas unitarias. Teniendo en cuenta un nada despreciable valor medio de las pérdidas unitarias una vez programada la demanda de 10,4 mca/km, el objetivo de esta medida es sustituir algunos diámetros de forma que la pérdida media de fricción en las tuberías descienda a 5,2 mca/km.

Con esta medida, la auditoría energética final resulta, aplicadas todas las medidas comentadas, tal como se muestra en la Tabla 6-16:

Tabla 6-16: Auditoría energética tras aplicar la medida EST3 (kWh/día)

	SISTEMA INICIAL	OP3-OP4. REDUCCIÓN DE LA PRESIÓN	OP1. ACOTAR EL PUNTO DE FTO. (RIEGO PROGRAMADO)	OP2. EVITAR EXCEDENTES DE ENERGÍA (REGULACIÓN GRUPO)	EST1. BOMBAS MÁS EFICIENTES (AUMENTO DEL RENDIMIENTO)	EST3. DISMINUCIÓN DE LA FRICCIÓN (CAMBIO DIÁMETROS)
Energía total aportada	13.916,22	11.497,09	10.705,08	7.584,94	6.859,86	5.801,59
Energía aportada por las bombas	10.382,93	8.660,21	8.066,79	5.036,12	4.311,03	3.282,02
Energía de la bomba P1	5.191,46	4.330,10	4.033,39	3.617,71	3.019,99	2.196,67
Energía de la bomba P2	5.191,46	4.330,10	4.033,39	1.418,41	1.291,04	1.085,35
Energía natural	3.533,30	2.836,89	2.638,29	2.548,82	2.548,82	2.519,57
Energía total consumida	13.916,22	11.497,09	10.705,07	7.584,94	6.859,85	5.801,59
Energía entregada a los hidrantes	5.891,16	4.101,58	5.064,30	4.204,34	4.204,34	4.133,84
Energía mínima requerida	3.432,59	3.432,59	3.443,31	3.443,31	3.443,31	3.443,31
Energía topográfica	1.623,76	570,109	1.348,55	604,093	604,063	572,962
Energía de exceso	834,805	99,093	272,438	158,155	158,157	117,565
Energía disipada por fricción	517,093	312,037	1.565,30	1.427,58	1.427,58	672,724
Energía disipada en las válvulas	1.625,00	3.859,68	1.489,89	0	0	0
Energía perdida en fugas	3.385,68	1.059,49	707,269	452,897	452,897	354,331
Energía perdida en las bombas	2.497,28	2.164,31	1.878,32	1.500,12	775,034	640,696
Energía perdida en P1	1.248,64	1.082,15	939,162	1.195,38	597,672	499,226
Energía perdida en P2	1.248,64	1.082,15	939,162	304,734	177,362	141,47
Mejora respecto al inicial		17,34%	23,07 %	45,50 %	50,71 %	58,31%

Esta última medida supone una mejora con respecto al sistema inicial del 58,31%, reducción consecuencia de la disminución de la energía perdida por fricción a prácticamente la mitad. Esa reducción se refleja en un aporte de energía menor, dado que al existir menores pérdidas de carga, la altura en cabecera requerida es menor y por tanto la potencia entregada por las bombas también lo es.

La consecución de las medidas aplicadas supone una reducción en la energía consumida y por tanto aportada al sistema de más del 58%. Es destacable, que para este ejemplo concreto y tal como ya se ha comentado en puntos anteriores, las medidas que suponen un mayor ahorro energético y en consecuencia económico son aquéllas que a priori no requieren grandes inversiones (medidas operacionales), como es la regulación de los grupos de presión.

Las dos medidas estructurales aplicadas en este ejemplo, la sustitución de las bombas por otras de mayor eficiencia y la sustitución de las tuberías por otras de mayor diámetro, han supuesto únicamente un ahorro del 13% frente al 45% consecuencia de la aplicación de medidas operacionales, como la distribución de la demanda, o la regulación del grupo de presión existente por medio de un variador de frecuencia y la puesta en marcha y parada de las bombas.

6.5. Conclusiones

Existen una gran cantidad de estrategias que pueden contribuir a la reducción del consumo de energía en los sistemas de agua a presión y al aumento de su eficiencia. Las fases de diagnóstico y auditorías ayudarán a determinar los puntos débiles del sistema, con el objetivo de escoger la estrategia que mejor se adapte al problema detectado.

Se han presentado ampliamente a lo largo de este capítulo ocho medidas concretas, agrupadas en medidas operacionales y medidas estructurales. Las dos primeras, operar el sistema en su punto de funcionamiento óptimo y evitar cualquier excedente de energía, con una frontera entre ellas difícil de delimitar. Pues están directamente relacionadas. Para evitar el exceso de presión suele ser necesaria una regulación del grupo de bombeo. Por otro lado la tercera medida propone reducir al mínimo las fugas, pues como se ha insistido a lo largo de todo este trabajo, reducir las fugas implica reducir la energía que se pierde con ellas. Por último de entre las medidas operacionales, reducir las pérdidas por fricción que de nuevo está estrechamente ligada a la reducción de las fugas, pues se reduce el caudal circulante por las tuberías y por tanto la fricción que en ellas se da.

Las medidas estructurales propuestas, requieren la sustitución de los elementos existentes en la red y por tanto una inversión mayor que las estrategias anteriores. Se propone entre ellas, utilizar bombas más eficientes. Se ha resumido de forma muy general las principales ineficiencias que se pueden dar en los grupos de presión, lo que permitirá determinar la conveniencia de realizar su sustitución por grupos nuevos y por tanto más eficientes. La segunda medida propuesta es la reducción de energía topográfica por medio de VRPs o la recuperación de ésta utilizando PATs. Por último, dos medidas relacionadas con los viejos diseños de los sistemas de abastecimiento, y que insisten en la necesidad de estudiar la conveniencia de eliminar los elementos que suponen la despresurización de la red, bien sea los aljibes domiciliarios o los depósitos de rotura de carga. Estas medidas, posiblemente más complejas desde el punto de vista técnico, pueden suponer ahorros importantes tal como se ha demostrado en el caso práctico real.

Aunque el ejemplo que aquí se ha comentado es un caso ficticio creado y desarrollado para mostrar los posibles ahorros energéticos asociados a las medidas comentadas a lo largo de este capítulo, los diferentes casos que se han ido comentando a lo largo de cada medida ponen de manifiesto las bondades de las mejoras propuestas. El estudio en detalle de casos prácticos reales y la comparación de los estados iniciales con los finales permitirán crear una base de datos de herramientas reales, útiles y al alcance de cualquier abastecimiento o comunidad de regantes.

Todas las medidas propuestas requieren de un análisis coste- beneficio, sólo aquellas cuya relación inversión/ahorro suponga un periodo de recuperación razonable, serán susceptibles de ser ejecutadas. El tiempo de recuperación, dependerá en muchos casos de lo que el propio abastecimiento (urbano o de riego) considere que es razonable, en las compañías privadas, por ejemplo, dependerá del tiempo de concesión establecido con el municipio.

Capítulo 7

Conclusiones y desarrollos futuros

7.1. Introducción

Con el paso del tiempo la necesidad de mover agua a presión ha ido en aumento. De una parte, los usuarios requieren agua de calidad en sus hogares y de otra los sistemas de riego necesitan mejorar la eficiencia en el consumo de agua a la hora de regar. Todo ha favorecido el uso de los sistemas de agua a presión. Estos sistemas permiten además de mayor flexibilidad en el suministro, un control mayor de la calidad del agua, más seguridad, menor impacto ambiental y, tal cual se ha dicho, son, desde la óptica hídrica, más eficientes que el transporte de agua por gravedad. El lado negativo, es la enorme cantidad de energía que requieren los sistemas de agua a presión, pues lo que antes circulaba por gravedad ahora requiere aporte de energía, lo que supone un impacto económico negativo para los abastecimientos (la energía consumida es un coste) y un impacto ambiental (el consumo de energía genera emisiones de GEI).

Una de las principales causas del cambio climático es la actividad humana. Los cambios recientes del clima han tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales. El calentamiento del sistema climático es inequívoco, la atmósfera y el océano se han calentado, las cantidades de nieve y hielo han disminuido, y el nivel del mar se ha elevado. Las emisiones de gases de efecto invernadero antropogénico han aumentado sin parar, impulsadas en gran medida por el crecimiento económico de la población y ahora son más altas que nunca. Los efectos de estas emisiones causadas por la actividad humana, junto con las de otros conductores antropogénicos, se han detectado en todo el sistema climático. Entre estas emisiones, el hecho de que las personas tengan agua de calidad disponible en el grifo de su casa, y la necesidad de que sea tratada para devolverla al medio natural una vez que ha sido utilizada, son procesos que contribuyen al calentamiento global. Las empresas de agua deben ser conscientes de esta realidad y trabajar para disminuir las emisiones que su actividad conlleva.

Pero independientemente de la posible contribución de las empresas de agua a las emisiones de GEI, lo que sí es indiscutible es que la disponibilidad de agua está muy ligada a las consecuencias del cambio climático. En las últimas décadas, los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y a través de los océanos.

La clave para abordar soluciones a problemas tan complejos es hacerlo con un enfoque multidisciplinar y transversal, que incluya análisis económicos, ambientales y sociales. Hoy en día este enfoque es aún más necesario porque las posibles soluciones deben incluir estos tres ejes (económico, ambiental y social) que definen la sostenibilidad y que de algún modo, tienen intereses contrapuestos. El ambiental defiende el medio natural, lo que exige ser eficiente (detracer los recursos mínimos), y depurar. Y para ello hay que invertir y, después, operar, lo que se transmite al eje económico. Y por supuesto, como nadie debe ignorar el derecho del hombre al agua y al saneamiento, así lo reconoce Naciones Unidas, este eje social también tiene intereses contrapuestos con los otros dos, pues los ciudadanos todavía son muy reacios a asumir todos los costes del agua. La sostenibilidad global trata de compatibilizar las tres ópticas porque todas son relevantes y ninguna de ellas debe prevalecer sobre las otras.

Es crucial, por tanto, minimizar los impactos negativos del transporte de agua a presión, lo que requiere el estudio y la mejora de la eficiencia de estos sistemas, y siempre desde una perspectiva global. Para lograr este objetivo, conviene disponer de un protocolo de actuación que sea aplicable a cualquier sistema, independientemente de su uso (riego o urbano) y sea cuál sea su topografía (redes planas o muy irregulares).

El protocolo que se propone establece una serie de pasos hacia la eficiencia, partiendo del conocimiento y la evaluación del sistema en cuestión, pues lo que no se conoce no puede ser mejorado. Concluye con la propuesta de alternativas de mejora y el análisis coste-beneficio de todas ellas.

7.2. Proceso de mejora de la eficiencia energética de una red a presión

Se propone evaluar la energía suministrada al sistema a partir de la energía necesaria en el nudo más desfavorable, ya que proporcionar más energía (más presión) de la que se requiere en este punto es una pérdida absurda. Cuando este exceso de presión es una consecuencia de la topografía del terreno, en teoría se puede recuperar. Por otra parte, la gestión de la demanda dirigida a reducir el consumo de agua es la mejor estrategia posible de ahorro de energía, pues las fugas son una doble pérdida, no sólo por la energía embebida en el agua fugada, sino también porque las fugas implican un aumento del caudal circulante por la red, lo que aumenta las pérdidas por fricción.

Esta nueva visión global que busca una solución hidráulica óptima con los mínimos costes de inversión y bajo consumo energético, representa un cambio radical en la forma de concebir el diseño de redes, pues se trata de minimizar al máximo la energía topográfica y por tanto la optimización del conjunto. Sólo con esta visión se puede obtener una perspectiva global del sistema.

El primer paso hacia el aumento de la eficiencia de una red de agua a presión es evaluar su margen de mejora. Está dentro del alcance de los abastecimientos y las comunidades de regantes el aumento de la eficiencia hídrica y energética de sus sistemas con inversiones modestas en las que la relación coste-beneficio es generalmente alta. Esta falta de conocimiento del problema, puede ser fácilmente resuelta con un proceso de diagnóstico simple que permita al gestor, con muy pocos datos de partida, diagnosticar el estado actual de su red y poder compararlo con el mejor estado que ésta podría alcanzar.

El objetivo de este trabajo es definir un proceso de mejora de la eficiencia que pueda ser estandarizado y convertirse en una metodología a seguir por cualquier suministro de agua, independientemente de su uso. La metodología propuesta se divide en cuatro etapas: diagnóstico, análisis del sistema (auditorías), evaluación de acciones, y toma de decisiones (análisis coste-beneficio). Todas las fases se encuentran divididas en dos vertientes: la energía requerida y la topográfica. Este proceso, ilustrado en la Figura 7-1, se ha descrito de forma detallada en cada uno de los capítulos presentados en este trabajo. A continuación se sintetiza el alcance de cada una de estas etapas.

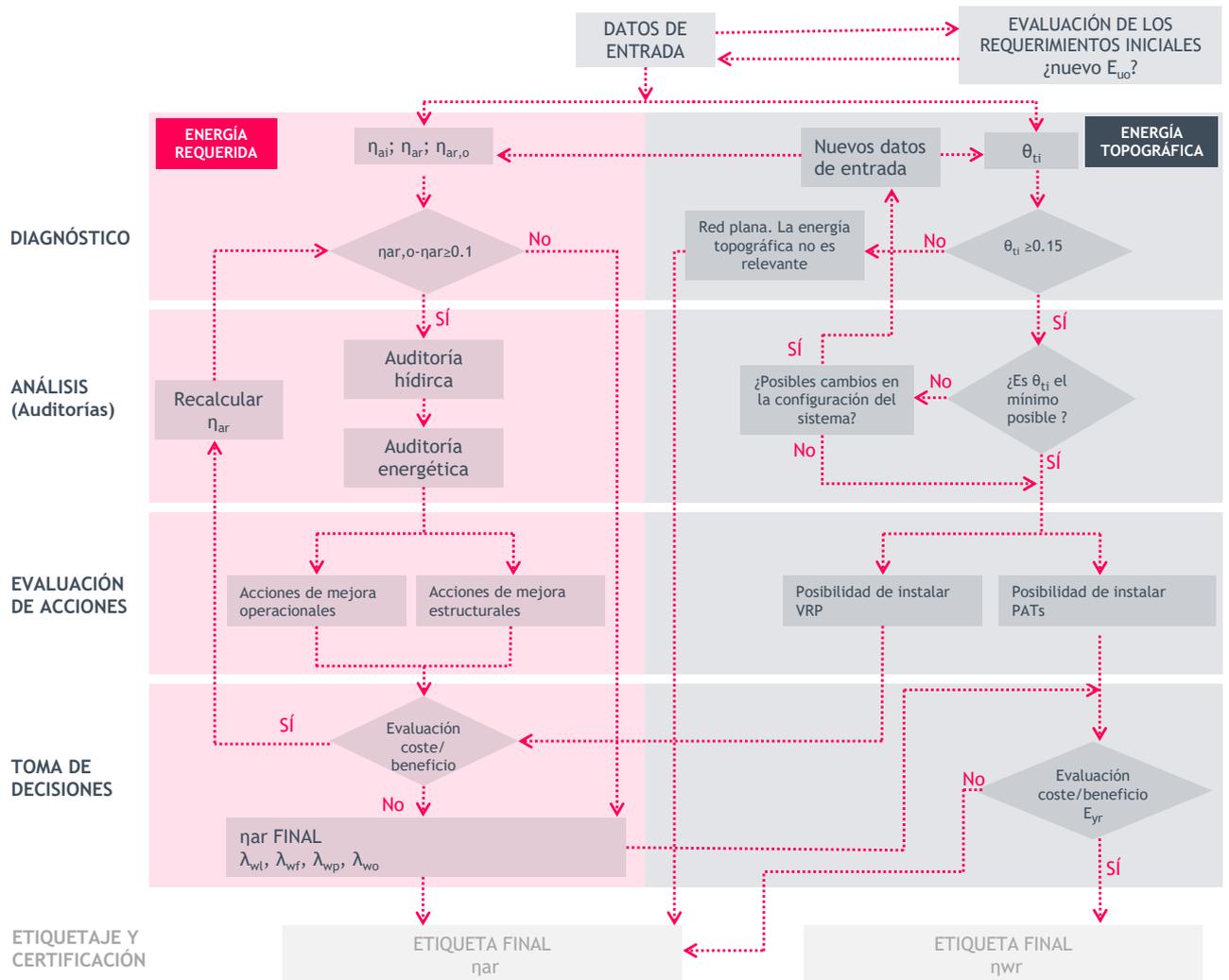


Figura 7-1: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

7.2.1. Fase de diagnóstico energético

Se trata del diagnóstico del sistema en su conjunto y no sólo de una parte del mismo (por ejemplo, la estación de bombeo). Mejorar los rendimientos de las bombas siempre ha sido importante, y cada vez está más presente debido principalmente al constante aumento de los costes de energía, pero lo que se plantea en este trabajo es un enfoque global del sistema.

El punto de partida es establecer métricas objetivas que proporcionen una visión global de la eficiencia del sistema y, sobre todo, de los márgenes de mejora existentes en cada sistema concreto. El primer paso para mejorar la eficiencia es ser consciente de que existen márgenes de mejora. La falta de consciencia es un impedimento clave y puede resolverse si se plantea una metodología simple y precisa de diagnóstico. Tal como se ha comentado, realizar la auditoría energética de una red no es un proceso sencillo ni rápido, además si se desea que los resultados obtenidos sean válidos, se requiere de un conocimiento exhaustivo de la red, una auditoría

hídrica previa y en muchos casos disponer de un modelo matemático calibrado del sistema. Un proceso complejo y laborioso que ni mucho menos está al alcance de todas las comunidades de regantes ni tan siquiera de todas las compañías de agua (públicas o privadas). Así pues, lo que se plantea es una primera fase previa a la evaluación en profundidad del sistema, un diagnóstico. El objetivo de éste es proporcionar información al gestor de la situación actual de su sistema comparándolo con el mejor estado posible de éste. Es decir, una valoración objetiva de su margen de mejora con todas las particularidades que éste tiene. Y por otro lado, ayudar a priorizar actuaciones de mejora.

El diagnóstico propuesto (cuyos fundamentos se describen en el Capítulo 3) propone un indicador global para todo el sistema. De hecho, se trata de una simple relación entre la energía mínima requerida, E_{uo} (embebida en el agua que se suministra a los usuarios) y la energía consumida, $E_{sr,p}$; suma de la energía aportada por la bomba (conocida a partir de las facturas eléctricas) y la energía gravitacional $E_{sr,n}$ (o natural). Este rendimiento global real, η_{ar} , puede compararse con un rendimiento ideal η_{ai} , con el mismo numerador, E_{uo} , siendo el denominador la energía ideal mínima requerida por el sistema E_{si} , (correspondiente a un sistema sin ningún tipo de pérdidas).

Por tanto, como valor de referencia inicial se establece el concepto de energía ideal, que ignora todas las posibles pérdidas, ya sean por fugas, por fricción o por ineficiencias de los grupos de presión. Este valor se convierte en referencia para el sistema, pues es ideal. El indicador de rendimiento ideal representa el valor más alto posible de la eficiencia energética, que nunca podría llegar a alcanzarse ya que ha sido obtenido en condiciones ideales. Este valor está condicionado por el valor de la energía topográfica ideal, un concepto de la energía asociada a las irregularidades del terreno, que cuantifica directamente la eficiencia del layout de la red, pues estudia la configuración actual, condicionado por los nudos más desfavorables. En función del porcentaje de energía topográfica, se debe explorar la posibilidad de disminuirlo, para lo cual se requiere una modificación de la configuración del sistema.

El siguiente paso es examinar la energía real que se está suministrando al sistema. La diferencia entre ambos rendimientos ($\eta_{ai} - \eta_{ar}$) es el teórico margen de mejora de la red, ya que cuantifica la diferencia entre el sistema real y el sistema ideal.

Sin embargo, como se ha comentado, la situación ideal es inalcanzable, por lo tanto esa diferencia jamás podrá salvarse. En otras palabras, el valor más alto de la eficiencia energética real no puede ser la eficiencia ideal, η_{ai} , sino un nuevo valor, $\eta_{ar,o}$, que contemple a partir de la situación ideal las posibles pérdidas razonables que pueden asumirse (fricción, fugas, bombas y otros). Una vez estimado este valor del rendimiento objetivo, la diferencia entre éste y el rendimiento real dará una mejor aproximación del margen de mejora existente en el sistema concreto con las características propias que posee. No se trata de comparar el estado actual del sistema cuantificado por η_{ar} con la unidad como suele hacerse, sino con el máximo alcanzable por ese sistema (la mejor versión de sí mismo) pues no es lo mismo un sistema que deba

suministrar, al mismo tiempo, a usuarios muy altos y muy bajos que una red prácticamente plana. Por supuesto la primera requerirá más energía, pero no por ello tiene que ser ineficiente.

7.2.2. Fase de análisis (auditorías)

Si la diferencia entre $\eta_{ar,o}$ y η_{ar} es pequeña, se puede suponer que el sistema es eficiente en términos de energía y no es necesario entrar en la etapa de análisis. Si la diferencia entre ambos rendimientos es considerable, significa que existe margen de mejora desde el punto de vista energético, entonces se debe acometer primero la auditoría hídrica y a continuación la auditoría energética (ambas ampliamente detalladas en el Capítulo 4). Éstas permitirán poner cifras concretas a las ineficiencias, la clave para abordar la siguiente etapa.

La fase de análisis es imprescindible para definir las estrategias de mejora. Se requiere saber dónde se está perdiendo energía para acometer directamente las mejoras que puedan suponer un aumento más significativo de la eficiencia. Se propone para esta etapa la elaboración del modelo matemático de la red, si bien éste es imprescindible para la obtención de la auditoría energética (tal como está planteada), los beneficios de contar con un modelo calibrado son innumerables, pues permiten no sólo conocer en profundidad el estado actual de la red, sino además valorar y cuantificar las mejoras propuestas. No se trata de estimar o suponer cómo se verá afectada la red ante un cambio, sino de verificar que este cambio permitirá seguir suministrando agua en las condiciones de calidad requeridas (presión y caudal).

Para realizar estos análisis se requiere disponer de una herramienta, tan potente y extendida como es el software EPANET, que permita conocer de forma rápida y fiable el valor y el destino de la energía consumida por el sistema. Dado que este software se ha quedado obsoleto en el análisis energético de las redes de agua a presión, se establece como prioridad disponer de una herramienta que con el robusto cálculo hidráulico de EPANET permita obtener un análisis energético del sistema.

7.2.3. Fase de evaluación de acciones. Definición de estrategias de mejora

Las auditorías realizadas permiten identificar las partes con un superior margen de mejora (cuantificando las pérdidas de energía debidas a fugas, fricción, estaciones de bombeo u otros). A partir de esta etapa se pueden conocer las medidas más adecuadas para mejorar la eficiencia. Éstas estarán dirigidas a maximizar los beneficios y minimizar los costes. Se pueden contemplar medidas operacionales o estructurales. Las intervenciones operacionales son aquéllas que no requieren apenas inversión, y que pueden mejorar la eficiencia del sistema mediante el ajuste de los puntos de operación. La estrategia más común dentro de este grupo sería la modificación del punto de funcionamiento de las bombas, tanto para los casos urbanos, como para riego. Por otro lado, las medidas estructurales implican cambios importantes en el sistema, tales como la instalación de nuevas bombas o la sustitución de tuberías. El objetivo es valorar las acciones

más convenientes, teniendo en cuenta los resultados de las auditorías e identificar qué medidas son las más interesantes, en términos de energía ahorrada y coste, para cada sistema específico. Se han desarrollado ampliamente en el Capítulo 6, ocho medidas de mejora concretas. Cuatro medidas operacionales y cuatro medidas estructurales.

- OP1. Operar el sistema en su punto de funcionamiento óptimo (BEP, *Best Efficient Point*)
- OP2. Evitar cualquier excedente de energía
- OP3. Reducir al mínimo las fugas
- OP4. Minimizar las pérdidas por fricción

El segundo grupo de las medidas de mejora de la eficiencia consiste en las denominadas medidas estructurales. Son aquéllas que requieren de sustitución, implementación o construcción de elementos nuevos en los sistemas. Es decir, previsiblemente suponen una inversión inicial mayor que las propuestas operacionales. Algunas de las estrategias que se han clasificado como medidas operacionales se podrían también englobar en este grupo:

- EST1: Utilizar bombas más eficientes
- EST2: Recuperar o reducir la energía topográfica
- EST3: Mejorar viejos diseños de distribución y suministro
- EST4: Evitar las pérdidas no incluidas en los apartados anteriores

Existen más estrategias de mejora, tantas como sistemas diferentes puedan existir, además de posibles combinaciones entre ellas.

7.2.4. Fase de toma de decisiones

En la etapa anterior se han definido una serie de medidas que pueden ser implementadas para mejorar la eficiencia del sistema. Para decidir qué medida conviene llevar a cabo se requiere acometer un análisis coste-beneficio en base a la comparación de ahorro de energía (y consiguiente ahorro económico) y coste de implementación. Para ello es imprescindible contemplar los diferentes costes del agua, de la energía (usada y generada, en el caso de energía potencialmente recuperable) y los diferentes costes ambientales, lo que permitirá estimar el impacto de las medidas propuestas en materia de eficiencia.

7.3. Resultados directos de la tesis

Se ha desarrollado una metodología estructurada y sólida que permite recorriendo cuatro etapas mejorar la eficiencia de los sistemas de agua a presión. Para completar cada una de las fases que forman el proceso de mejora se han desarrollado, y puesto a punto, una serie de herramientas que permiten calcular los resultados que corresponden a cada etapa. Partiendo del diagnóstico que permite obtener una visión global (herramienta EAGLE), seguida de la fase de auditorías, tanto hídrica (ITAFugas) como energética (ITAEnergy). Una vez evaluado el sistema,

y con los resultados de las auditorías, las mejoras propuestas (tanto operacionales como estructurales) permiten abordar casi cualquier circunstancia que se haya detectado en las fases previas.

Por tanto, entre los logros alcanzados con el presente trabajo se destaca el desarrollo de una herramienta que permite a los técnicos de los suministros de agua, tanto urbanos como de riego, diagnosticar el estado de sus sistemas de agua a presión. Una herramienta basada en la nueva métrica desarrollada en este trabajo y publicada en el *Journal Water Resources Planning and Management* (Cabrera et al., 2014). La presente Tesis doctoral ha permitido su creación y programación, así como el desarrollo de su interfaz, manejabilidad, presentación de resultados y al fin y al cabo todo lo que engloba la programación y desarrollo de un software.

Junto con esta herramienta, la elaboración del presente estudio también ha permitido la puesta a punto de otro software implicado directamente en el proceso de mejora planteado, aquél que permite a partir del modelo matemático de la red en EPANET realizar su auditoría energética, o lo que es lo mismo, conocer el destino final de la energía consumida en la red. Si bien, esta herramienta, ITAEnergy, ya estaba en fase de desarrollo, este trabajo ha permitido completarla añadiendo entre otras muchas cuestiones el cálculo de indicadores adicionales como la energía topográfica real o la energía de exceso real. Estos dos nuevos conceptos energéticos permiten conocer de entre toda la energía útil, es decir aquélla que se entrega a los usuarios en forma de presión y de caudal, cuánta es estrictamente necesaria, cuánta se entrega en exceso por la topografía de la red y cuánta se entrega demás por el tipo de suministro escogido. Las bases teóricas de este software se explican en el Capítulo 4, y su manual de uso reducido se adjunta en el Anexo 3. Este software surge por la necesidad de completar el software EPANET cuyas debilidades desde el punto de vista energético han sido publicadas en el *Water Science & Technology: Water Supply* (Gómez et al., 2015b).

Una tercera herramienta relacionada con este trabajo se ha puesto a disposición de las compañías de agua a lo largo del periodo de desarrollo de la presente Tesis, ECAM. Una herramienta que permite a las empresas tanto de abastecimiento como de saneamiento, conocer su contribución a la generación de gases de efecto invernadero, y estudiar cómo pueden contribuir a la mitigación de éste. Dentro del marco del presente trabajo se ha desarrollado, por un lado la metodología y los indicadores de la etapa de distribución de agua, y por otro lado la programación íntegra y el diseño de la herramienta. La descripción tanto de las bases científicas como las principales características de la herramienta se han desarrollado en profundidad en el Capítulo 2.

Y lo que es sin duda más importante. Todo este protocolo se ha aplicado a redes reales, habiéndose obtenido reducciones energéticas (en kWh/año) superiores al 50% y reducciones de potencia punta demandada del 40%, lo que finalmente se ha traducido en una reducción superior al 60% de la factura de energía que se estaba abonando. Una síntesis de estos resultados se ha presentado tanto en el Capítulo 3 como en el Capítulo 6. Por ello, y utilizando la terminología que

ha establecido la Unión Europea en el marco del programa H2020, el protocolo establecido estaría comprendido entre un TRL 7 (*Technology readiness level*) y TRL 8. Cabe recordar la definición de cada uno de ellos. En concreto el TRL 7: *System prototype demonstration in operational environment* mientras el TRL8 se define como TRL 8: *System complete and qualified*". Tras esta tesis se está en condiciones de alcanzar el último escalón de los nueve definidos (TRL 9: *Actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)*),

7.4. Desarrollos futuros

Establecida la metodología se requiere la aplicación de ésta desde el principio hasta el final en casos de estudio reales, es decir, y de acuerdo con lo ya dicho, situar el protocolo en su máximo nivel (TRL9). Esto permitirá por un lado verificar la bondad de cada una de las fases establecidas, y por otro detectar posibles mejoras tanto en las bases como en las herramientas. Tras haberse contrastado en tres sistemas de riego, este proceso de aplicación de la metodología se está llevando a cabo en la actualidad en cuatro abastecimientos de diferentes características, desde sistemas prácticamente planos a sistemas con más de un 60% de energía topográfica, es decir con grandes desniveles. Del mismo modo, estos abastecimientos son muy dispares en cuanto al conocimiento de la red, uno de ellos apenas cuenta con datos de medición (ni de caudales ni de presiones), dispone de un modelo de la red muy aproximado y posee una regulación prácticamente manual a criterio del técnico. En el extremo opuesto otro de los abastecimientos, cuenta con un sistema muy sectorizado, un control detallado de los caudales que circulan por cada sector, sistemas de tele medida y control de sus elementos y conocimiento detallado y registrado del sistema. No es de extrañar que el primero de ellos posea rendimientos volumétricos en torno al 60%.

El estudio de estos cuatro abastecimientos reales permitirá, por tanto, valorar la idoneidad de la metodología, pues se comparará la situación actual (año 2015) con la futura situación una vez acometidas las mejoras (previsiblemente año 2017). El ahorro en la energía, el coste energético y el agua inyectada verificarán la validez del proceso de mejora por un lado y de las mejoras propuestas por otro.

Queda pendiente la última fase del proceso presentado, se trata de la fase de etiquetaje y certificación, igual que un electrodoméstico o un edificio dispone de una etiqueta de certificación energética que verifica su eficiencia, los sistemas de agua a presión también pueden aspirar a ese etiquetaje que permita a las empresas concesionarias de los suministros, así como a los ciudadanos, conocer si su sistema de agua es muy eficiente (A) o por el contrario el uso que hace de ambos recursos (agua y energía) es inadecuado (G). Este último punto, requiere la experiencia de todos los agentes implicados: investigadores, empresas de agua (sea como sea su concesión), fabricantes de bombas, de turbinas, de válvulas, etc. (un fabricante de bombas

sabe hasta dónde puede mejorar su rendimiento), y al fin y al cabo, todos los implicados en la gestión y explotación de un sistema de agua a presión. Se considera muy ambicioso, además de pretencioso, afirmar cuando un sistema es adecuado y cuando no lo es, a partir de una única opinión. Tal cual se ha dicho, se requiere de un grupo multidisciplinar que cubra todas las ópticas de la sostenibilidad. Además el grupo de decisión debería ser internacional, pues se deben contemplar las diferentes normativas y situaciones habituales de las distintas regiones. Este sistema de calificación, con posterior certificación, sería la brillante culminación de este protocolo y se abordará tan pronto las circunstancias lo permitan.

Si se pretende, además, que cualquier abastecimiento pueda aplicar la metodología propuesta, se debe simplificar al máximo posible sin perder la rigurosidad del método. Para ello se requiere no tanto de conceptos simples sino de herramientas simples que permitan a cualquier sistema, sea cual sea la tecnificación de sus gestores, aplicarlas y obtener conclusiones válidas. Para ello, se precisa una única herramienta completa y compacta que parta de los datos básicos del sistema y permita por un lado evaluar el estado actual de la red, y por otro que aporte soluciones (a modo de *toolbox*) que previamente a su implementación los técnicos puedan valorar. Es decir, que permita modelar la solución sobre el sistema actual para verificar que los requisitos de calidad siguen cumpliéndose, y que aporte directamente a partir de una base actualizada de precios, el coste de la medida a implementar y el beneficio en unidades monetarias de ésta. De esta forma cualquier abastecimiento de manera independiente podrá mejorar su sistema. Crear no sólo las herramientas, sino la base de datos para cuantificar las posibles mejoras, requiere de nuevo de la unión de diferentes agentes, por supuesto investigadores expertos en la materia, pero por otro de la experiencia de los abastecimientos y de los límites conocidos por los propios fabricantes. La única forma de llegar al mejor estado posible es a través de sinergias.

Resta ahondar en algunas estrategias comentadas que disminuyan los requerimientos iniciales, como la posibilidad de reutilización de aguas grises. La metodología propuesta establece la energía mínima requerida por los usuarios (resultado de multiplicar el volumen demandado a la presión de servicio), E_{uo} , como punto de partida. El objetivo final de todo el proceso es suministrar esta energía de la manera más eficiente posible. Pero existen maneras de reducir E_{uo} , por ejemplo mediante la instalación de goteos que requieran presiones de servicio más bajas, la reducción de la demanda mediante la instalación de dispositivos de bajo consumo o el suministro de agua con diferentes niveles de presión. Incluso el uso de agua de lluvia puede ser una manera de reducir E_{uo} . Por tanto el primer paso, es verificar que el punto de partida es el óptimo antes de comenzar a proponer soluciones y mejoras. Y si no lo es, lo primero es reducirlo.

Por último habrá que seguir profundizando en uno de los asuntos que ha abierto por vez primera esta Tesis, y que posiblemente sea el concepto más novedoso de este trabajo. Se trata de la energía topográfica y su potencial recuperación. Hasta el momento se ha venido disipando con Válvulas Reductoras de Presión que no piden nuevos aportes de energía externa (consumen la topográfica) pero que mejoran el balance energético global porque disminuyendo las fugas se

ahorra la energía en ellas embebidas así como la fricción adicional que en su discurrir por la tubería generan. Este asunto, que está siendo seguido con mucha atención por la comunidad científica internacional, se trata de manera desacoplada de la eficiencia global del sistema transporte de agua a presión. Este protocolo quedará completo cuando este análisis, tal cual se incluye en el diagrama general de flujo, se integre de manera natural dentro del proceso.

7.5. Conclusión

El presente trabajo pretende ser un punto de partida y al mismo tiempo una recopilación de cada uno de los aspectos y estrategias que conducen a las redes de transporte de agua a ser más eficientes. La reducción de la energía consumida por los sistemas, la reducción del caudal inyectado en las redes, y por tanto la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero deben convertirse en la prioridad de los sistemas de abastecimiento de agua, independientemente de cuál sea el destino del agua, urbana o de riego.

Con la actualización de las tecnologías y de los procesos de gestión de las compañías de agua en sistemas más eficientes energéticamente, así como la recuperación de energía y de nutrientes en las aguas residuales, hay excelentes oportunidades para la mejora del balance de carbono en las empresas de agua. Por lo tanto el sector del agua tiene una magnífica oportunidad de contribuir a mitigar el cambio climático.

Las inversiones en eficiencia energética de los sistemas de agua urbana pueden ser extremadamente rentables. Bien planeadas, estas inversiones tienen tiempos de amortización de sólo unos pocos años. Afrontar el reto de la eficiencia genera un doble beneficio: reduce los costes de operación al mismo tiempo que se reduce la huella de carbono. Las empresas de agua deben ser conscientes de esta realidad y trabajar para disminuir las emisiones debidas a su servicio, lo que equivale a reducir la cantidad de energía que requiere que sus abonados tengan un servicio de calidad. Todos los estudios y herramientas que puedan facilitar el camino a la optimización del trinomio agua-energía-cambio climático deben ser una prioridad de los investigadores del sector del agua.

ANEXOS

Anexo 1

La herramienta EAGLE

A1.1 La herramienta EAGLE

EAGLE (Energy Assessment of Global Pressurized Water System) es una herramienta sencilla que va a permitir realizar el diagnóstico energético de una red de distribución de agua a presión de riego o urbana. Se trata de un archivo de MS Excel que ofrece, a partir de la introducción de los datos básicos del sistema, los resultados del diagnóstico energético, resultados que facilitarán la toma de decisiones encaminadas a mejorar la eficiencia energética de la red de agua potable o de riego.

Los fundamentos físicos e hidráulicos de EAGLE se han expuesto en el capítulo precedente de este documento. A continuación se describe de forma general el funcionamiento de la herramienta, pero no los fundamentos teóricos que la sustentan. A los posible interesados en averiguar el por qué de los cálculos, se les recomienda recurran al capítulo anterior para comprender al análisis que a continuación se describe.

A1.2 Estructura de la herramienta

La estructura definida en EAGLE es secuencial, esto es que requiere seguir un orden en la instrucción de los datos y en la evaluación de los resultados, si bien por comodidad la herramienta permite navegar sin restricciones entre las diferentes etapas con el objetivo que su manejo sea más sencillo.

El proceso a seguir para la evaluación del sistema coincide con cada una de las hojas que componen EAGLE. Esto es:



Figura A1-1: Estructura de EAGLE

A continuación se detalla cada una de las etapas u hojas de la herramienta.

A1.2.1 Tipología

El primer paso es seleccionar qué tipología es la que más se adapta al sistema a analizar de entre las tipologías disponibles. Las opciones están divididas entre sistemas complejos (con varios puntos de entrega de agua) y sistemas simples (un único punto de entrega de agua). Los sistemas simples son tuberías que conectan dos puntos, bien por gravedad o bien por medio de un grupo de presión. En cuanto a los sistemas complejos (redes de distribución) existe la posibilidad de seleccionar entre cuatro sistemas tipo.

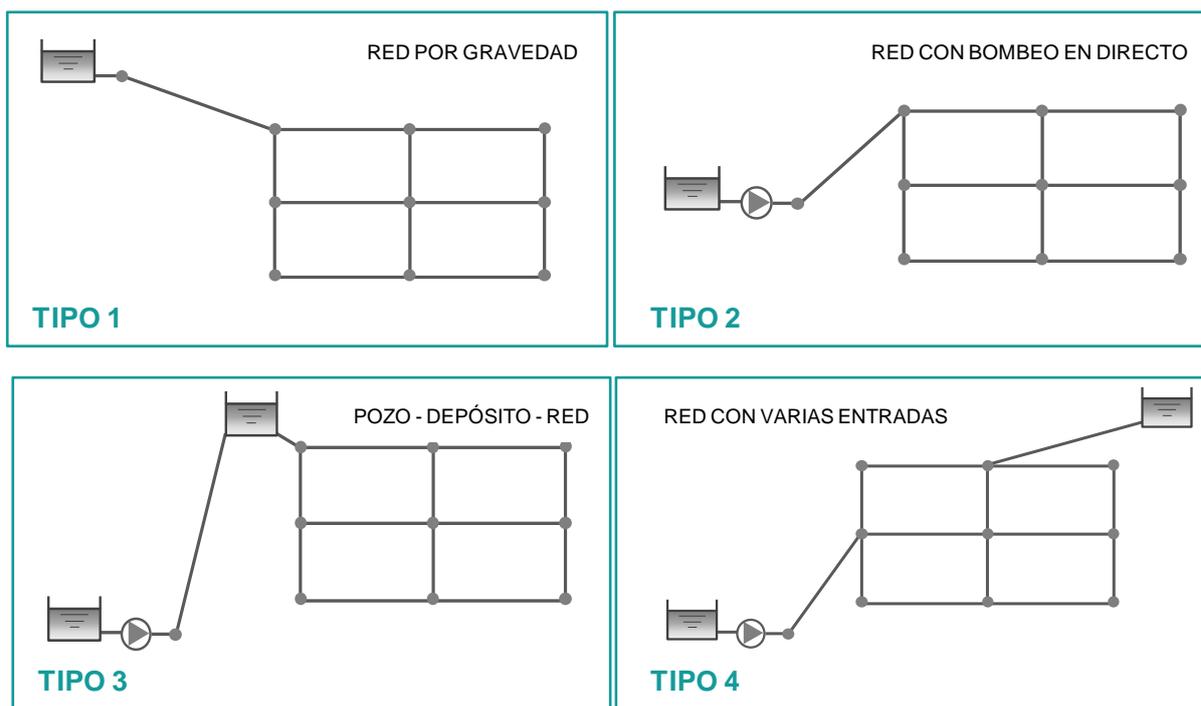


Figura A1-2: Tipologías básicas disponibles para el análisis de redes

Dependiendo de la tipología se habilitarán unas etapas u otras y los datos a introducir también variarán en función del tipo de sistema elegido. De forma muy general las características principales de cada tipología son:

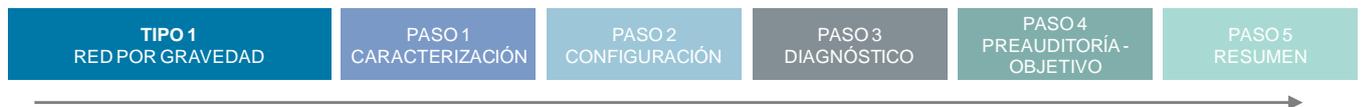
TIPO 1: RED POR GRAVEDAD

Este sistema cuenta con un único punto de inyección de agua que se encuentra a una altura mayor que la altura requerida en cualquier punto de la red. Desde éste se abastece a todo el sistema por gravedad.

Consideraciones

- La altura del punto de inyección de agua debe ser superior a la cota del punto más alto de la red más la presión de servicio.
- No existen grupos de presión.

Itinerario disponible



TIPO 2: RED CON BOMBEO EN DIRECTO

Este sistema cuenta con un único punto de inyección de agua que se encuentra a una altura menor que la altura requerida en la red. Desde éste se abastece a todo el sistema por medio de uno o varios grupos de presión directamente a la red (no existe depósito a la entrada de la red).

Consideraciones

- Se requiere conocer la cota del punto de aspiración de la bomba.
- Para cada una de las bombas se introducirán como mínimo los datos de volumen, altura aportada y energía consumida.
- No existe depósito en cabecera, la bomba suministra a la red en directo.

Itinerario disponible



TIPO 3: POZO – DEPÓSITO - RED

Este sistema cuenta con un único punto de inyección de agua que se encuentra a una altura menor que la altura requerida en la red. Desde éste se abastece a todo el sistema por medio de uno o varios grupos de presión que bombean a un depósito en cabecera y desde éste se suministra por gravedad al sistema.

Consideraciones

- Se requiere conocer la cota del punto de aspiración de la bomba.
- Para cada una de las bombas se introducirán como mínimo los datos de volumen, altura aportada y energía consumida.
- Existe depósito en cabecera que se llena por medio del grupo de presión y desde el cual se abastece por gravedad a toda la red. Se requiere conocer su altura (que debe ser igual o superior a la altura mínima requerida por la red)
- El Tipo 2 y el Tipo 3, sólo difieren en la existencia o no del depósito.

Itinerario disponible



TIPO 4: RED CON VARIAS ENTRADAS

Este sistema cuenta con varios puntos de inyección de agua. Desde todos ellos se suministra a la red. No es posible descomponer el sistema en varios volúmenes de control independientes dado que cada fuente no suministra a un sector independiente.

Cada una de las fuentes puede suministrar por gravedad al sistema o por medio de un grupo de presión que a su vez puede suministrar en directo a la red o a un depósito previo a la red.

Consideraciones

- Se requiere conocer el volumen inyectado desde cada fuente de suministro.
- Para cada una de las bombas se introducirán como mínimo los datos de volumen, altura aportada y energía consumida.
- En el caso de existir algún depósito de entrada al sistema se debe conocer su altura.
- Existen ciertas configuraciones que la herramienta no es capaz de analizar (como sistemas en serie por escalones de presión). En el caso de analizar este tipo de sistemas los resultados obtenidos sólo son válidos de forma global.

Itinerario disponible



A1.2.2 Caracterización

En esta etapa, común a todas las tipologías, se introducen una serie de propiedades o variables del sistema que permiten caracterizarlo de forma general. Si bien no son requisito para realizar el diagnóstico energético, aportan una primera visión del estado de la red.

Periodo de análisis: Se puede seleccionar entre *año*, *trimestre* y *mes*. La unidad seleccionada del periodo de análisis condicionará el resto de unidades de los datos a introducir o de los valores obtenidos. Por ejemplo si se selecciona año el volumen inyectado deberá introducirse en m³/año y los resultados energéticos se obtendrán en kWh/año, si el periodo seleccionado fuera trimestre o mes, las unidades de volumen y energía serían m³/trimestre y kWh /trimestre o m³/mes y kWh/mes, respectivamente. Es importante seleccionar el periodo que mejor se adapte a los datos disponibles tanto de volumen como de energía facturada por la compañía eléctrica para evitar tener que realizar cálculos fuera de la herramienta.

Tipo de abastecimiento: Es posible analizar sistemas *urbanos* o de *riego*. El diagnóstico y los datos solicitados para realizarlo serán idénticos en ambos casos. Solo varían algunos datos de la caracterización del sistema, por ejemplo:

Urbano: Es posible introducir datos como el número de *habitantes*, de *abonados* y de *acometidas*, y los *km* totales de red. Estos datos no influyen en el análisis energético pero junto con el dato de volumen inyectado dan una visión general del sistema, por ejemplo permiten calcular la dotación por habitante o las pérdidas de agua por km de red, valores que aportan una visión previa del estado del sistema independientemente de cómo sea la red o el gasto energético.

Riego: En el caso de tratarse de una red de riego, es posible introducir datos como la *superficie* a regar, el número de *hidrantes*, los *km* totales de red y el *tipo de cultivo*. Estos datos junto con el dato de volumen inyectado permiten calcular la dotación por hectárea o las pérdidas de agua por km de red.

Volumen inyectado: Se trata de un dato fundamental e imprescindible. Es el volumen total introducido en el sistema desde todos los puntos de inyección. Este dato influirá en todos los cálculos y análisis posteriores, tanto hídricos (cálculo de pérdidas de agua) como energéticos (rendimientos reales del sistema). Se trata de un valor que cualquier abastecimiento debe conocer, y es que no tiene sentido tratar de realizar un análisis energético del estado del sistema para detectar mejoras, si ni siquiera se dispone de un contador a la entrada del sistema.

CARACTERIZACIÓN			
Período de análisis		<input type="text" value="AÑO"/>	
Tipo de abastecimiento		<input type="text" value="RIEGO"/>	
Datos básicos del sistema de riego	Superficie	<input type="text"/>	hectáreas
	Hidrantes	<input type="text"/>	hidrantes
	km de red	<input type="text"/>	km
	Tipo de cultivo	<input type="text" value="Cítricos"/> <ul style="list-style-type: none"> Cereales para grano Maiz y sorgo Hortalizas Frutales no cítricos Arroz Vid 	
Volumen inyectado		<input type="text"/>	m3 / año
Dotacion		<input type="text"/>	m3 / ha / año
Factor de emisión (mix eléctrico)		<input type="text"/>	kg CO2 / kWh

Figura A1-3: Hoja de Caracterización

A1.2.3 Configuración

Los datos necesarios para realizar el diagnóstico dependen en gran medida del grado de detalle de los datos disponibles, dado que el método permite realizar una serie de simplificaciones en las ecuaciones planteadas sin que las conclusiones obtenidas se alteren significativamente. En cualquier caso, cuanto mayor sea el grado de detalle, más exactos serán los resultados obtenidos, sin perder de vista que EAGLE es una herramienta de diagnóstico cuyo objetivo es aportar una visión global pero cuantificable del estado del sistema desde el punto de vista energético. Destacar por último, que lógicamente los resultados y conclusiones obtenidas del análisis son función de los datos de partida introducidos, por lo que si éstos son incorrectos también lo será el diagnóstico.

Es en la hoja de *Configuración* dónde se deben introducir todos los datos que caracterizan la red. Este tipo de datos, engloban cuestiones como las **cotas** de los nudos de la red, el **volumen registrado** y las elevaciones de los puntos característicos del sistema. Son los datos referentes a

la configuración del sistema los que pueden suponer mayor problema a la hora de disponer de ellos, es por esto que aquí se establecen tres niveles de detalle.

Esta hoja está claramente diferenciada en dos secciones. La parte inferior dónde se introducen los datos de la red (cotas, demandas y presión de servicio), y la parte superior donde se resumen los datos de la red introducidos, y se introducen las cotas de los puntos que no forman parte de los nudos de consumo (depósito, cota de aspiración) y se calculan los indicadores de pérdidas.

Los tres niveles de detalle que se pueden seleccionar son:

CONFIGURACIÓN

<div style="background-color: #D9D9D9; padding: 10px; border: 1px solid #D9D9D9; text-align: center; font-weight: bold;">Disponibilidad de Datos</div>	<input checked="" type="radio"/>	1. Cotas y demandas de los nudos de consumo
	<input type="radio"/>	2. Cota de cada nudo de consumo
	<input type="radio"/>	3. Sólo cotas extremas

Figura A1-4: Selección Disponibilidad de Datos. Hoja de Configuración

Se conocen cotas y demandas de los nudos de consumo (nivel máximo de detalle)

Esto implica que se conoce en cada uno de los puntos de consumo (esto puede ser cada uno de los hidrantes, sector de hidrantes, ubicación de contador, sector, conjunto de usuarios, acometida, etc.) el volumen consumido (registrado) y la cota a la que se encuentra.

Si se selecciona esta *Disponibilidad de Datos* el primer paso es introducir el *Número de nudos de consumo*. Según el número de nudos definido se habilitará una tabla con tantas filas como nudos se vayan a introducir. Independientemente de la Disponibilidad de Datos seleccionada, se debe introducir el valor de la *Presión mínima de servicio*. Esta presión (expresada en mca) es la presión mínima que se debe garantizar en todos los nudos de consumo (por normativa municipal o garantía de suministro). Si bien lo común es que se exija el mismo valor en toda la red es posible que existan algunos consumidores o zonas que no requieran la misma presión. Es posible introducir una presión de servicio diferente para los nudos.

Por tanto los datos que se deben introducir en el caso de seleccionar el mayor grado de detalle son:

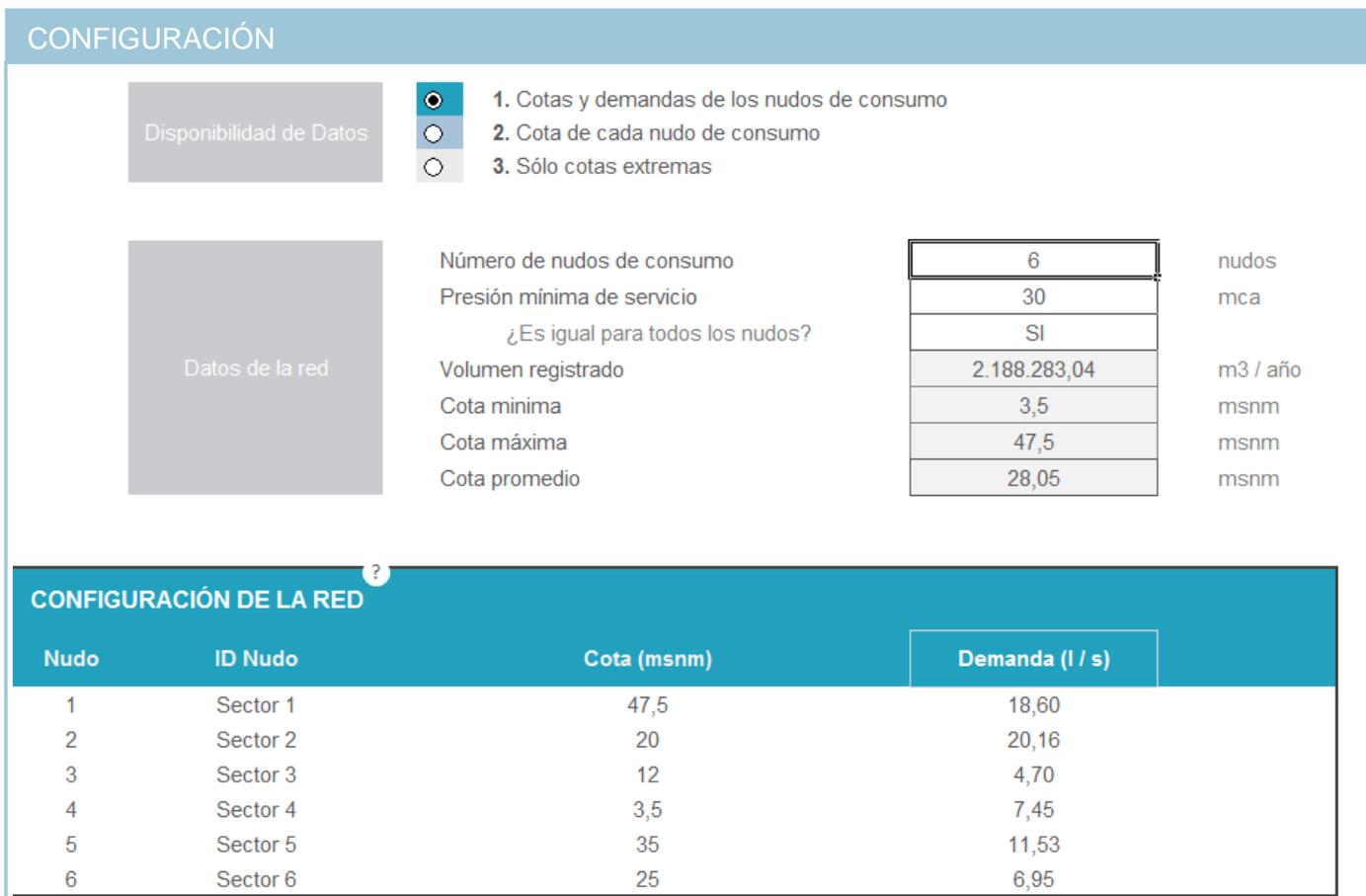


Figura A1-5: Tabla de datos de Configuración para la selección 1. Cotas y demandas de los nudos de consumo

El *Volumen registrado* será la suma de todas las demandas de los nudos. Es posible introducir la *Demanda* de los nudos en las unidades que el abastecimiento las tengas disponibles (l/s; m³/año; m³/trimestre; m³/mes). La herramienta calculará de forma automática a partir de los datos de los nudos introducidos el *Volumen registrado* total, la *Cota mínima*, la *Cota máxima*, y la *Cota promedio* (cota promedio ponderada con el consumo)

Se conocen cotas de los nudos de consumo y la demanda total (nivel medio de detalle)

En este caso también se conoce la distribución de cotas de los puntos de la red, pero no la cantidad de volumen que se consume en cada punto. Se conoce únicamente el volumen total consumido por todos los puntos. En este caso, el volumen total se distribuirá por igual entre todos los nudos definidos.

CONFIGURACIÓN

Disponibilidad de Datos

- 1. Cotas y demandas de los nudos de consumo
- 2. Cota de cada nudo de consumo
- 3. Sólo cotas extremas

Datos de la red

Número de nudos de consumo

Presión mínima de servicio

¿Es igual para todos los nudos?

Volumen registrado

Cota mínima

Cota máxima

Cota promedio

6	nudos
30	mca
SI	
2.188.283,04	m3 / año
3,5	msnm
47,5	msnm
23,83	msnm

CONFIGURACIÓN DE LA RED ?

Nudo	ID Nudo	Cota (msnm)
1	Sector 1	47,5
2	Sector 2	20
3	Sector 3	12
4	Sector 4	3,5
5	Sector 5	35
6	Sector 6	25

Figura A1-6: Tabla de datos de Configuración para la selección 2. Cota de cada nudo de consumo

En este caso sólo se puede introducir la cota de cada uno de los nudos de consumo. También es posible elegir la opción de definir diferentes presiones de servicio. Se introduce el volumen total demandado de todos los nudos en la celda correspondiente de *Volumen registrado* (ahora esta celda se encuentra en color blanco y es editable). En este caso la herramienta también calculará automáticamente la *Cota mínima*, la *Cota máxima*, y la *Cota promedio* (como media aritmética de todas las cotas de los nudos).

Se conocen sólo cotas extremas y demanda total (nivel mínimo de detalle)

Se corresponde con los mínimos datos que se pueden conocer. Únicamente la cota del punto más bajo de la red y del punto más alto, se desconoce la distribución de cotas en la red. De nuevo, únicamente se sabe el volumen total que se registra en el sistema, pero no cómo se distribuye en la red. En este caso se asume toda la red a un único punto de cota promedio que consume el total del volumen.

CONFIGURACIÓN			
Disponibilidad de Datos	<input checked="" type="radio"/>	1. Cotas y demandas de los nudos de consumo	
	<input type="radio"/>	2. Cota de cada nudo de consumo	
	<input checked="" type="radio"/>	3. Sólo cotas extremas	
Datos de la red	Presión mínima de servicio	30	mca
	¿Es igual para todos los nudos?	SI	
	Volumen registrado	2.188.280,00	m3 / año
	Cota mínima	10	msnm
	Cota máxima	47,5	msnm
	Cota promedio	30,00	msnm

Figura A1-7: Tabla de datos de Configuración para la selección 3. Sólo cotas extremas

En este caso, se debe introducir la cota del punto promedio de la red, que se puede definir como la media entre el nudo más alto y el más bajo en el caso que se considere una distribución de demandas homogéneas o se puede estimar en el caso de existir una demanda más centralizada en alguna cota de la red (centro de masas de la red).

CONFIGURACIÓN			
Volúmenes	Volumen inyectado	3.100.000,00	m3 / año
	Volumen registrado	2.188.280,00	m3 / año
Pérdidas de agua	Pérdidas de agua por longitud	0,4163	m ³ / km / h
	Pérdidas de agua por acometida	99,91	l / acometida / día
	Rendimiento volumétrico	70,59%	%
Valoración económica	Coste unitario variable del agua	0,1	€ / m3
Topografía del sistema	Cota de aspiración de la bomba (Zp)	5	msnm
	Cota del depósito (Zdep)	80	msnm
	Cota máxima (Zh)	47,5	msnm
	Cota mínima (Zl)	5	msnm
	Cota promedio ponderada (Zj)	30,00	msnm

Figura A1-8: Sección superior de la hoja Configuración.

Independientemente del grado de detalle, también se debe conocer la **cota de aspiración** de la bomba, es decir la elevación a la que el agua está disponible y la **cota del depósito**, si lo hubiera. A la parte superior de la hoja Configuración se trasladan automáticamente los datos más significativos de la red introducidos en la tabla de datos. Y se calculan los diferentes indicadores de pérdidas de agua a partir del Volumen inyectado (introducido en la Caracterización), el Volumen registrado y los datos previamente introducidos de km de red, y número de acometidas.

A1.2.4 Datos energéticos

Por otro lado y con respecto al consumo energético, se requiere como dato indispensable la **energía de eje** total, esto es el valor de energía consumida por las estaciones de bombeo, que puede ser directamente obtenida de las facturas eléctricas y que irá referida al periodo de análisis. Además, con respecto a los grupos de presión se puede conocer la altura y el volumen que está aportando la bomba, lo que permitirá entre otras cosas estimar el rendimiento global de la estación de bombeo en su conjunto y evaluar la intensidad energética.

DATOS ENERGÉTICOS							
¿Número de Estaciones de Bombeo?	<input type="text" value="1"/>		(máximo 10 EB)				
Energía de eje total	<input type="text" value="980.000,00"/>		kWh / año				
Volumen inyectado	<input type="text" value="3.100.000,00"/>		m ³ / año				
Importe de las facturas eléctricas	<input type="text" value="90.000,00"/>		€ / año				
EB	ID Estación de Bombeo	Altura aportada por la bomba m	Volumen bombeado por la EB m ³ / año	Energía consumida por la EB kWh / año	Rendimiento estimado de la EB %	Intensidad energética actual de la EB kWh / m ³ / 100 m	Importe de la factura eléctrica € / año
1	EB1	80	3.100.000,00	980.000,00	68,96	0,395	90.000,00

Figura A1-9: Hoja de Datos energéticos.

Por tanto el primer paso es seleccionar el *Número de Estaciones de Bombeo* que hay en el sistema, esto habilitará tantas filas como estaciones de bombeo se hayan definido. El único dato que es imprescindible para obtener el valor de la eficiencia real del sistema es *la Energía consumida por la EB* dado que se trata de la energía real de entrada al sistema. Esta energía es posible obtenerla directamente de la factura eléctrica de la estación de bombeo. El resto de datos que definen la bomba son datos adicionales que pueden ayudar a valorar el estado y la eficiencia de cada grupo de presión.

Esta hoja de Datos energéticos no estará disponible para la Tipología 1 (Red por gravedad) dado que todo el suministro se hace por gravedad en ausencia de bombas. En el caso de la Tipología 4 (Red con varias entradas), esta hoja se sustituye por otra en la que definir todos los datos de cada fuente (sea por gravedad o con bomba).

A1.2.5 Datos fuentes

En el caso que existan varias fuentes, es decir varios puntos de inyección de agua al sistema, es posible definir las propiedades de todas ellas en la hoja de *Datos Fuentes*. De nuevo, el primer paso es introducir el *Número de entradas al sistema*, esto habilitará tantas filas como puntos de entrada. Para cada fuente de agua se pueden seleccionar una serie de parámetros que permitirán la introducción de algunos datos. Por ejemplo:

DATOS FUENTES

¿Número de entradas al sistema?	2	(máximo 10)	
Energía natural total	103.550,00	kWh / año	
Energía de eje total	380.000,00	kWh / año	
Suma de los volúmenes inyectados	3.100.000,00	m ³ / año	
Importe de las facturas eléctricas	35.000,00	€ / año	

ID Entrada al sistema	¿Posee bomba? SI / NO	Cota del agua m	Volumen inyectado/bombeado desde la fuente m ³ / año	Energía natural aportada kWh / año	¿Bombea en directo o a depósito? DIRECTO / DEPÓSITO	Cota del depósito m	Altura aportada por la bomba m	Energía consumida por la EB kWh / año	Rendimiento estimado de la EB %	Intensidad energética actual de la EB kWh / m ³ / 100 m	Importe de la factura eléctrica € / año
EMBALSE	NO	30	1.900.000,00	103.550,00							
POZO	SI	10	1.200.000,00	0,00	DEPÓSITO	90,00	80,00	380.000,00	68,84	0,396	35.000,00

Figura A1-10: Hoja de Datos fuentes.

¿Posee bomba? (SI/NO): Si la respuesta es NO, se deshabilitarán todos los datos correspondientes a las bombas. Y sólo restará introducir la cota a la que se encuentra disponible el agua en esa fuente y el *volumen inyectado* desde ella. Si la respuesta es SI; se habilitarán los datos a introducir sobre la bomba, además de tener que definir el *volumen inyectado* desde esa fuente (volumen bombeado) y la *cota del agua* (cota de aspiración de la bomba).

A partir del volumen inyectado y de la cota del agua, se calculará la energía natural (o gravitatoria) aportada por la fuente.

¿Bombeo directo o a depósito? (DIRECTO/DEPÓSITO): Si la respuesta es DIRECTO, se deshabilita la celda para la introducción de la cota del depósito. Si la respuesta es DEPÓSITO se debe introducir a continuación la cota del depósito de regulación a la entrada de la red.

De nuevo, el único dato totalmente indispensable para calcular la eficiencia real del sistema es la energía aportada por cada bomba y que se puede obtener directamente de la factura eléctrica. El resto de datos como la altura aportada son sólo para evaluar el funcionamiento de la bomba, calculando el rendimiento medio del grupo de presión o la intensidad energética.

Existen una serie de comprobaciones que hace la herramienta y que deben tenerse en cuenta, tales como que la altura aportada por la bomba más la cota de aspiración de ésta debe ser al menos la cota del depósito al que impulsa, en el caso de existir depósito. También verifica que la suma de los volúmenes inyectados por cada fuente sea el mismo que el Volumen inyectado

definido en la *Caracterización*. Otra de las posibles verificaciones de cara a evitar sistemas incoherentes y por tanto resultados erróneos es que la altura de entrada (bien de forma natural o bien con la altura aportada por la bomba) sea superior a la altura mínima necesaria (suma de la cota del nudo más alto más la presión de servicio), de no ser así el sistema no estaría garantizando la presión mínima requerida en todos los nudos y por tanto los resultados de eficiencia obtenidos no serían válidos dado que el servicio no está siendo garantizado.

A1.2.6 Diagnóstico

Introducidos todos los datos, la herramienta ofrece los resultados del diagnóstico. Esta hoja, únicamente de consulta e igual para cualquier tipología, ofrece una visión general del estado del sistema desde el punto de vista energético.

En primer lugar el valor de todas las energías ideales consecuencia de la configuración de la red, es decir consecuencia de las cotas y del volumen demandado en los nudos de consumo. En el caso de existir depósito a la entrada de la red y si la altura de éste es superior a la mínima altura requerida (cota del nudo más alto más presión de servicio) existirá energía de exceso, en caso contrario este valor será cero.

El segundo bloque de energías, son las energías reales suministradas. Energía natural suministrada, en el caso que la cota de la fuente de agua no sea la cota más baja del sistema, y energía de eje suministrada, suma de toda la energía suministrada por las bombas.

DIAGNÓSTICO			
Energías ideales	Energía mínima requerida por los usuarios (Euo)	257.417,77	kWh / año
	Energía topográfica ideal (Eti)	89.339,41	kWh / año
	Energía de exceso (Eei)	46.146,39	kWh / año
	Energía mínima suministrada ideal (Esi = Euo + Eti + Eei)	392.903,57	kWh / año
Energías reales	Energía natural suministrada (Esr,n)	53.157,59	kWh / año
	Energía de eje suministrada (Esr,p)	985.400,00	kWh / año
	Energía suministrada total (Esr = Esr,n + Esr,p)	1.038.557,59	kWh / año
Rendimientos	Rendimiento ideal del sistema (η_{ai})	0,66	
	Rendimiento real del sistema (η_{ar})	0,25	
$I_{ds,i}$	Indicador de la mejora por suministro directo	1,133	

Figura A1-11: Hoja de Diagnóstico

Para ambos bloques se ofrece (numérica y gráficamente) la contribución de cada una de las energías al valor total.

A continuación se ofrecen los dos valores de rendimiento del sistema ofrecido por el diagnóstico energético. Por un lado el *Rendimiento ideal del sistema*, que indica qué parte del total de la energía que necesariamente se debe introducir en el sistema (con la configuración actual) es estrictamente útil. Este valor es ideal y por lo tanto inalcanzable, pero indica el límite superior de la eficiencia del sistema, valor que jamás podrá ser superado, al menos con la configuración actual del sistema.

Un valor bajo del rendimiento ideal es debido (en ausencia de depósito de regulación y por tanto de energía de exceso ideal) a que la topografía del sistema es muy irregular y por tanto la energía topográfica entregada es elevada con respecto a la energía mínima requerida.

El valor a comparar con el rendimiento ideal es el *Rendimiento real*. Éste posee el mismo numerador (energía mínima requerida por los usuarios) pero difiere en el denominador (energía real suministrada). Por tanto la diferencia entre ambos valores reside en la existencia de ineficiencias en el sistema, pérdidas de energía debido a las fugas, a las pérdidas en los grupos de presión o por fricción en las tuberías.

Por último en el caso de existir depósito, se calcula el *Indicador de la mejora por suministro en directo*, éste indica la mejora en términos energéticos que sufriría el sistema en el caso que se eliminara el depósito y se suministrara en directo a la red. Este valor es la relación existente entre el rendimiento ideal del sistema abastecido en directo y el rendimiento ideal del sistema abastecido con depósito de cabecera.

Se ofrecen dos gráficas que ayudan a simple vista a evaluar el sistema. Por un lado la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, cuanto mayor sean las energías reales con respecto a las energías ideales más ineficiente será el sistema y más importante realizar una auditoría en detalle que permita identificar a qué se deben las pérdidas de energía. Además la gráfica permite valorar de un solo vistazo la contribución de cada tipo de energía.

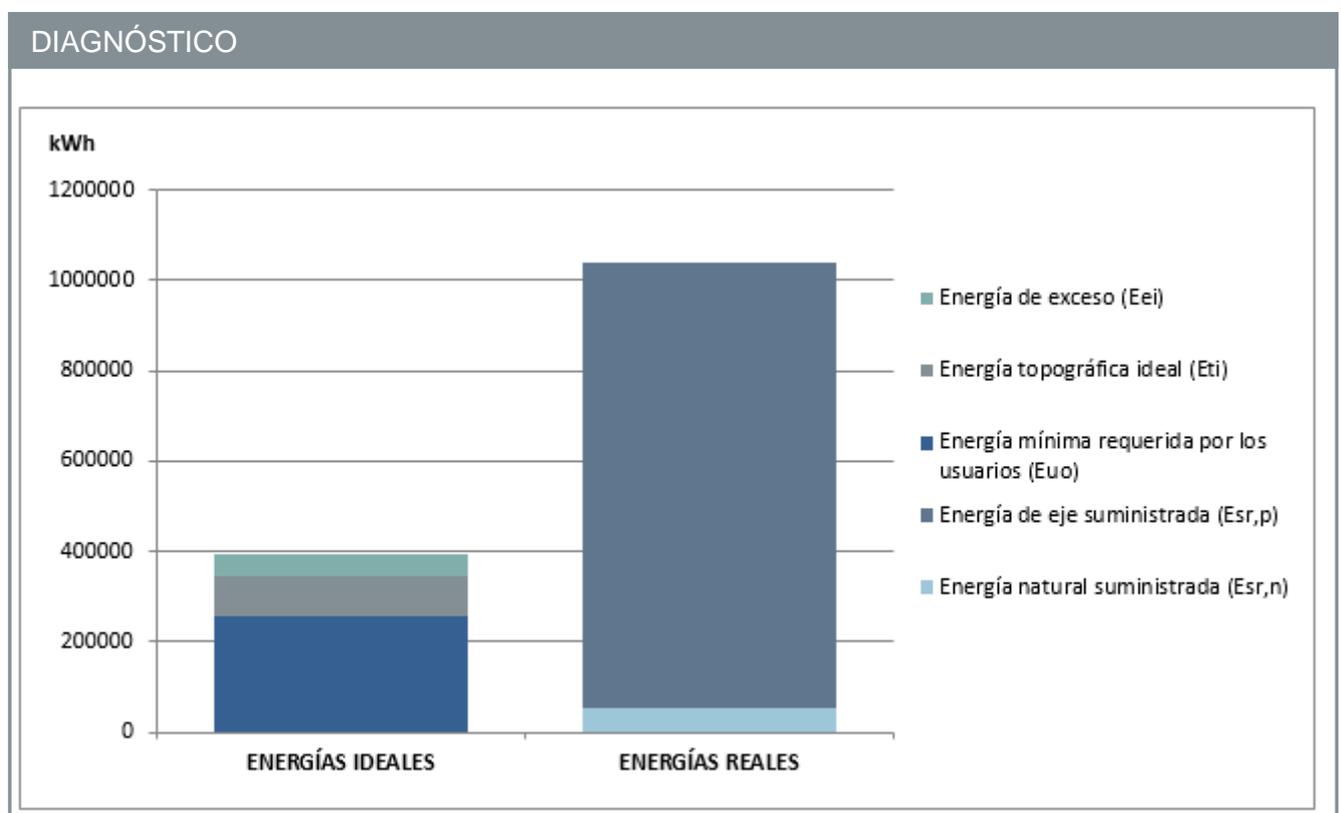


Figura A1-12: Gráfico de distribución de energías

Por otro lado se ofrece una gráfica de porcentaje de energías acumuladas. Este tipo de gráfica permite evaluar en qué cotas se concentra la mayor demanda de energía (requerida por los usuarios, topográfica y suministrada). Por ejemplo, para la gráfica del ejemplo (Figura A1-13) se observa cómo el 90% de la demanda de energía topográfica se centra en la parte baja de la red (nodos de consumo con cotas desde 0 a 60 metros) mientras que sólo el 10% de la energía topográfica se debe a los nodos de consumo de mayor elevación (de 60 a 120 metros). De igual modo se puede evaluar los otros términos de la energía ideal, en términos globales el 85% de

toda la energía suministrada ideal se debe al consumo de los nudos de menores cotas (por debajo de 65 metros) mientras que únicamente el 15% restante se debe a la zona alta de la red.

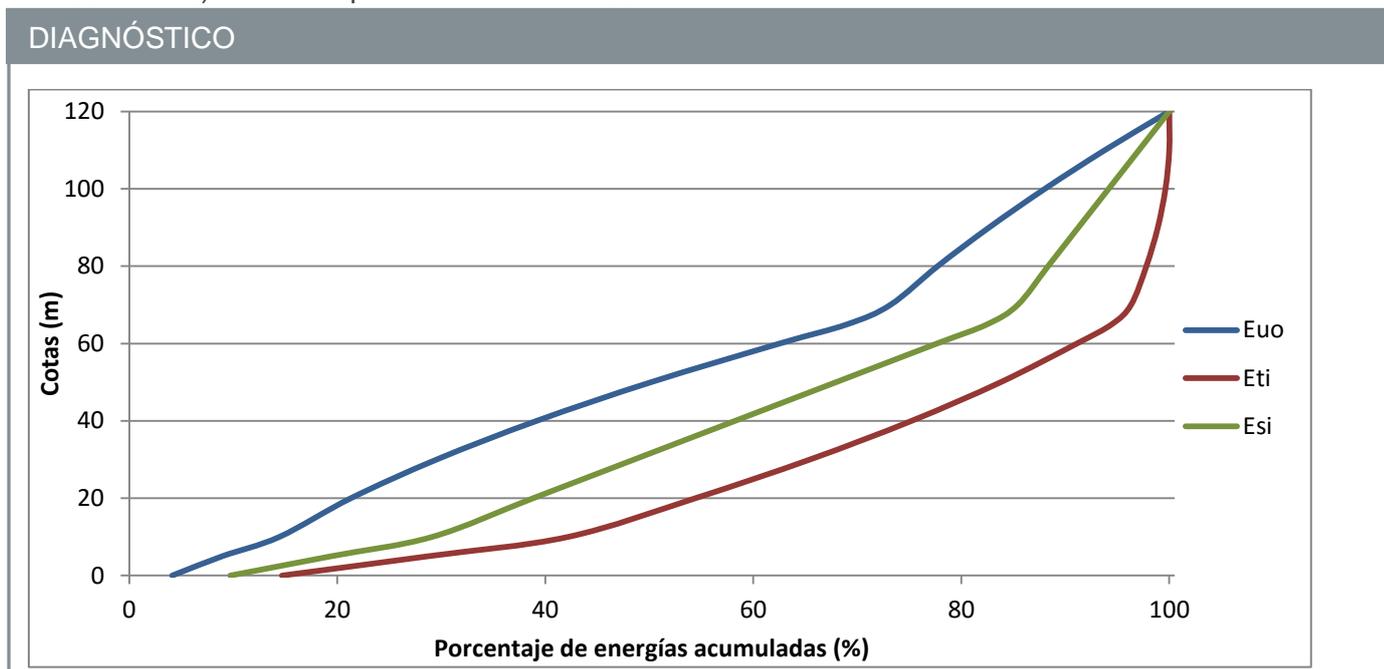


Figura A1-13: Gráfico de distribución de energías

A1.2.7 Preauditoría - Objetivo

Realizar una auditoría energética de la red requiere disponer del modelo matemático de la red calibrado, pero EAGLE ofrece la posibilidad de obtener una preauditoría a partir de los datos introducidos. Se trata de una estimación de los valores de pérdidas de energía, por exceso de energía, por fugas, por ineficiencias en el sistema y por fricción u otro tipo de pérdidas. Se trata pues de valores aproximados que si bien no deben considerarse valores exactos sí que ofrecen una visión general de a qué se deben las ineficiencias del sistema (ineficiencias que alejan el rendimiento real del rendimiento ideal).

Por tanto, la primera parte de esta hoja ofrece los valores de energía perdida en cada una de las posibles ineficiencias del sistema y su porcentaje con respecto a la energía total perdida.

PREAUDITORÍA - OBJETIVO						
PREAUDITORÍA	EXCESO DE PRESIÓN	Energía de EXCESO (E_{ex})	68.125,00	kWh / año	3,33%	%
	FUGAS	Energía perdida por FUGAS (E_{f})	545.955,33	kWh / año	26,70%	%
	ESTACIÓN BOMBEO	Energía perdida en EJE (E_{p})	1.192.500,00	kWh / año	58,32%	%
	FRICCIÓN + OTROS	Energía perdida por FRICCIÓN y OTRAS ($E_{r} + E_{o}$)	238.214,65	kWh / año	11,65%	%

Figura A1-14: Preauditoría del sistema

La diferencia entre el valor de la *Energía de EXCESO ideal* (E_{ei}) ofrecida en el diagnóstico y el de la *Energía de EXCESO real* (E_{er}) que se muestra en la preauditoría reside en la diferencia del volumen considerado, mientras que en el caso ideal es el volumen registrado o demandado el que se debe elevar hasta el depósito de regulación a la entrada de la red, en el caso real es todo el volumen inyectado (registrado más fugas) el que debe elevarse, por tanto, en los sistemas reales la existencia de un depósito en cabecera con altura superior a la máxima requerida (cota del nudo más alto más presión de servicio) siempre introducirá más ineficiencias en el sistema que en el caso ideal.

Por otro lado se ofrece el valor de las *Energía perdida por FUGAS* consecuencia del agua fugada a las diferentes presiones en la red. Cuanto mayor sea el volumen fugado o las presiones en la red, mayor será la energía perdida debido a las fugas.

El resultado de la preauditoría para la *Energía perdida en EJE* es consecuencia directa del rendimiento estimado en los grupos de presión. Es decir la diferencia entre la energía suministrada por cada grupo de presión (valor de la factura eléctrica) y la energía útil entregada por la bomba (volumen bombeado a la altura suministrada).

Por último la *Energía perdida por FRICCIÓN* y *OTRAS* se estima como la diferencia entre toda la energía real suministrada (natural y de eje) y la energía ideal, menos cada uno de los otros términos de pérdidas.

Las energías objetivo y el rendimiento objetivo del sistema, pueden considerarse como una versión mejorada del sistema real, siempre sin poder alcanzar el sistema ideal (que siendo ideal es inalcanzable). Se trata pues de decidir hasta qué punto se puede reducir cada una de las pérdidas de energía estimadas, cada reducción de pérdidas lleva asociado un potencial ahorro económico en función de los costes unitarios de energía y de volumen de agua introducidos.

No se considera una energía de exceso objetiva, porque la versión mejorada del sistema debe contemplar siempre que la energía de exceso sea cero.

En cuanto a la *Energía objetiva perdida por FUGAS* ($E_{r,o}$), junto con el valor de las pérdidas actuales (en rendimiento volumétrico) se ofrece la posibilidad de introducir un nuevo valor de pérdidas objetivo que podría llegar a alcanzarse. Este nuevo valor realista y alcanzable de pérdidas en la red se puede introducir a partir de los tres indicadores de pérdidas (% , l/acometida/día, $m^3/km/h$). Una vez introducido el nuevo valor de pérdidas, la herramienta calculará el nuevo valor de pérdidas de energía debida a las fugas y estimará el ahorro económico debido sólo a la reducción del volumen fugado.

Por ejemplo, en el caso de la Figura A1-14; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el rendimiento volumétrico actual de la red es del 64,96% (este rendimiento supone una energía perdida según la preauditoría y según se indica en la herramienta de 545.955,33kWh/año), si el abastecimiento lograra reducir las pérdidas de agua hasta un nivel de rendimiento volumétrico de la red del 75%, la energía perdida por fugas reduciría su valor a 337.440,46 kWh/año, lo que

supone una reducción de energía de más del 38%. Esto implica que reducir las pérdidas del 35,04 al 25% (aproximadamente un 10%) supone una mejora directa del 38% de energía asociada a ellas. Por otro lado se ofrece una valoración económica de lo que supondría reducir en ese porcentaje las pérdidas, este valor es únicamente consecuencia de esta mejora, y es directamente el ahorro en la compra de agua (si se hubiera definido anteriormente un valor de *Coste unitario variable del agua*) y el ahorro en energía de bombeo al tener que bombear menos agua.

PREAUDITORÍA - OBJETIVO			
	Nivel de pérdidas actual	64,96	%
	Potencial ahorro solo por disminuir las fugas	66.963,64	€/ año
FUGAS	Nivel de pérdidas objetivo	75	%
	Energía objetiva perdida por FUGAS ($E_{r,o}$)	337.440,46	kWh / año

Figura A1-15: Energía objetivo perdida por FUGAS

El siguiente término es la *Energía objetiva perdida por BOMBEO* ($E_{r,o}$). De forma similar al anterior objetivo, se estima la nueva pérdida de energía en el eje en el caso de mejorar el rendimiento de los grupos de presión. Se compara la energía perdida actual estimada en los grupos de presión con la que podría perderse en el caso de mejorar el rendimiento de las bombas.

PREAUDITORÍA - OBJETIVO			
	Rendimiento global EB actual	61,53	%
	Potencial ahorro solo por modificar el rendimiento de la bomba	88.588,71	€/ año
ESTACIÓN DE BOMBEO	Rendimiento objetivo medio EB	80,00	%
	Energía objetiva perdida por BOMBEO ($E_{r,o}$)	354.054,67	kWh / año

Figura A1-16: Energía objetivo perdida por BOMBEO

El valor del rendimiento objetivo se debe definir en la tabla de las *Estaciones de Bombeo o Fuentes de Suministro* que se muestra en la parte inferior de la hoja. En esta tabla se muestran los valores actuales de las bombas y se permite introducir el nuevo valor objetivo de rendimiento. La herramienta ofrece una serie de consideraciones adicionales. El volumen bombeado por esta nueva versión mejorada de las bombas es directamente el correspondiente al volumen objetivo.

Se estima también el potencial ahorro económico consecuencia del nuevo rendimiento de las estaciones de bombeo. Este es el ahorro sufrido sólo por aumentar el rendimiento (no se tiene en cuenta la reducción del volumen sufrido).

Por último, se estima un nuevo valor de pérdidas por fricción a partir del valor de *Pendiente hidráulica objetivo* y el valor de la *Longitud del recorrido medio del agua*. Este es el término más subjetivo, dado que depende directamente de la suposición que se haga del recorrido medio del agua.

PREAUDITORÍA - OBJETIVO			
FRICCIÓN	Pendiente hidráulica objetivo	2,5	mca /km
	Longitud del recorrido medio del agua	1200	m
	Energía objetiva perdida por FRICCIÓN ($E_{r,o}$)	35.405,47	kWh / año

Figura A1-17: Energía objetivo perdida por FRICCIÓN

La suma de la energía ideal (energía mínima requerida por los usuarios más la energía topográfica) más cada una de las energías objetivo, dará como resultado la nueva energía a suministrar en la versión mejorada del abastecimiento, *la Energía total a suministrar objetivo* ($E_{sr,o}$). La proporción entre la Energía mínima requerida por los usuarios y la Energía a suministrar objetivo dará como resultado el *Rendimiento objetivo del sistema* (mismo numerador que en el rendimiento ideal y rendimiento real).

PREAUDITORÍA - OBJETIVO			
	Energía total a suministrar objetivo ($E_{sr,o}$)	2.054.605,62	kWh / año
	Estimación de la energía a suministrar a partir de la energía de entrada	2.006.309,81	kWh / año
	Pérdidas estimadas en fricción y otros	-12.890,34	kWh / año
	Diferencia entre la energía objetivo y la estimada (incluye otras pérdidas)	-2,41%	kWh / año
	Rendimiento objetivo del sistema ($\eta_{sr,o}$)	0,30	

Figura A1-18: Rendimiento objetivo del sistema

La herramienta permite estimar el cálculo de la Energía objetivo por otro método similar al utilizado en la energía real suministrada. Como una caja negra en la que se desconoce cómo se van a distribuir las energías perdidas pero se conoce la nueva energía de entrada objetivo a partir de la suma de la energía objetivo suministrada por las bombas y la energía objetivo natural. Es decir, la energía de entrada al sistema procede de la propia energía natural (teniendo en cuenta el

volumen objetivo que es el volumen demandado por los usuarios y las fugas objetivo que el abastecimiento está dispuesto a alcanzar) y la energía que entregan las bombas teniendo en cuenta el nuevo rendimiento objetivo y el volumen bombeado objetivo. Esta energía objetivo será la suma de la energía ideal más las pérdidas de energía objetivo, dado que el término más estimativo es la pérdida por fricción, se supone que en ese término es donde reside la diferencia.

La herramienta ofrece también una valoración económica de las mejoras (en fugas, rendimientos de las bombas y fricción) estimadas, calculando el potencial ahorro económico tanto en energía eléctrica como en volumen de agua.

A1.2.8 Resumen del diagnóstico

Introducidos todos los datos del sistema, y valorados los objetivos alcanzables de mejora, la última hoja de EAGLE es un resumen de los valores del diagnóstico tanto en forma numérica como gráfica.

RESUMEN	
Energía mínima requerida por los usuarios (E_{uo})	625181,49 kWh / año
Energía topográfica ideal (E_{ti})	702523,53 kWh / año
Energía de exceso (E_{ei})	0,00 kWh / año
Energía mínima suministrada ideal (E_{si})	1327705,02 kWh / año
Rendimiento ideal del sistema (η_{ai})	0,471
Energía natural suministrada ($E_{sr,n}$)	408750 kWh / año
Energía de eje suministrada ($E_{sr,p}$)	2900000 kWh / año
Energía suministrada total ($E_{sr} = E_{sr,n} + E_{sr,p}$)	3308750 kWh / año
Rendimiento real del sistema (η_{ai})	0,189
Rendimiento objetivo del sistema ($\eta_{ar,o}$)	0,30

Figura A1-19: Resumen del diagnóstico de una red de abastecimiento de agua a presión

Junto con la tabla de energías ideales y reales y el valor de los tres rendimientos del diagnóstico, se ofrece una gráfica, que permite de forma visual detectar cuánto mayor es la energía real con

respecto a la ideal, y la reducción en el valor de cada una de las pérdidas de energía entre los valores de la preauditoría (actuales) y los valores objetivo (deseables).

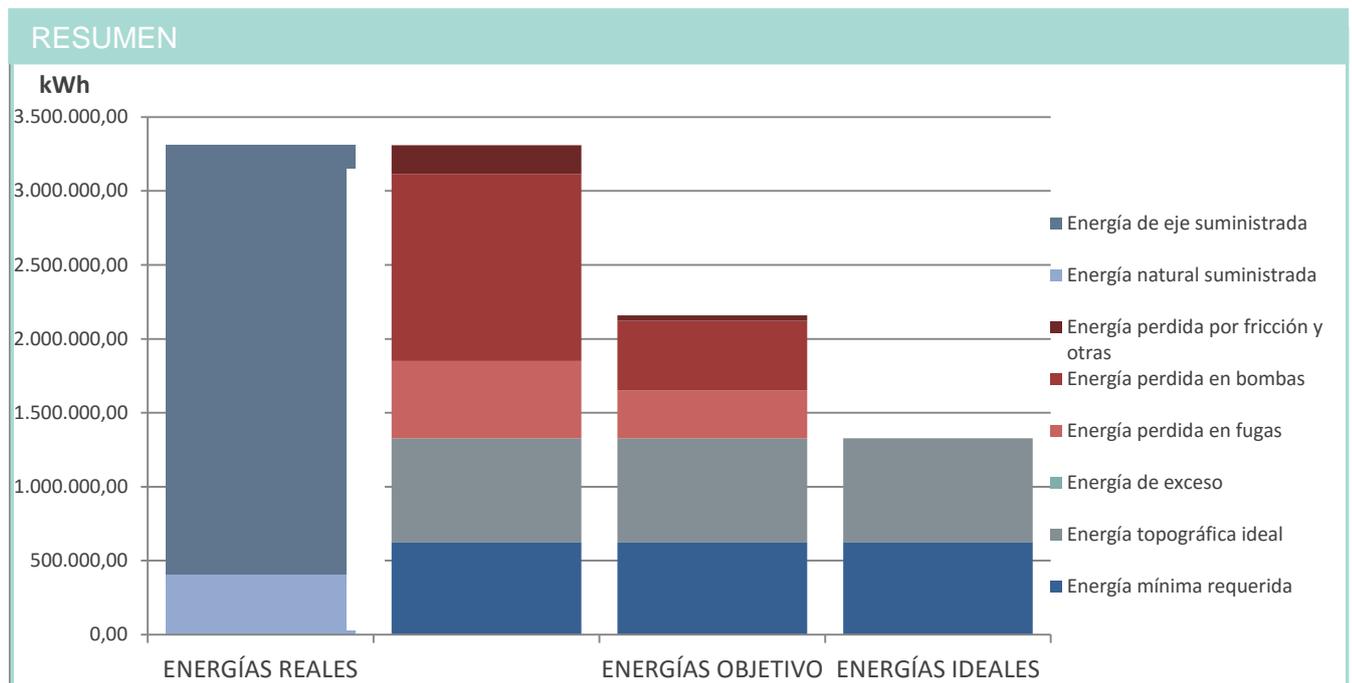


Figura A1-20: Gráfica del diagnóstico energético del sistema

Por último, EAGLE ofrece una serie de conclusiones sobre el diagnóstico y la preauditoría, y lista algunas posibilidades de mejora en función de los resultados obtenidos para cada sistema concreto.

A1.3 Cuestiones varias sobre la herramienta

A1.3.1 Mensajes arrojados por EAGLE

A lo largo de todo el proceso de diagnóstico EAGLE puede arrojar una serie de mensajes o advertencias. Éstos pueden ser consecuencia de la introducción errónea de los datos o la imposibilidad por parte de la herramienta de analizarlos. Por ejemplo: en el caso que se esté analizando una tipología con depósito en cabecera (Tipo 3 o Tipo 4), si la altura del depósito es inferior a la altura mínima requerida (consecuencia de la cota del nudo más alto más la presión de servicio que se debe garantizar en éste), aparecerá un mensaje advirtiendo del error. También avisará entre otras circunstancias, cuando la altura aportada por la bomba sea insuficiente para alcanzar como mínimo la altura de entrada (altura mínima requerida o altura del depósito)

Revisa las presiones mínimas de servicio y las cotas de los nudos. Hay algún nudo cuya altura mínima requerida (cota + P_o) es de 150 m, y por tanto, supera la altura disponible de 130 m, correspondiente a la cota del depósito.

Figura A1-21: Ejemplo de mensaje de error

Existen en el grupo de los mensajes de error algunos más críticos, que indican la imposibilidad de realizar el diagnóstico o la preauditoría. Estos mensajes son consecuencia de que es imposible validar el balance energético, es decir la energía real que se está introduciendo es inferior a la que se debe entregar más las posibles pérdidas. Este error se puede deber a diferentes cuestiones pero lo más probable es que la herramienta no contemple la tipología del sistema porque no se asemeje a ninguna de las cuatro tipologías disponibles, todas ellas evalúan un único volumen de control.

Por último, existe otro grupo de mensajes que se corresponden con advertencias o sugerencias, no con errores. Dentro de estas advertencias se encuentran las sugerencias de valores de dotación media, pérdidas admisibles o la intensidad energética en las estaciones de bombeo. Por tanto, mientras que los mensajes de error (en rojo) son críticos para que los valores ofrecidos por el diagnóstico sean correctos y por tanto hacen referencia al proceso de cálculo de la herramienta, el segundo grupo (en gris) son advertencias sobre el funcionamiento del sistema consecuencia de los datos y por tanto independientes del proceso de diagnóstico.

La intensidad energética de la Estación de Bombeo de la fuente 1 es de 0,62 kWh / año.
Se recomienda que este valor se encuentre cercano a un rango entre 0,4 y 0,54 kWh/ m³/ 100 m.

Figura A1-22: Ejemplo de mensaje de advertencia

A1.3.2 Tipo de celdas disponibles

Existen tres tipos de celdas principales en EAGLE.

- Las celdas habilitadas para introducir datos por el usuario.
- Celdas bloqueadas cuyo valor ya ha sido introducido previamente y por tanto no es posible editarlas.
- Celdas bloqueadas cuyo valor es consecuencia de otros valores introducidos. Se trata de los propios resultados ofrecidos por la herramienta.

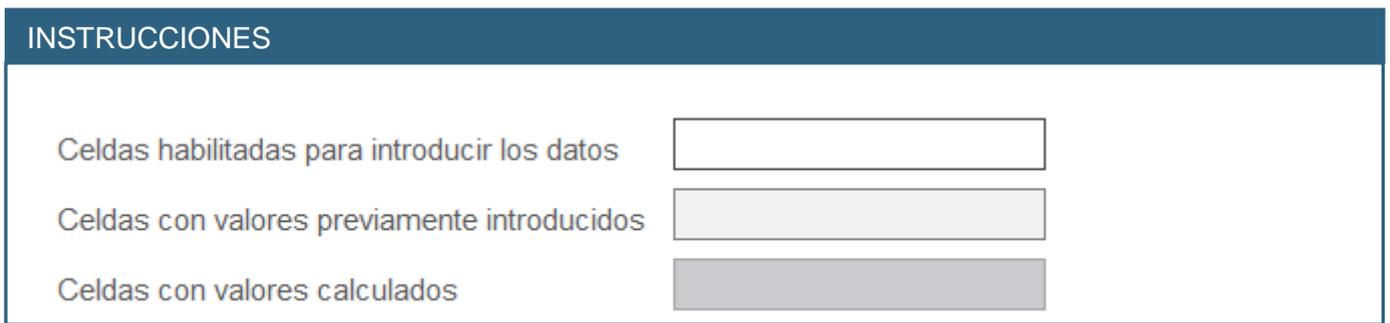


Figura A1-23: Tipo de celdas disponibles

A1.3.3 Ayuda y descripción de las variables

Cada una de las variables y resultados que se incluyen en EAGLE poseen una descripción o aclaración sobre su significado o su uso. Esta descripción aparece al situar el cursor en el lateral de la celda correspondiente:

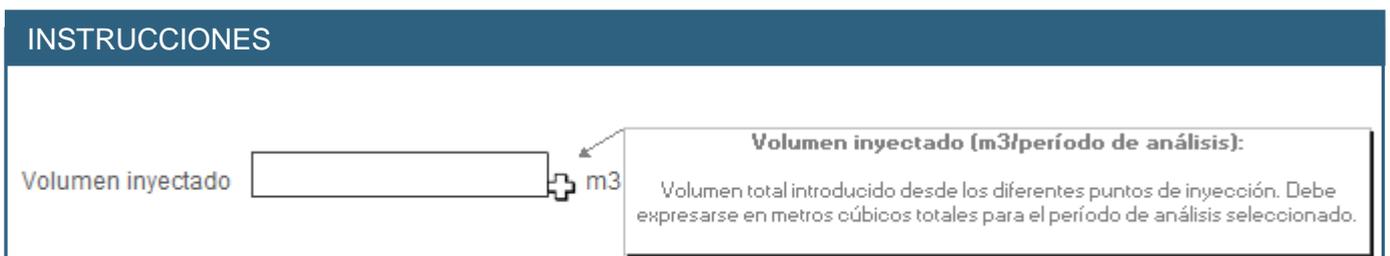


Figura A1-24: Ejemplo definiciones y ayuda

A1.4 Ejemplos de cálculo

A1.4.1 Ejemplo sistema urbano

A continuación se muestra el esquema básico de funcionamiento del sistema urbano que se va a analizar con EAGLE. Se describe paso a paso los datos introducidos en la herramienta y los resultados y conclusiones obtenidas.

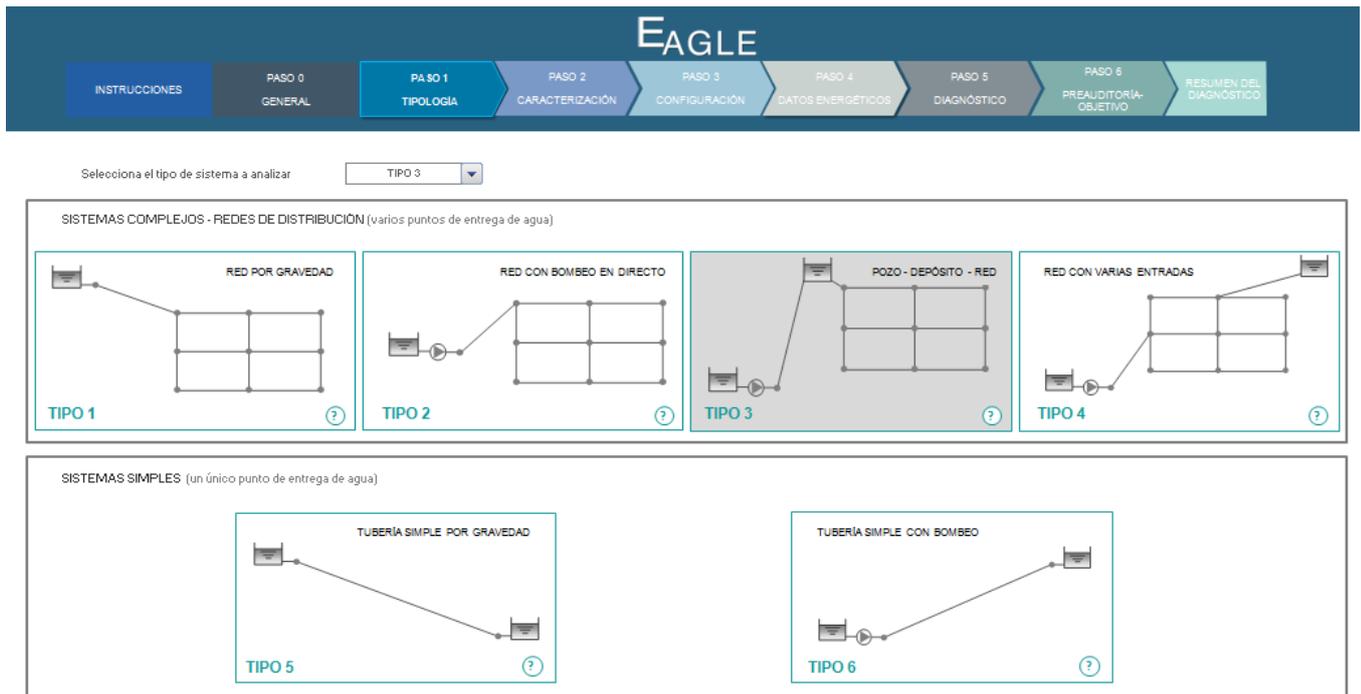


Figura A1-26: Paso 1. Selección de la tipología

A1.4.1.2. Caracterización del sistema

Una vez seleccionada la tipología a analizar, el siguiente paso, común a todas las tipologías complejas (redes), es la caracterización del sistema. En este caso dado que los datos de volumen registrado en cada uno de los nudos de consumo y los consumos eléctricos de las bombas se encuentran disponibles de forma anual, se selecciona como *Periodo de análisis* el *año*. Esta selección condicionará por un lado los valores a introducir, por ejemplo de volumen inyectado ($m^3/año$), y por otro los resultados obtenidos ($kWh/año$).

Este ejemplo corresponde a una red de abastecimiento de agua urbana, por lo que se realiza la selección de *Tipo de abastecimiento URBANO*. Esta selección habilitará los datos a introducir a continuación, que si bien no son imprescindibles para el diagnóstico ofrecen información de contexto que puede ser útil para conocer el estado del sistema. Por ejemplo: que el sistema da servicio a unos *65.000 habitantes*, que existen *40.000 abonados* al servicio distribuidos en aproximadamente *10.600 acometidas* y que la longitud total de la red es en torno a *450 km*.

PASO 2. CARACTERIZACIÓN

Período de análisis	<input type="text" value="AÑO"/>	
Tipo de abastecimiento	<input type="text" value="URBANO"/>	

Datos básicos del abastecimiento urbano	Población	65000	habitantes
	Abonados	40000	abonados
	Acometidas	10600	acometidas
	km de red	450	km

Volumen inyectado	<input type="text" value="4.991.910,00"/>	m3 / año
Dotacion	<input type="text" value="210,41"/>	l / hab / día
Factor de emisión (mix eléctrico)	<input type="text" value="0,187"/>	kg CO ₂ / kWh

Figura A1-27: Paso 2. Caracterización

Uno de los valores imprescindibles para la realización del diagnóstico energético es el volumen inyectado. Este volumen es el contabilizado por el o los contadores de entrada al sistema, en esta clase de tipología se puede considerar que el *Volumen inyectado* es el volumen impulsado por la bomba o la suma de todos los volúmenes impulsados por las bombas en el caso que haya más de una. Este volumen contempla las pérdidas de agua del sistema. A partir del dato del volumen inyectado y de los habitantes, se calcula la *Dotación*, es decir, se estima cuál es la cantidad de agua que consume al día cada uno de los habitantes de la población (o sistema considerado). En este caso la dotación es de 210 litros por habitante y día. Un valor inferior a la media española que según AEAS (Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento) se situaba en 2014 en torno a 241 litros por habitante y día. Este indicador de dotación incluye, además del consumo que se realiza en los hogares, el de las industrias abastecidas por la red urbana, la población turística y estacional, los usos públicos, los consumos no registrados y las pérdidas en el proceso de distribución. En el caso de considerar únicamente el consumo de agua de los hogares españoles este valor desciende a los 141 litros por habitante y día (2006), disminuyendo a 112 litros por habitante y día en el 2012, según la evolución del consumo doméstico (agua utilizada por cada habitante para consumo en el hogar, lavarse, ducharse, fregar, inodoro, etc), presentado por AEAS en octubre de 2014.

El último dato que se ha definido en la caracterización del sistema es el *Factor de emisión* en este caso con un valor de *0,187 kg CO₂/kWh*. Este dato normalmente desconocido por el

abastecimiento puede ser consultado en diferentes fuentes. Se trata de un valor que varía en el tiempo, dado que depende en cada instante de la procedencia de la energía eléctrica que se esté produciendo en el país. Es por tanto el resultado del balance eléctrico peninsular que se realiza cada mes. El observatorio de la electricidad en España cuantifica como valor medio para el año 2015 un valor de 0,229 kg CO₂/kWh, mientras que la media para el año 2014 fue de 0,166 kg CO₂/kWh.

A1.4.1.3. Configuración

El primer paso llegados a la ventana de Configuración es rellenar la parte de la configuración de la red (parte inferior). En este caso y tal como se muestra en la Figura A1-25 del esquema de la red, el sistema puede simplificarse a un total de 12 nudos (estos nudos de consumo pueden ser usuarios, sectores, poblaciones, etc...). En este ejemplo se conoce la cota de cada uno de estos nudos, así como el volumen registrado en cada uno de ellos, por lo que se elige en la *Disponibilidad de Datos* la opción *1. Cotas y demandas en los nudos*. Al seleccionar esta opción se requiere introducir para cada uno de los nudos, la *Cota* y la *Demanda base* (o volumen registrado) y en el caso que no todos los nudos tuvieran la misma exigencia de presión mínima, la presión de servicio para cada uno de los nudos. En este caso la *Presión de servicio* es la misma en toda la red e igual a *30 mca*.

Una vez que se ha introducido la cantidad de nudos que definen la red se habilitan las filas correspondientes para introducir los datos de la cota y de la demanda de cada uno de los nudos (en el caso de seleccionar la opción 1). En el caso de disponer del modelo matemático de la red es probable que se conozca la demanda de los nudos en litros/segundo. Es posible introducir la demanda en diferentes unidades o copiar desde otro archivo y pegar directamente en las celdas correspondientes, únicamente deberá haberse definido previamente la cantidad de nudos.

Una vez introducidos los valores de elevación y demanda, la herramienta calcula automáticamente cuál es el nudo más alto (114 metros), más bajo de la red (3,5 metros) y la cota promedio ponderándola con la demanda (34,87 metros). También suma el total de las demandas para conocer cuál es el volumen registrado total (2.785.074 m³). Cuando ya se han introducidos todos los datos de la red, la herramienta traslada estos valores a la parte de arriba de la ventana para permitir, por un lado, introducir los valores que faltan y por otro analizar el estado del sistema desde el punto de vista de las pérdidas de agua.

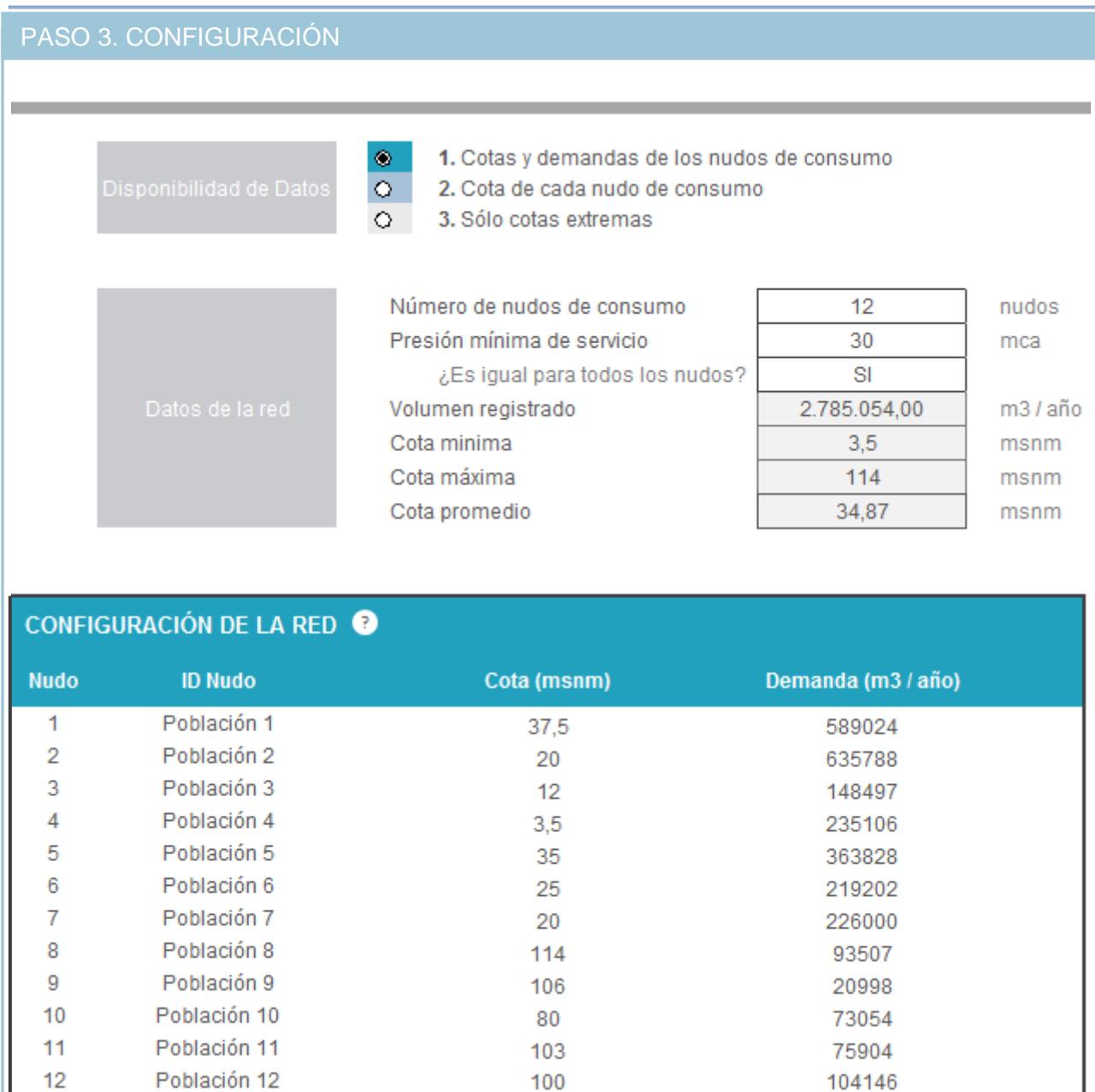


Figura A1-28: Paso 3. Configuración

Se calculan tres indicadores de *Pérdidas de agua*. Por un lado el rendimiento volumétrico de la red, es decir el volumen registrado con respecto al volumen inyectado. En este ejemplo el rendimiento obtenido es de 55,79%, un valor deficiente. El valor medio de ANR (Agua No Registrada, diferencia entre el agua suministrada y el agua medida por los contadores, expresada como un porcentaje sobre el agua suministrada; consta de dos componentes: pérdidas aparentes (consumos no facturados, consumos no autorizados e imprecisión de los aparatos de medición) y pérdidas reales (fugas o roturas en los depósitos y en la red de transporte y distribución)), en el año 2012 en España era de 24,6%. Un valor que con tendencia a descender, en los últimos años ha ido en aumento lo que hace patente el déficit de inversión en renovación de infraestructuras.

PASO 3. CONFIGURACIÓN			
Pérdidas de agua	Pérdidas de agua por longitud	0,5598	m ³ / km / h
	Pérdidas de agua por acometida	570,39	l / acometida / día
	Rendimiento volumétrico	55,79%	%

Figura A1-29: Paso 3. Configuración. Pérdidas de agua

Por los posibles inconvenientes contrastados que presenta el rendimiento volumétrico como indicador del estado de una red, se presentan también otros dos indicadores, las pérdidas por longitud y las pérdidas por acometida. Un ratio representativo del estado de conservación de un sistema hidráulico es el volumen perdido por Km de tubería y tiempo transcurrido. Este ratio tiene en cuenta la magnitud de la red, pues conforme una red es más extensa es más vulnerable y por tanto su rendimiento volumétrico puede ser menor que en redes pequeñas para un mismo caudal circulante. Un valor guía orientativo puede ser 0,2 litros/seg/Km (0,72 m³ /Km/día). Otro ratio interesante es el caudal unitario perdido en relación al número de acometidas en una zona o en un tramo; se expresa en litros/acometida/día, y dependiendo de la separación entre acometidas y del estado de conservación del tramo, debe oscilar entre 72 y 240 l/ac/día (Vela et al. 1994).

Por último, se introducen los valores de las cotas de los elementos que falta definir. La cota del depósito de regulación a la entrada de la red (160 metros) y la cota de aspiración de la bomba (20 metros). En el caso que la cota del depósito introducida fuera inferior a la altura mínima requerida por la red (suma de la cota del nudo más alto más la presión de servicio) la herramienta arrojaría un mensaje de error, pues en ese caso no sería posible garantizar en el nudo más desfavorable la presión mínima de servicio, incumpliendo así la garantía de suministro exigida. En este caso la altura mínima requerida por la red es de 114 metros (nudo más alto) más 30 metros (presión de servicio en ese nudo), por tanto el depósito debe estar a una altura igual (en el caso ideal) o superior a 144 metros. Toda la altura entre los 144 metros y la cota del depósito será presión de exceso y por tanto energía de exceso.

Más adelante, una vez calculado el diagnóstico se presenta la diferencia en el resultado obtenido con respecto a las distintas posibilidades de introducción de datos (de más detalle a menos detalle).

A1.4.1.4. Datos energéticos

El sistema de bombeo del ejemplo únicamente está formado por una bomba, ésta eleva el total del volumen inyectado en el sistema (4.991.910 m³), una altura de 140 metros (esta altura debe ser al menos la requerida para llegar al depósito de regulación). Si la altura indicada en la bomba fuera inferior a la altura mínima para llegar al depósito o inferior a la altura mínima requerida en la red (cota del nudo más alto más presión de servicio) en el caso que no existiera depósito y se bombeara en directo a la red, la herramienta arrojaría un mensaje de advertencia.

Estos datos junto con el del importe económico de la factura eléctrica son datos adicionales que pueden ayudar a analizar el sistema, pero no son datos indispensables para realizar el diagnóstico. El único dato imprescindible es la energía consumida por la estación de bombeo, valor que directamente se puede obtener de la factura eléctrica.

PASO 4. DATOS ENERGÉTICOS

¿Número de Estaciones de Bombeo? (máximo 10 EB)

Energía de eje total kWh / año

Volumen inyectado m3 / año

Importe de las facturas eléctricas € / año

EB	ID Estación de Bombeo	Altura aportada por la bomba m	Volumen bombeado por la EB m3 / año	Energía consumida por la EB kWh / año	Rendimiento estimado de la EB %	Intensidad energética actual de la EB kWh / m ³ / 100 m	Importe de la factura eléctrica € / año
1	1	140	4.991.910,00	3.306.607,00	57,59	0,473	321.903,00

Figura A1-30: Paso 3. Configuración. Pérdidas de agua

En este caso, se estima un rendimiento de la estación de bombeo de 57,59%. Este rendimiento es directamente la proporción entre la energía útil (altura y volumen aportados por la bomba) y la energía consumida, por tanto engloba todas las posibles pérdidas en la estación de bombeo.

Por tanto, la energía de entrada real al sistema será la suma de esta energía consumida por la bomba más la energía natural en el caso de existir.

A1.4.1.5. Diagnóstico

Una vez introducidos todos los datos, EAGLE ofrece los valores del diagnóstico energético. Para este ejemplo:

Los valores obtenidos en el diagnóstico energético del sistema, indican que la *Energía mínima requerida por los usuarios* (la suma de la energía que requiere cada usuario en función del volumen demandado y su elevación) es de 465.728 kWh/año que supone un 39,21% de toda la energía ideal a suministrar al sistema. Mientras que la *Energía topográfica ideal* (la energía requerida para poder garantizar el suministro al nudo más alto) es de 600.564 kWh/año, un 50,56 % del total de la energía ideal. Por tanto, la energía relacionada con los desniveles (topografía) de la red es superior al 50%, lo que indica que la red es claramente irregular (la diferencia entre el nudo más bajo de la red y el nudo más alto es superior a 110 metros).

Por otro lado, la *Energía de exceso* representa 10,22% de la energía total ideal. Mientras la energía topográfica es inevitable (mientras no se modifique la configuración de la red) la energía

de exceso debe ser evitada pues es consecuencia de impulsar agua a una altura superior a la requerida.

PASO 5. DIAGNÓSTICO			
Energías ideales	Energía mínima requerida por los usuarios (Euo)	465.728,59	kWh / año
	Energía topográfica ideal (Eti)	600.564,15	kWh / año
	Energía de exceso (Eei)	121.428,35	kWh / año
	Energía mínima suministrada ideal (Esi = Euo + Eti + Eei)	1.187.721,09	kWh / año
Energías reales	Energía natural suministrada (Esr,n)	224.448,75	kWh / año
	Energía de eje suministrada (Esr,p)	3.306.607,00	kWh / año
	Energía suministrada total (Esr = Esr,n + Esr,p)	3.531.055,75	kWh / año
Rendimientos	Rendimiento ideal del sistema (η_{ai})	0,39	
	Rendimiento real del sistema (η_{ar})	0,13	
$I_{ds,i}$	Indicador de la mejora por suministro directo	1,114	

Figura A1-31: Paso 5. Obtención del Diagnóstico

El *Rendimiento ideal* del sistema es de 0,39. Un valor bajo debido a la topografía del terreno. Un valor bajo pero que supone el límite superior del rendimiento del sistema, inalcanzable al tratarse de valores ideales. La única forma de superar este valor es modificando la configuración del sistema. Por tanto, antes de entrar a analizar el rendimiento real del sistema (mejorar bombas, disminuir fugas, etc..) el alto porcentaje de energía topográfica indica que debe replantearse la configuración y verificar que la distribución (layout) de la red es la única distribución posible o al menos que es la mejor.

Por otro lado, el *Rendimiento real* del sistema es de 0,13. Por tanto el margen de mejora es $0,39 - 0,13 = 0,26$ (el doble que el rendimiento actual). Se requiere pues el estudio detallado de las ineficiencias en la red.

Por último, al tratarse de un abastecimiento Tipo 3 (con depósito de regulación) se calcula el *Indicador de la mejora por suministro en directo*, es decir en el caso de eliminar el depósito y suministrar en directo a la red el rendimiento ideal del sistema sería un 11% superior. Mucho mayor sería el rendimiento real, dado que este indicador de mejora en el caso real siempre será superior al ideal, pues al eliminar la presión de exceso se disminuye la presión y por tanto las

pérdidas de agua y por otro lado la energía consumida por la bomba también es inferior, por un lado porque el volumen que debe bombear es menor (no hay tantas fugas) y por otro porque la altura que debe aportar también es menor (no hay presión de exceso).

En el caso de no disponer de todos los datos (cotas y demanda en cada cota) de la configuración de la red (Disponibilidad de datos. Opción 1) es posible seleccionar el análisis a partir de la introducción menos detallada de la red. En esos casos, el resultado del diagnóstico sería:

DIAGNÓSTICO			
2. Cota de cada nudo de consumo			
Energías ideales	Energía mínima requerida por los usuarios (Euo)	615.995,92	kWh / año
	Energía topográfica ideal (Eti)	450.296,81	kWh / año
	Energía de exceso (Eei)	121.428,35	kWh / año
	Energía mínima suministrada ideal (Esi = Euo + Eti + Eei)	1.187.721,09	kWh / año
Rendimientos	Rendimiento ideal del sistema (η_{ai})	0,52	
	Rendimiento real del sistema (η_{ar})	0,17	

Figura A1-32: Resultados del Diagnóstico energético en el caso de Disponibilidad de datos 2

Si se conoce las cotas de los nudos de consumo pero no se conoce cuál es la distribución de volumen registrado, sino que sólo se dispone del valor total (como suma de las facturaciones, por ejemplo) entonces los resultados del diagnóstico difieren con respecto a los obtenidos anteriormente. En este caso tanto el rendimiento ideal como el real son mayores, pero el margen de mejora es del mismo orden de magnitud ($0,52 - 0,17 = 0,35$), del doble del rendimiento actual. La principal diferencia en los resultados obtenidos entre este caso (*Opción 2. Cota de cada nudo de consumo*) y el anterior (*Opción 1. Cotas y demandas de los nudos de consumo*) reside en que ahora el término principal de la energía ideal es el requerido por los usuarios (51,86 %) mientras que el topográfico ha descendido en importancia (37,91 %) aunque sigue siendo un valor significativo. Esta diferencia se debe principalmente a que la distribución de volúmenes en este sistema no es uniforme, por ejemplo uno de los nudos más bajos (cota 20 metros) consume el 23 % del volumen total, por tanto si se considera la distribución de volúmenes real este nudo tiene asociada una gran cantidad de energía topográfica, mientras que en el caso de distribuir uniformemente los consumos este nudo sólo consumiría el 8,33% del volumen total siendo la energía topográfica asociada a este nudo mucho menor. Por tanto, aunque el margen de mejora se mantiene independientemente de cómo se disponga de los datos, las conclusiones pueden diferir un poco, aunque siempre dependerá del sistema.

En el caso de conocer sólo las cotas extremas y el volumen total (*Opción 3. Sólo cotas extremas*), el resultado dependerá en gran medida del valor que se introduzca como cota promedio. En este caso concreto se introduce como cota promedio un valor de 38 metros, dado que los principales consumos se sitúan por la parte baja y parece más razonable situar el centro de gravedad por

DIAGNÓSTICO			
3. Sólo cotas extremas			
Energías ideales	Energía mínima requerida por los usuarios (Euo)	489.508,05	kWh / año
	Energía topográfica ideal (Eti)	576.784,68	kWh / año
	Energía de exceso (Eei)	121.428,35	kWh / año
	Energía mínima suministrada ideal (Esi = Euo + Eti + Eei)	1.187.721,09	kWh / año
Rendimientos	Rendimiento ideal del sistema (η_{ai})	0,41	
	Rendimiento real del sistema (η_{ar})	0,14	

Figura A1-33: Resultados del Diagnóstico energético en el caso de Disponibilidad de datos 3

Más similares al caso analizado, e igualmente válidos. La energía topográfica supone un 48,56% y el margen de mejora ($0,41 - 0,14 = 0,27$) continúa siendo del orden de magnitud del doble del rendimiento actual.

Con respecto a los resultados ofrecidos por el diagnóstico, y volviendo al primero de los casos, resta sólo analizar las gráficas obtenidas. Por un lado, la *Gráfica de distribución de energías ideales y reales*.

Claramente se observa la diferencia entre la energía necesaria (ideal) y la energía realmente entregada. Según los rendimientos sean más cercanos entre ellos, ambas columnas tendrán alturas más similares. Además, se observa también a simple vista, que efectivamente, de las energías ideales el mayor porcentaje se debe a la energía topográfica (gris) y que la energía de exceso representa sólo una pequeña parte de la energía de entrada ideal, como debe ser. Por otro lado con respecto a la energía real, mucho mayor que la ideal, se observa como sólo un pequeño porcentaje se debe a energía natural (gratis) mientras que la mayoría de la energía que se aporta al sistema proviene de una bomba (93,64%) y por tanto se debe pagar por ella.

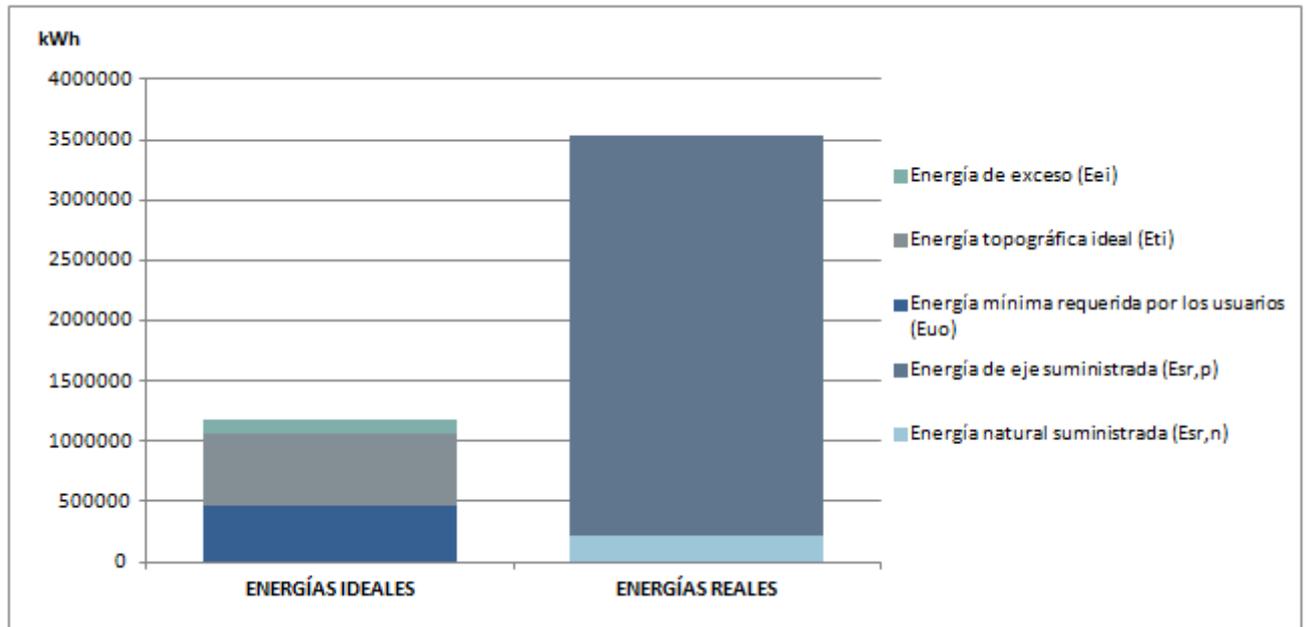


Figura A1-34: Resultados del Diagnóstico energético. Gráfica de distribución de energías

La otra gráfica que ofrece el diagnóstico es la *Gráfica de energías acumuladas* que aporta información útil respecto a la configuración de la red, independientemente de la energía de entrada. Esta gráfica puede ayudar a identificar las zonas o sectores más críticos o que más energía requieren. Por ejemplo en este caso:

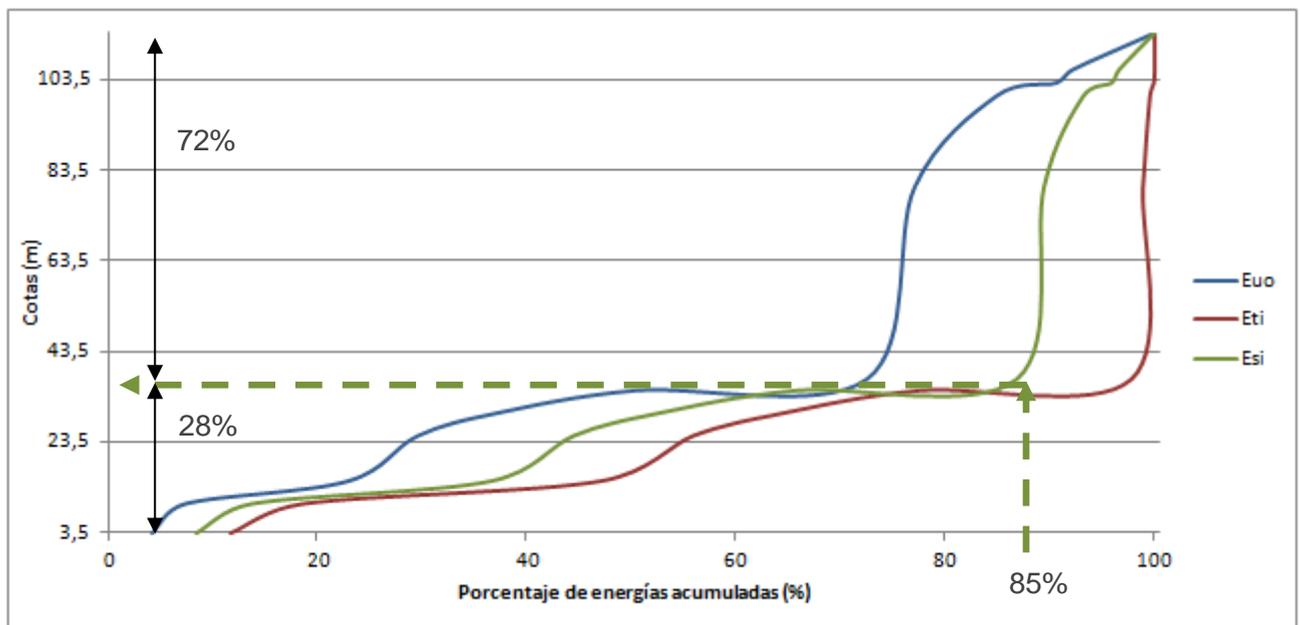


Figura A1-35: Resultados del Diagnóstico energético. Gráfica de porcentaje de energías acumuladas

Se puede observar cómo más del 80% de la energía que requiere el sistema se debe a las cotas más bajas de la red. Por tanto es importante prestar atención a este hecho, toda la energía que requiere el sistema se concentra en la parte baja y no únicamente la energía topográfica como cabría esperar (dado que la energía topográfica que requieren los nudos más bajos siempre será más crítica que la de los nudos altos, pues la energía topográfica es la energía que se requiere inyectar en el sistema para dar servicio al nudo más alto). En este caso el mayor porcentaje de los dos términos (mínima requerida por los usuarios y topográfica se concentra en la zona baja, es decir en el 28% inferior de la red, es en estos nudos donde debe prestarse atención, y tratar de encontrar configuraciones más favorables desde el punto de vista de la topografía del terreno.

Se presenta a continuación otro ejemplo de distribución de volúmenes sobre el mismo caso práctico con el objetivo de comprender mejor la información que aporta este tipo de gráficas. Si sobre la misma red (mismas cotas) existiera una distribución de caudal más uniforme, la situación sería diferente.

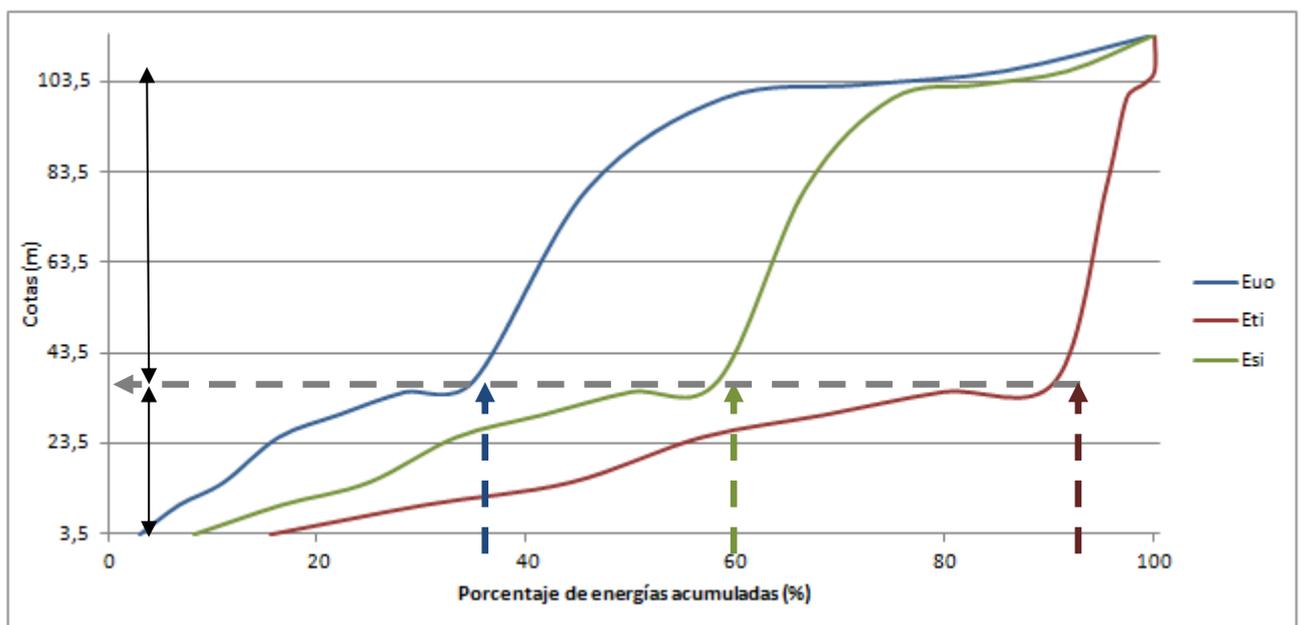


Figura A1-36: Ejemplo gráfica de porcentaje de energías acumuladas

En este caso, por ejemplo, en el mismo rango de cotas bajas (28% inferior de la red) se concentra ahora únicamente el 58% de la energía total a suministrar, mientras que sólo el 35% se debe a la propia demanda de esos usuarios (E_{uo}) y el 90% es consecuencia de la energía que demandan los usuarios más altos (E_{ti}).

A1.4.1.6. Preauditoría y energías objetivo

Por un lado, se obtiene los valores de la preauditoría, es decir la estimación de cada una de las pérdidas de energía asociada a su causa. Así, en este caso se observa que del total de la energía perdida se estima que más del 56% se debe a las ineficiencias en la estación de bombeo, mientras que el 30% es debida a las pérdida de agua. Por tanto, estos valores ofrecen una visión general y aproximada, pero permiten identificar los procesos más ineficientes del sistema, de manera que pueden convertirse en el punto de partida.

PASO 6: PREAUDITORÍA - OBJETIVO		
Contribución de las pérdidas por exceso de presión evitable sobre las totales	8,83%	%
Contribución de las pérdidas por fugas sobre las totales	30,53%	%
Contribución de las pérdidas en el bombeo sobre las totales	56,89%	%
Contribución de las pérdidas en tuberías sobre las totales	3,75%	%

Figura A1-37: Paso 6. Obtención de la Preauditoría

La segunda parte de esta misma hoja, permite a partir de la preauditoría estimar los ahorros (energéticos y económicos) que supondrían la mejora tanto de los grupos de presión como la reducción del volumen fugado. En este ejemplo, en el caso de reducir el agua no registrada de manera que el rendimiento hidráulico del sistema aumente del actual 55,79% a un rendimiento mejorado del 75%, el ahorro energético total sería aproximadamente del 12% y también se ofrece el ahorro económico asociado a la disminución del caudal fugado.

PASO 6: PREAUDITORÍA - OBJETIVO			
Nivel de pérdidas actual	55,79	%	
Potencial ahorro solo por disminuir las fugas	108.100,58	€/ año	
FUGAS	Nivel de pérdidas objetivo	75	%
	Energía objetiva perdida por FUGAS ($E_{f,o}$)	316.556,89	kWh / año

Figura A1-38: Paso 6. Cálculo de las energías objetivo (fugas)

Se sigue el mismo proceso para estimar el ahorro energético y económico que supondría mejorar el rendimiento de la estación de bombeo. Por ejemplo, mejorar el rendimiento de la estación de bombeo desde el 57,59% actual hasta un 70%, supondría un ahorro energético total de más del 19%, únicamente por la mejora del rendimiento. El ahorro energético sería mayor si al hecho de aumentar el rendimiento de la estación de bombeo se une la reducción del volumen inyectado

(mejora del rendimiento volumétrico anterior), es decir, uniendo ambas acciones en la estación de bombeo se podría llegar a ahorrar hasta un 24% de la energía total.

PASO 6: PREAUDITORÍA - OBJETIVO			
	Rendimiento global EB actual	57,59	%
	Potencial ahorro solo por modificar el rendimiento de la bomba	85.426,67	€/ año
ESTACIÓN DE BOMBEO	Rendimiento objetivo medio EB	70,00	%
	Energía objetiva perdida por BOMBEO ($E_{p,o}$)	542.090,87	kWh / año

Figura A1-39: Paso 6. Cálculo de las energías objetivo (estación de bombeo)

Por último, combinando todas las acciones: reducción del volumen fugado, mejora del rendimiento de la estación de bombeo, y pérdidas por fricción mínimas, la energía de entrada al sistema podría reducirse de los actuales 3.531.056 kWh/año a un objetivo de 1.962.887 kWh/año. Aumentando el rendimiento del sistema del actual 0,14 a 0,24, un valor intermedio más cercano al valor ideal (inalcanzable) de 0,41.

La herramienta también ofrece estos resultados de forma gráfica.

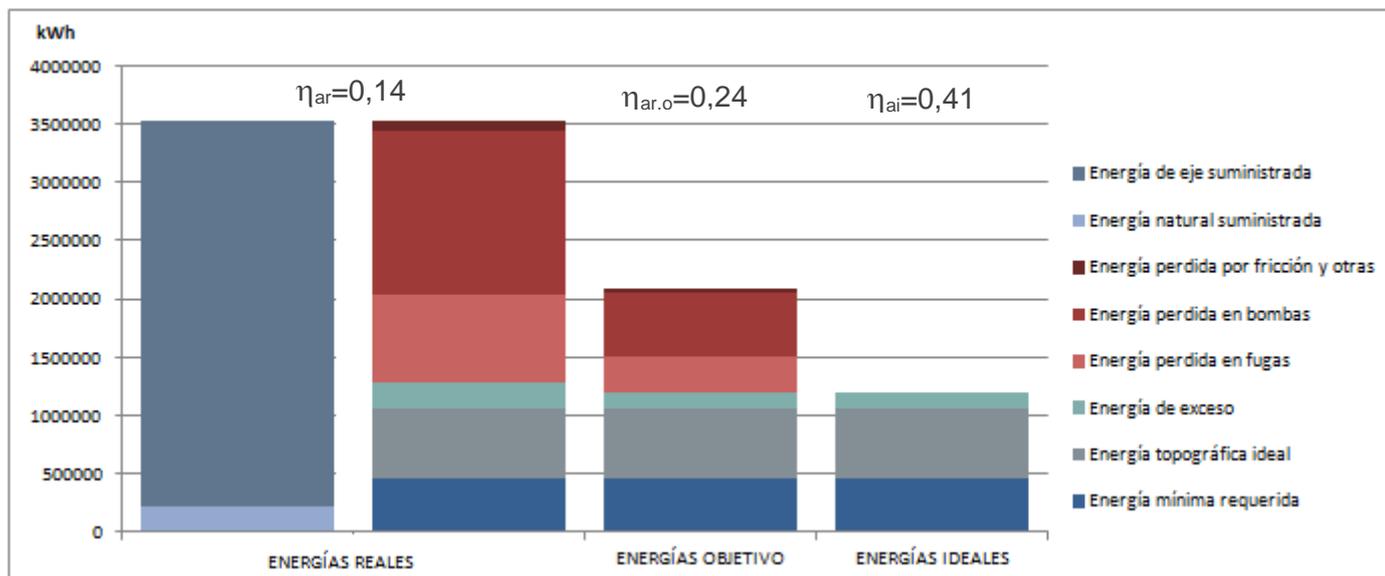


Figura A1-40: Gráfica de distribución de energías (real, objetivo e ideal)

Por tanto y a la vista de la gráfica anterior es posible analizar, tanto dónde van a parar las energías entregadas al sistema como dónde se puede producir el mayor ahorro. La energía requerida por los usuarios y la energía topográfica son energías invariantes, pues necesariamente son las energías que se deben entregar a los usuarios, bien para satisfacer su demanda bien para satisfacer las diferencias topográficas del sistema.

La energía de exceso, puede ser eliminada si se elimina el depósito de regulación (o en su defecto se bombea exactamente a la altura requerida). Pero sí se observa en la gráfica como su valor descende, desde el caso real al caso ideal. En el caso real es todo el volumen (demandado más fugado) el que se sobreleva por encima de la altura de necesaria, mientras que en el caso ideal (aunque siga siendo ineficiente), sólo se eleva el volumen demandado.

El resto de energías (pérdidas), inexistentes en el caso ideal, se muestran en el caso real y objetivo. En este ejemplo se puede observar cómo el mayor porcentaje de pérdida de energía se concentra en las ineficiencias en las bombas, y cómo se vería reducida en el caso de aumentar el rendimiento de los grupos de presión en algo más de 12 puntos.

A1.4.2 Ejemplo sistema riego

Se presenta a continuación el segundo de los casos de una forma más general que el caso anterior. Se trata de una red de riego con el siguiente esquema de funcionamiento y datos básicos:

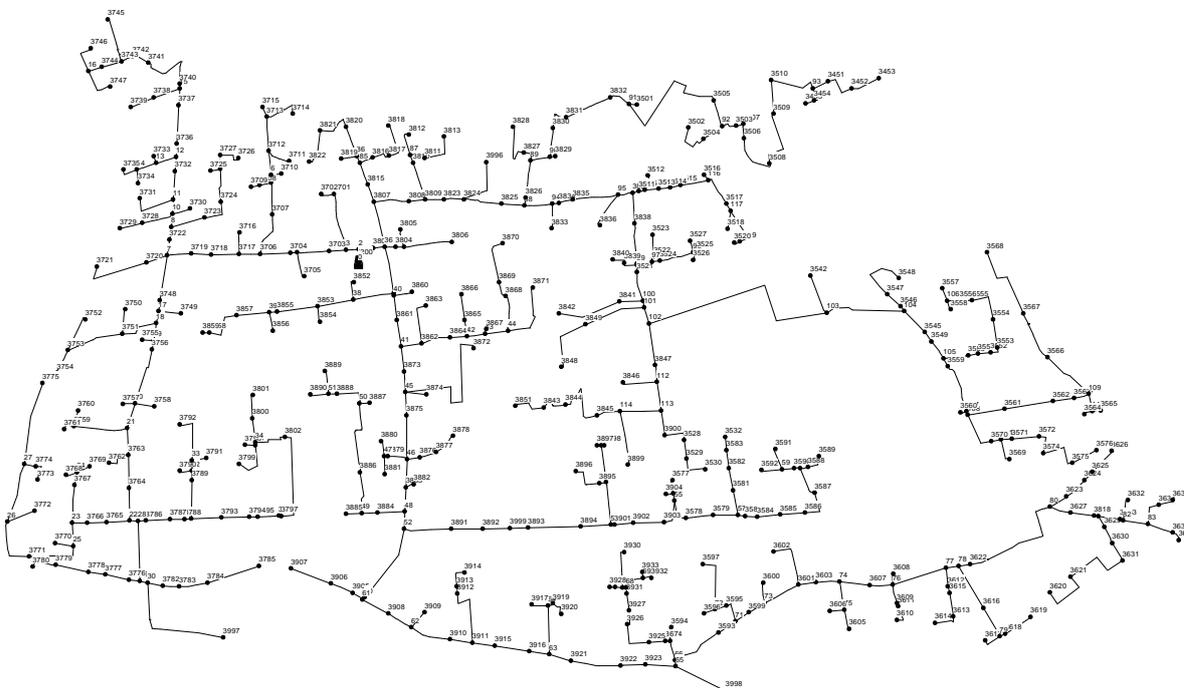


Figura A1-41: Esquema de funcionamiento caso 2.

Las principales características de esta red de riego (que ya se encuentra modelada en EPANET) son:

- Riego \equiv 125,51 días año
- $V=18.580 \text{ m}^3/\text{día}$ (entregado a los usuarios)
- $V+\Delta V = 19164 \text{ m}^3/\text{día}$ (inyectado al sistema), con $\Delta V = 584 \text{ m}^3/\text{día}$.
- Red nueva sin apenas fugas. El volumen inyectado ($2.405.260 \text{ m}^3/\text{año}$) y registrado ($2.332.019 \text{ m}^3/\text{año}$) casi coinciden. El cociente es 0,97.
- En este caso se conocen las cotas (z_i) y los consumos de cada uno de los nudos (V_i) en el intervalo de tiempo de referencia.
- Procedencia de la energía: natural (la cota de aspiración de las bombas es superior a la cota del punto de consumo más bajo) y de bombeo.
- Cota máxima, $z_m = 35,53 \text{ m}$; cota mínima $z_l = 14,39 \text{ m}$; cota de aspiración $z_p = 25 \text{ m}$
- Presión requerida, $p_o = 20 \text{ m}$.

La estación de bombeo se encuentra en el centro de la red. La energía de eje que el sistema aporta, $E_{sr,p}$, se conoce por los recibos de la compañía eléctrica. Por otra parte la energía natural que se aporta al sistema se determina a partir de la cota media del depósito de aspiración (z_p) de la bomba que es de 25 metros.

A partir de estos datos básicos se obtiene el diagnóstico energético del sistema. Los pasos a la hora de utilizar EAGLE son idénticos al ejemplo anterior.

1. Identificación de la **Tipología** del sistema.

En este caso es una TIPO 2, dado que es una red con bombeo en directo.

2. Introducción de los datos de **Caracterizan** el sistema

Se elige el periodo de tiempo del análisis (año) y el tipo de abastecimiento (RIEGO). Se habilita entonces la introducción de datos como la superficie a regar, los km de red o el tipo de cultivo.

PASO 2. CARACTERIZACIÓN			
Período de análisis		<input type="text" value="AÑO"/>	
Tipo de abastecimiento		<input type="text" value="RIEGO"/>	
Datos básicos del sistema de riego	Superficie	<input type="text" value="2.000,00"/>	hectáreas
	Hidrantes	<input type="text" value="477,00"/>	hidrantes
	km de red	<input type="text" value="55,40"/>	km
	Tipo de cultivo	<input type="text" value="Cítricos"/> <ul style="list-style-type: none"> Cereales para grano Maiz y sorgo Hortalizas Frutales no cítricos Arroz Vid 	
Volumen inyectado		<input type="text" value="2.405.114,00"/>	m3 / año
Dotacion		<input type="text" value="1.202,56"/>	m3 / ha / año
Factor de emisión (mix eléctrico)		<input type="text" value="0,187"/>	kg CO2 / kWh

Figura A1-42: Paso 2. Caracterización de un sistema de riego

En este caso y a diferencia del caso urbano la dotación se calcula en m³/ha · año. En el caso del riego no es tan inmediato definir si la dotación es excesiva o se encuentra dentro de los márgenes esperados, dado que la necesidad de agua depende de muchos factores como el tipo de cultivo, el terreno, la climatología, la época del año, etc. Por tanto, la herramienta en este caso estima el valor de referencia de dotación máxima deseable en función del tipo de cultivo y la dotación neta promedio de diferentes demarcaciones en varias conferencias hidrográficas. Obviamente, independientemente del valor que arroje la herramienta de dotación máxima aconsejable es el propio sistema el que debe valorar si existe exceso de agua para las condiciones específicas en las que trabaja.

Los datos básicos del sistema tal como se han presentado al inicio del caso son los que se muestran en la Figura A1-43. En este caso, además de todos los datos de los hidrantes (cota y volumen) se debe introducir únicamente el valor de la cota de aspiración de la bomba.

3. Introducción de los datos de la red y elementos del sistema. **Configuración.**

PASO 3. CONFIGURACIÓN			
Volúmenes	Volumen inyectado	2.405.114,00	m ³ / año
	Volumen registrado	2.331.821,12	m ³ / año
Pérdidas de agua	Pérdidas de agua por longitud	0,1510	m ³ / km / h
	Rendimiento volumétrico	96,95%	%
Topografía del sistema	Cota de aspiración de la bomba (Zp)	25	msnm
	Cota máxima (Zh)	35,53	msnm
	Cota mínima (Zl)	14,39	msnm
	Cota promedio ponderada (Zj)	23,90	msnm

Figura A1-43: Paso 3. Configuración

Como se dispone del modelo de la red en EPANET es posible copiar directamente la información de cota y demanda base de los nudos y pegarla en las filas habilitadas para ello, únicamente se requiere indicar primero la cantidad de nudos que se van a introducir. Como directamente se ha copiado la información de demanda base definida en EPANET, se puede seleccionar como unidad de demanda l/s, no se requiere hacer ningún cambio de unidades previo a la introducción de los datos en EAGLE.

De nuevo, al seleccionar la Disponibilidad de datos con más detalle (Opción 1), la herramienta calculará la cota media ponderada con el consumo. Al analizar el diagnóstico, se ofrece una comparativa en función el grado de detalle.

4. Introducción de los **datos energéticos** del sistema

El único dato requerido para realizar el diagnóstico energético del sistema es la energía consumida por la bomba, en este caso, 732.098 kWh/año. Si además se conoce la altura aportada por la bomba, es posible obtener una valoración de la eficiencia de la estación de bombeo a partir del valor del rendimiento global y de la intensidad energética.

PASO 4. DATOS ENERGÉTICOS

ID EB	Altura aportada por la bomba m	Volumen bombeado por la EB m ³ / año	Energía consumida por la EB kWh / año	Rendimiento estimado de la EB %	Intensidad energética actual de la EB kWh / m ³ / 100 m	Importe de la factura eléctrica € / año
1	80	2.405.114,00	732.098,00	71,62	0,380	102.038,00

Figura A1-44: Paso 4. Datos energéticos

Es importante destacar, que en un análisis clásico de la eficiencia energética del sistema dónde únicamente se valore la eficiencia del grupo de bombeo, este sistema sería adecuado e incluso eficiente, pues posee un valor de rendimiento del grupo razonable (71,62%) y una intensidad

energética (0,38 kWh/ m³/ 100m) por debajo del valor estándar. Tal como se verá a continuación este sistema tiene un amplio margen de mejora, a pesar de que a priori dado el elevadísimo valor de rendimiento volumétrico (97%) y el aceptable dato de rendimiento de la bomba (71,62%) no cabe esperar que este sistema sea mejorable.

5. Análisis de los valores aportados por el **diagnóstico**

Según los datos introducidos, el resultado del diagnóstico energético es claro. El rendimiento ideal del sistema es elevado (0,72) lo que indica que dado que no hay depósito de regulación el complementario del rendimiento ideal (0,28) es el porcentaje que se debe a energía topográfica. El valor destacable es la diferencia significativa entre el rendimiento ideal (0,72) y el rendimiento real (0,23), que indica que el margen de mejora del sistema es de $0,72 - 0,23 = 0,49$. Más del doble del rendimiento actual (y esto a pesar de que los valores aislados de rendimiento volumétrico y rendimiento de la bomba son adecuados).

PASO 5. DIAGNÓSTICO			
Energías ideales	Energía mínima requerida por los usuarios (E _{uo})	187.525,99	kWh / año
	Energía topográfica ideal (E _{ti})	73.886,32	kWh / año
	Energía de exceso (E _{ei})	0,00	kWh / año
	Energía mínima suministrada ideal (E _{si} = E _{uo} + E _{ti} + E _{ei})	261.412,30	kWh / año
Energías reales	Energía natural suministrada (E _{sr,n})	69.537,26	kWh / año
	Energía de eje suministrada (E _{sr,p})	732.098,00	kWh / año
	Energía suministrada total (E _{sr} = E _{sr,n} + E _{sr,p})	801.635,26	kWh / año
Rendimientos	Rendimiento ideal del sistema (η _{ai})	0,72	
	Rendimiento real del sistema (η _{ar})	0,23	

Figura A1-45: Paso 5. Análisis de los datos obtenidos en el Diagnóstico

En este caso la gráfica de energías acumuladas es más homogénea que en el ejemplo anterior, esto se debe en primer lugar a que existen más datos entre los que interpolar la curva de energías y por otro a que la topografía del terreno en este caso no es tan irregular (21 metros entre el nudo más bajo y más alto, prácticamente la presión de servicio).

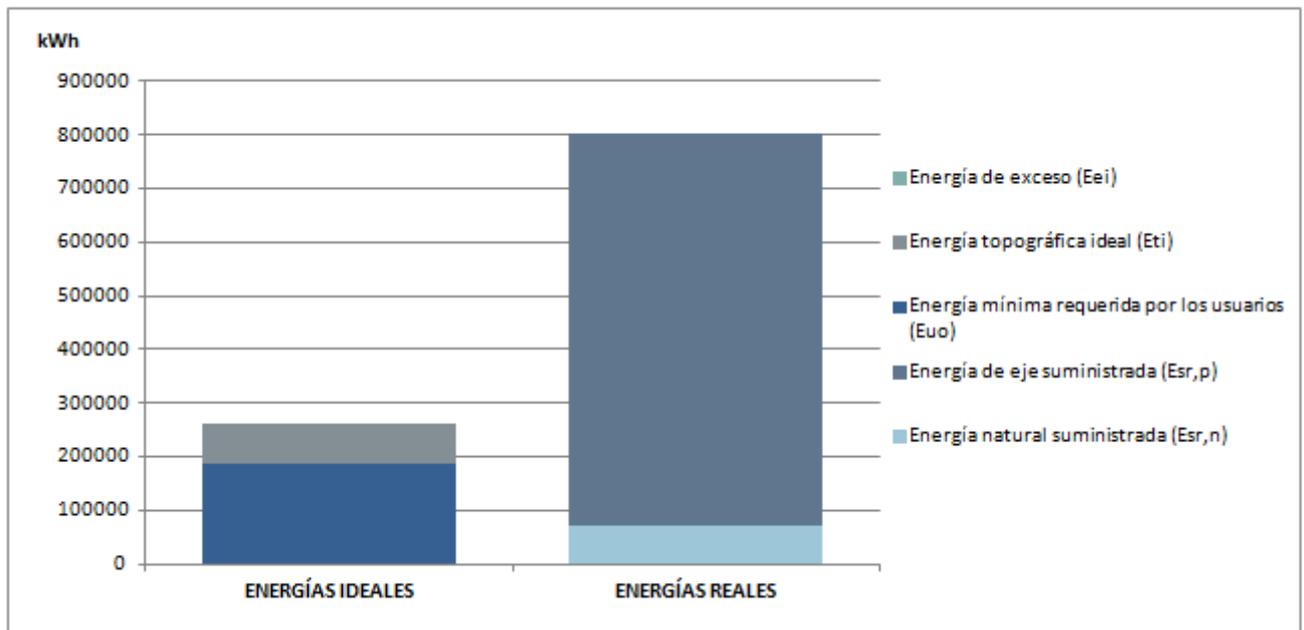


Figura A1-47: Gráfica de distribución de energías caso 2

6. Análisis de los valores aportados de la **preauditoría** y definición de **objetivos**

A la vista de los valores aportados por la preauditoría se puede estimar dónde se producen las principales pérdidas.

PASO 6: PREAUDITORÍA - OBJETIVO					
PREAUDITORÍA	EXCESO DE PRESIÓN	Energía de EXCESO (E_{ex})	324.223,20	kWh / año	
	FUGAS	Energía perdida por FUGAS (E_{f})	6.316,83	kWh / año	
	ESTACIÓN BOMBEO	Energía perdida en EJE (E_{e})	207.783,15	kWh / año	
	FRICCIÓN + OTROS	Energía perdida por FRICCIÓN y OTRAS ($E_{f} + E_{o}$)	1.899,78	kWh / año	

Figura A1-48: Paso 6. Análisis de los datos de la preauditoría

A pesar que el sistema no cuenta con depósito a la entrada de la red, sí existe presión de exceso real, dado que la bomba está suministrando una altura de 80 metros. La altura mínima requerida por el sistema es igual a la cota del nudo más desfavorable (35,53 metros) más la presión de servicio (20 mca), es decir 55,53 metros. En el caso real, la altura suministrada por la bomba debe ser superior a este valor ideal pues existen pérdidas de carga en el trayecto desde la bomba hasta el nudo más desfavorable, pero la altura por la bomba en este caso es excesiva y provocará exceso de presión en la red.

Por tanto se requiere si se desea mejorar el sistema replantear cómo se está suministrando la energía a la red. Al tratarse de una red de riego, existen diferentes alternativas que deben ser al menos consideradas, como son el riego por turnos o programado. Esta opción puede permitir adaptar mejor el punto de funcionamiento de la estación de bombeo y por tanto evitar las ineficiencias que se están dando en el sistema, y que se muestran en la siguiente gráfica. El rendimiento objetivo con la disminución de las pérdidas energéticas que se cuantifican en la gráfica puede llegar a alcanzar un valor de 0,5 (muy superior al actual 0,23).

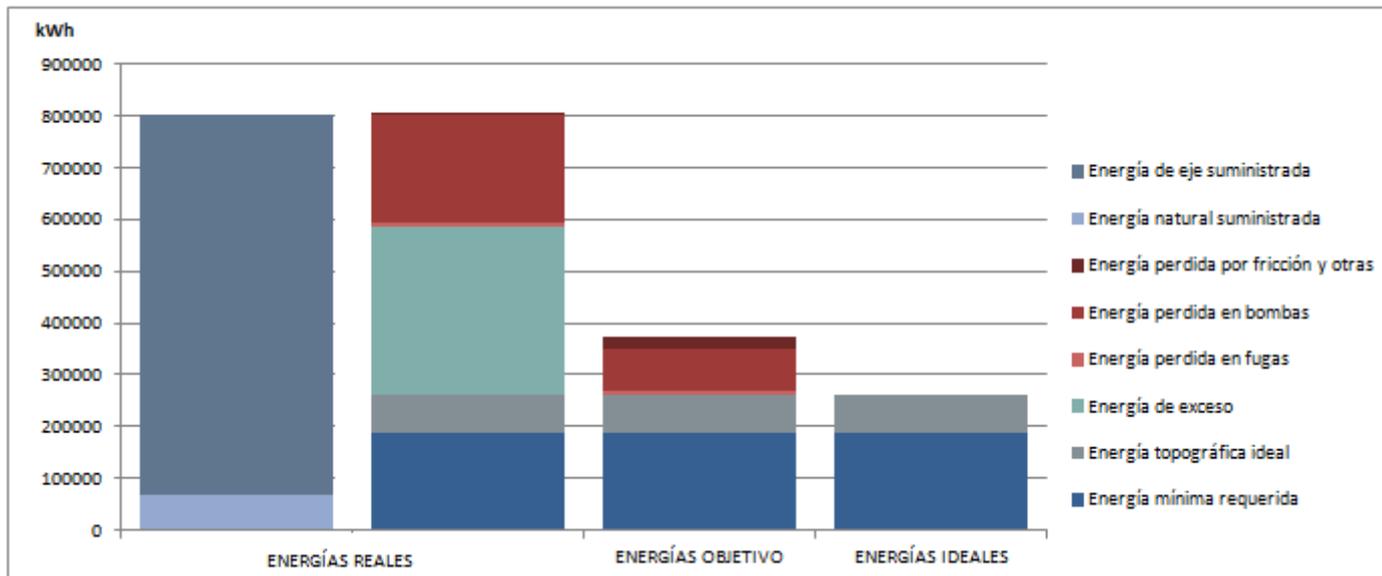


Figura A1-49: Gráfica de distribución de energías ideales, reales y objetivo caso 2

En este caso concreto, es importante tal cual se ha dicho, estudiar diferentes operaciones de funcionamiento de los grupos de presión. Así por ejemplo, organizando los turnos de riego por sectores de elevación podrían definirse tres puntos de funcionamiento diferenciados, todos ellos con un volumen menor que el global (un tercio) y una altura ajustada al nudo más desfavorable de cada sector, evitando de este modo parte de la energía topográfica, y por supuesto evitando aportar más altura que la necesaria.

Anexo 2

Manual de usuario de ITAFugas

A2.1 ITAFugas

ITAFugas es un software libre de uso particular, esto es, está disponible para quien lo solicite pero no existe un mecanismo de distribución como tal, ni publicidad del mismo. Este software surge como una necesidad de disponer de una herramienta que permita introducir las fugas en los modelos de EPANET de una forma relativamente rápida, y por supuesto dependientes de la presión. Para ello se requiere el cálculo del coeficiente emisor de los nudos del modelo, lo que implica tal como se ha comentado en el Capítulo 4 un proceso de cálculo iterativo, dado que el caudal fugado depende de la presión, y la presión disponible en los nudos depende del caudal que circule por las tuberías.

Este software está basado en la evaluación de las fugas a partir de la simulación de la red en periodo extendido (Almandoz et al., 2005). El objetivo de ITAFugas es estimar los coeficientes emisores de los nudos que modelan las fugas en una red de abastecimiento. La principal ventaja de éste es que es capaz de definir un coeficiente emisor diferente para cada nudo en función de su presión, con el objetivo de que el caudal medio a la entrada de la red coincida con el caudal medio inyectado.

Los únicos datos que se requieren son:

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

El fichero de entrada no tiene limitaciones en cuanto al tamaño de la red a analizar en ITAfugas, la única limitación es la impuesta por la visualización de la red, obviamente cuantos más elementos tiene más tiempo tarda en cargarse.

A2.2 Ejemplo de aplicación

Se presenta a continuación un ejemplo muy sencillo con el objetivo de presentar la funcionalidad y manejabilidad del software. Se trata de una red ficticia creada para este ejemplo. Supongamos la siguiente red:

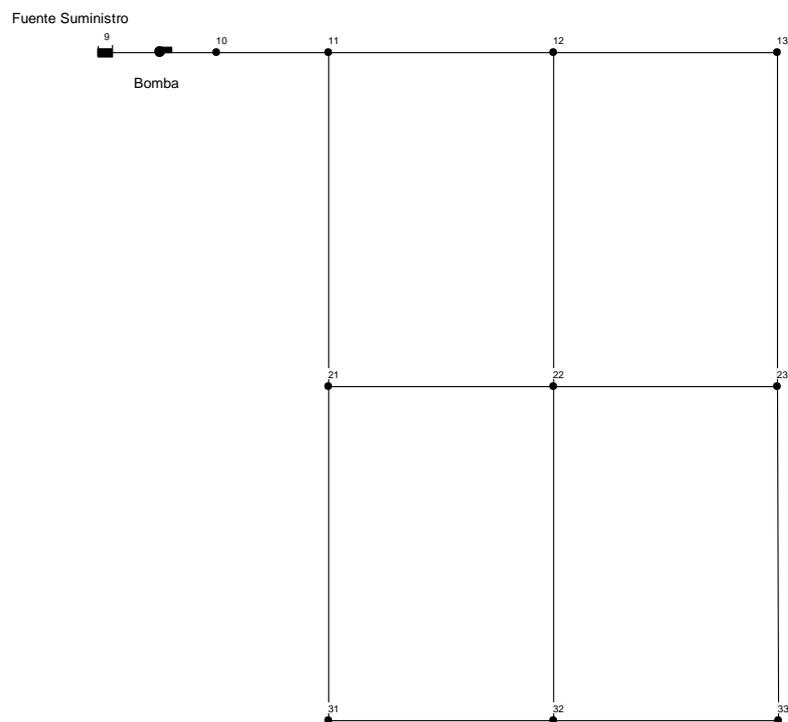


Figura A2-1: Esquema de la red del Ejemplo 1.

Las propiedades de los nudos de la red son los que se muestran en la tabla siguiente. El resto de elementos y propiedades que condicionan el cálculo hidráulico no se presentan, pues no condicionan los datos de entrada para el cálculo de los emisores en los nudos:

Tabla A2-1: Datos de los nudos del ejemplo.

Nudo	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Emb.
Cota (m)	20.8	20.8	34	32	33	32	30	31	30	30	5
Demand a base (l/s)	0	5	5	3	4	8.5	4	2	5	2	-

Por tanto, el volumen facturado correspondiente a la suma de todas las demandas base introducidas en los nudos es 38,5 l/s (99.792 m³/mes).

Conocido el volumen inyectado (142.560 m³/mes) o el rendimiento volumétrico de la red (70%), aquí el programa permite aplicar dos métodos complementarios (uno se encuentra englobado dentro del otro) para contemplar las pérdidas de agua tanto aparentes como reales en el modelo. La elección de un método u otro dependerá de si se conoce la modulación de la inyección.

A2.2.1 Método de los nudos:

- Volumen facturado: 99.792 m³/mes
- Volumen inyectado: 142.560 m³/mes
- Rendimiento volumétrico: 70%

Se estima del total del 30% de pérdidas en la red cuánto se corresponde con pérdidas aparentes y cuánto con pérdidas reales. Si por ejemplo, se supone que el caudal incontrolado se distribuye en 80% incontrolado fugado y 20% incontrolado consumido.

Método nudos

% Vol. incontrolado asociado a fugas	80	34214.4 m ³ /m
% Vol. incontrolado asociado a consumo	20	8553.6 m ³ /me
Kf Inicial	0,38	

Figura A2-2: Distribución supuesta del caudal incontrolado.

Lo que hace el programa es distribuir todo el caudal incontrolado consumido entre los nudos aumentando la demanda base de éstos, pues este caudal se supone que se consumirá con la misma evolución diaria que lo hace el caudal registrado (curva de modulación). En este caso, las nuevas demandas en los nudos son:

Tabla A2-2: Demandas mayoradas con el caudal incontrolado consumido.

Nudo	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	TOT AL.
Demanda base inicial (l/s)	0	5	5	3	4	8.5	4	2	5	2	38,5
Demanda base ampliada (l/s)	0	5,428	5,428	3,257	4,342	9,228	4,342	2,171	5,428	2,171	41,8

Demanda base inicial (l/s)	Demanda base ampliada (l/s)
99.792 m ³ /mes (caudal registrado)	108.345,6 m ³ /mes (caudal registrado + caudal incontrolado consumido)

Una vez ampliadas las demandas, en el modelo que contemplar el caudal fugado, para ello se calcula una K inicial para todos los nudos a partir de una presión media supuesta en la red, ésta K inicial sólo sirve para inicializar la iteración. Así por ejemplo si se supone una presión media de 40 mca, la K inicial será 0,23:

$$Vol. fugado = 34.214,4 \frac{m^3}{mes} = 13,2 \frac{l}{s}$$

$$Q_f = K \cdot P^\gamma \rightarrow 13,2 = K \cdot 40^{1,1} \rightarrow K = 0,23$$

Una vez estimado el K inicial, el siguiente proceso es distribuirlo entre los nudos de la red, la primera iteración la realiza a través de la longitud ponderada de cada nudo, es decir asumiendo que cuanto más longitud de tubería confluye en cada nudo, más posibilidad tiene de fugar. Por tanto el k_i inicial para cada nudo será:

$$k_i = K \cdot L_{ponderada}$$

A partir de este momento se inicia el cálculo. El proceso consiste en ir modificando el k_i de cada nudo hasta que el caudal inyectado en el modelo coincida con el caudal medio inyectado en la red. Una vez que la solución converge, el programa devuelve un .inp de la red con las demandas aumentadas en función del caudal incontrolado consumido y un coeficiente emisor en cada nudo, de forma que el caudal medio de entrada al modelo coincida (con una tolerancia fijada por el usuario) con el caudal medio inyectado en la red.

Para este ejemplo, el resumen de cálculo es:

Duración de la simulación: 1 días
 Intervalo de cálculo de la simulación = Cada minuto
 Emitter exponent = 1,1
 Volumen facturado = 99792
 Volumen inyectado = 142560
 Porcentaje fugas = 80%
 Caudal promedio calculado para k=0,2
 Caudal inyectado = 55
 Caudal promedio calculado para k=0,2 - Caudal: 53,96456
 Caudal promedio calculado para k=0,20383749037305 - Caudal: 54,15022
 Caudal promedio calculado para k=0,207036303736247 - Caudal: 54,30381
 Caudal promedio calculado para k=0,209690566470539 - Caudal: 54,43044
 Caudal promedio calculado para k=0,211884786840298 - Caudal: 54,53474
 Caudal promedio calculado para k=0,213692467965971 - Caudal: 54,62025
 Caudal promedio calculado para k=0,215178187722201 - Caudal: 54,69021
 Caudal promedio calculado para k=0,216397045063103 - Caudal: 54,74767

Si se simula el nuevo modelo que devuelve el programa, el promedio de la suma de la demanda de cada nudo a cada hora, consecuencia del caudal consumido (demanda base más incontrolado consumido) y el caudal fugado por cada nudo (coeficiente emisor por presión) coincide con el caudal medio inyectado:

$$\text{Caudal medio inyectado} = 142.560 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} = 55 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$\text{Caudal medio modelo} = \frac{\sum_{h=1}^{\text{horas}} \sum_{n=1}^{\text{nudos}} Q_{i,h}}{\text{horas}}$$

En el nuevo modelo el promedio de la suma de todos los caudales que salen de cada nudo (consumido + fugado) es 54,75 l/s prácticamente el valor del caudal medio inyectado en la red 55 l/s.

A2.2.2 Método de la X:

En el caso de conocer la evolución del caudal inyectado es posible utilizar esta evolución para calcular la desagregación del caudal incontrolado. A continuación, se expone un ejemplo sobre un sector de un abastecimiento, si bien el rendimiento volumétrico de este sector es muy elevado, sirva el caso práctico que a continuación se presenta como ejemplo de aplicación del método.

Método X

Qiny (promedio)

Desviación típica

Vol. inyectado mensual (m³/mes)

Vol. incontrolado mensual (m³/mes)

Iteración múltiple Interacción única

Porcentaje inicio

Porcentaje

Figura A2-3: Elección del método de la X.

La siguiente gráfica muestra la evolución del caudal inyectado en el sector:

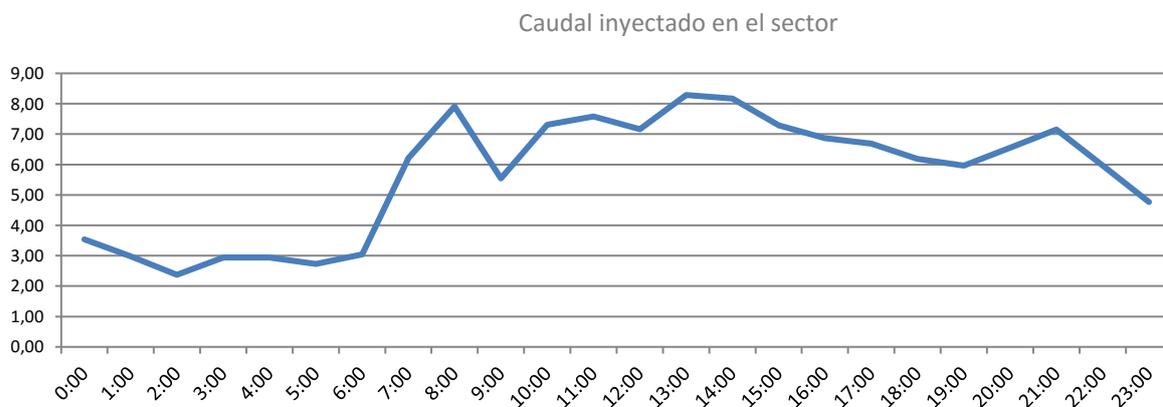


Figura A2-4: Evolución temporal del caudal inyectado.

A efectos de los cálculos que siguen a continuación, dicho caudal queda representado por sus dos valores siguientes:

- Valor medio: $\bar{Q} = 5,672 \text{ l/s}$
- Desviación típica: $\sigma (Q) = 1,973 \text{ l/s}$

El cálculo del caudal registrado, Q_r ; resulta inmediato a partir de los datos de los abonados. Su valor medio obtenido a partir de las demandas base introducidas en los nudos del sector es

$\overline{Qr}=5,2511$ l/s. Por otro lado el caudal incontrolado se obtiene a partir de la diferencia entre el caudal inyectado y el registrado:

$$\overline{Q_i} = \overline{Q} - \overline{Qr} = 5,672 - 5,251 = 0,421 \text{ l/s}$$

Como resultado complementario en este primer nivel del balance hídrico resulta el rendimiento global del sector:

$$\eta_{st} = \frac{\overline{Qr}}{\overline{Q}} = 92,57\%$$

Se calcula entonces con ayuda de ITAFugas, todas las posibles distribuciones del caudal incontrolado, es decir desde 0,1 (10% caudal incontrolado consumido, 90% caudal fugado) hasta 1 (0% caudal incontrolado consumido, 100% caudal incontrolado fugado). Para cada uno de los modelos devueltos, independientemente de la x considerada el caudal medio consumido en la red coincide con el caudal medio inyectado (ese es el objetivo del proceso iterativo), lo que diferencia un modelo de otro es la desviación típica, así por ejemplo para este segundo ejemplo:

Tabla A2-3: Resultados de la simulación del modelo para cada valor de x.

Valores caudal inyectado en el modelo para cada valor de x											
Hora	Q (t) inyect.	Q' (t) mod. x=0,1	Q' (t) mod. x=0,2	Q' (t) mod. x=0,3	Q' (t) mod. x=0,4	Q' (t) mod. x=0,5	Q' (t) mod. x=0,6	Q' (t) mod. x=0,7	Q' (t) mod. x=0,8	Q' (t) mod. x=0,9	Q' (t) mod. x=1,0
0:00	2,98	2,76	2,78	2,8	2,83	2,84	2,87	2,89	2,91	2,93	2,95
1:00	2,37	2,47	2,49	2,52	2,54	2,56	2,59	2,61	2,64	2,66	2,68
2:00	2,93	2,44	2,46	2,48	2,51	2,53	2,55	2,58	2,61	2,62	2,65
3:00	2,94	2,44	2,46	2,48	2,51	2,53	2,56	2,58	2,61	2,63	2,65
4:00	2,72	2,4	2,42	2,45	2,48	2,49	2,52	2,55	2,58	2,59	2,62
5:00	3,04	3,6	3,62	3,63	3,65	3,66	3,68	3,7	3,71	3,73	3,74
6:00	6,22	4,62	4,63	4,64	4,64	4,66	4,66	4,68	4,68	4,68	4,7
7:00	7,91	6,86	6,85	6,84	6,84	6,82	6,82	6,81	6,79	6,79	6,78
8:00	5,54	8,15	8,13	8,11	8,1	8,07	8,05	8,04	8,02	8	7,99
9:00	7,31	7,25	7,24	7,23	7,21	7,2	7,19	7,18	7,16	7,16	7,14
10:00	7,59	7,73	7,71	7,71	7,69	7,67	7,66	7,64	7,62	7,61	7,6
11:00	7,16	7,27	7,25	7,25	7,23	7,22	7,2	7,2	7,18	7,17	7,16
12:00	8,29	7,67	7,65	7,63	7,63	7,61	7,59	7,58	7,57	7,55	7,53
13:00	8,17	7,75	7,73	7,71	7,7	7,69	7,67	7,65	7,64	7,63	7,61

14:00	7,29	7,38	7,36	7,35	7,34	7,32	7,31	7,3	7,29	7,27	7,26
15:00	6,87	7,53	7,52	7,51	7,49	7,48	7,46	7,45	7,43	7,42	7,4
16:00	6,68	7,6	7,59	7,58	7,56	7,55	7,54	7,52	7,51	7,49	7,47
17:00	6,19	7,54	7,53	7,51	7,5	7,48	7,46	7,45	7,44	7,43	7,41
18:00	5,96	6,59	6,59	6,58	6,57	6,56	6,56	6,55	6,54	6,54	6,53
19:00	6,56	5,68	5,68	5,68	5,68	5,68	5,67	5,68	5,68	5,68	5,68
20:00	7,15	5,99	5,99	5,99	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,97
21:00	5,96	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71	5,7	5,71	5,71	5,7
22:00	4,77	4,89	4,89	4,9	4,9	4,91	4,92	4,92	4,93	4,94	4,94
23:00	2,98	3,9	3,92	3,94	3,94	3,96	3,97	3,98	4	4,01	4,02
Q											
medio	5,672l/s	5,675	5,675	5,676	5,676	5,674	5,674	5,675	5,676	5,675	5,674
σ (Q)	1,973 l/s	2,07	2,06	2,04	2,03	2,01	1,99	1,998	1,96	1,95	1,93

A partir de los datos obtenidos es posible representar gráficamente los valores de σ' (Q) frente a x, tal y como se muestra en la siguiente figura, en la que se puede apreciar una tendencia lineal. Si se traza una línea horizontal correspondiente al valor de la desviación típica del caudal inyectado en este sector real: σ (Q)= 1,973 l/s, el punto en el cual esta línea horizontal corta a la curva de σ' (Q) señala sobre la vertical el “verdadero” valor de x en el sector. Dicho valor se sitúa, aproximadamente en $x= 0,75$.

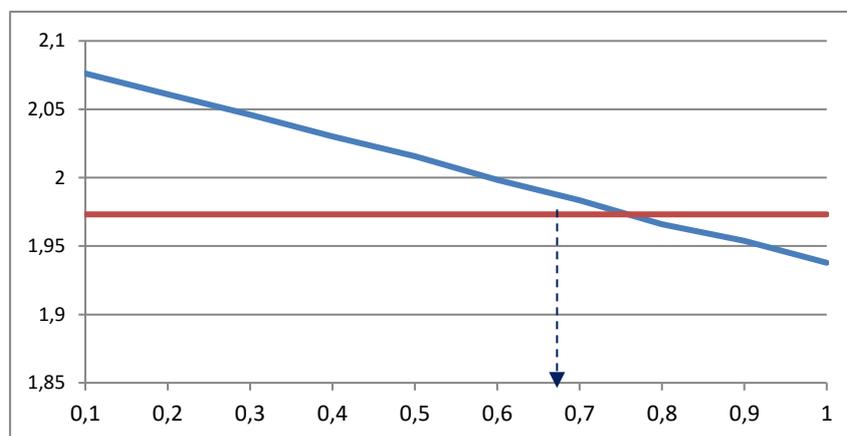


Figura A2-5: Representación gráfica de la desviación típica del modelo frente a la del caudal inyectado.

De este modo el segundo nivel del balance hídrico queda resuelto, concluyendo que del caudal incontrolado del sector el 75% se debe a fugas reales y el 25 % a fugas aparentes. Por tanto, el modelo con el que trabajar será aquel que considere esa desagregación y para la cual se habrá calculado los emisores.

Anexo 3

Manual de usuario de ITAEnergy

A3.1 Descripción del software

El objetivo principal de éste es permitir realizar la auditoria energética de una red de agua a presión a partir de su modelo matemático en EPANET.

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

A3.2 Conceptos

Se aplica la ecuación de la energía a un volumen de control limitado por una superficie atravesada por flujos hídricos y energéticos. El objetivo es determinar los flujos de energía por lo que previamente deben ser conocidos los flujos hídricos lo que exige haber resuelto el balance hídrico y disponer del modelo de la red calibrado. El volumen de control se puede definir según convenga en cada caso, de forma que los elementos que queden fuera del volumen de control definido contribuyen con energía de flujo, mientras que los integrados en el volumen de control pueden almacenar más o menos energía (depósitos) o disiparla (tuberías y válvulas). Las bombas al ser elementos externos al volumen de control aportan trabajo de eje, mientras que la superficie de salida del sistema la integran las acometidas de los usuarios (o hidrantes de la superficie de riego) y las fugas. Tal como se ha dicho, el modelo matemático de la red es imprescindible para conocer los flujos hídricos y energéticos a través de la superficie de control.

Los conceptos y consideraciones en los que se basa el presente software están desarrollados en el artículo publicado en 2010, Energy Audit of Water Networks. Algunos nuevos conceptos como la energía topográfica y el rendimiento ideal de una red se encuentran desarrollados en el artículo publicado en 2015, Energy Assessment of Pressurized Water Systems. Este diagnóstico energético cuenta con su propia herramienta (EAGLE), pero el software de auditorías energéticas también incluye los valores de estas energías e indicadores, con el objetivo de obtener una visión más global del sistema analizado.

Para obtener los valores de la auditoría energética de la red, únicamente se requiere del modelo matemático de la red en EPANET (archivo .inp). El software de auditorías no analiza el sistema, sino que únicamente utiliza los resultados de la simulación que proporciona EPANET para realizar los cálculos energéticos, esto significa que la validez de los resultados de la auditoría está sujeta a la validez del modelo, si éste no funciona correctamente (presiones negativas, bombas fuera de su rango de funcionamiento, válvulas cerradas, etc) los resultados energéticos serán igual de incorrectos, es objetivo del usuario validar el modelo previamente a la obtención de la auditoría.

A3.3 Variables y resultados de la auditoría energética.

A3.3.1 Introducción de valores

El único requisito para el cálculo de la auditoría energética es el modelo matemático de la red de estudio. Este modelo matemático debe estar calibrado y exento de errores, pues la auditoría se realizará independientemente de que los resultados de la simulación en EPANET sean correctos o no.

Una vez abierto el .inp (archivo de EPANET), es posible seleccionar los parámetros de tiempo de la simulación, tanto la duración de ésta como el intervalo de cálculo. Estos parámetros son más críticos cuando existen depósitos, pues por un lado el ciclo de llenado y vaciado del depósito no necesariamente coincidirá con el tiempo de simulación, éste puede ser superior o inferior además cuanto menor es el tiempo de simulación (tiempos de análisis cortos) mayor es la energía de compensación con respecto al resto de energía, sin embargo para periodos de simulación largos, la influencia del depósito con respecto a las energías globales es menor. Se estima que para considerar despreciable la energía de compensación con respecto al resto de energías ésta debe suponer un porcentaje menor del 1%, lo que significa un tiempo de simulación de:

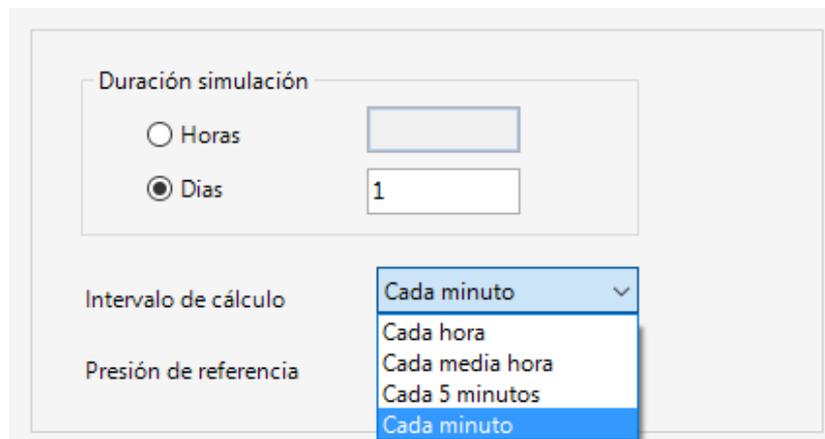
$$t_p(\text{días}) = \frac{\Delta E_{C,max}}{\frac{1}{100} \cdot E_{input}(\text{diario})}$$

Se puede considerar que a partir de este tiempo la simulación es a largo tiempo y la influencia del depósito es despreciable. Lógicamente cuando el sistema no dispone de este tipo de

elementos, el tiempo total de simulación no es un parámetro tan crítico, pues mientras su modulación horaria se mantenga (día a día), se supone un funcionamiento prácticamente idéntico entre los diferentes días, por tanto los resultados que se obtengan al día, serán extensibles al año, sin más que multiplicar los resultados.

Por otro lado, con respecto al otro parámetro temporal, el intervalo de cálculo, éste debería corresponderse con el paso hidráulico. De nuevo, la existencia de los depósitos hace más crítica esta elección, pues el instante de llenado y vaciado total de éste no necesariamente coincidirá con el intervalo de cálculo seleccionado, que por defecto será cuando se estime que va existir un cambio en las condiciones de funcionamiento, que en ausencia de depósito será igual al intervalo de las curvas de modulación, pues es el momento en el que cambia la demanda.

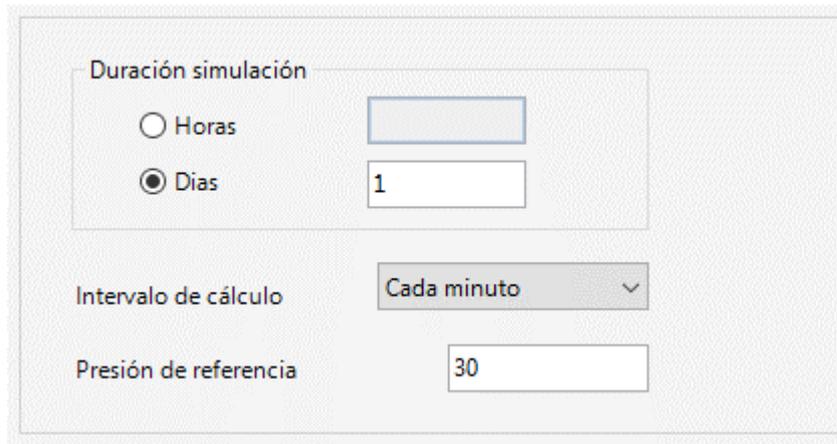
Estos dos parámetros pertenecen a la información propia del .inp, pues se indican en EPANET, pero por simplicidad y para permitir calcular diferentes escenarios temporales sin necesidad de modificar el inp, se incluyen como parámetros de cálculo a definir en el programa (Figura A3-1).



The image shows a software window titled "Duración simulación" (Simulation duration). It contains two radio buttons: "Horas" (Hours) and "Días" (Days). The "Días" option is selected, and a text box next to it contains the number "1". Below this, there is a dropdown menu for "Intervalo de cálculo" (Calculation interval) with a list of options: "Cada minuto" (Every minute), "Cada hora" (Every hour), "Cada media hora" (Every half hour), "Cada 5 minutos" (Every 5 minutes), and "Cada minuto" (Every minute). The "Cada minuto" option is currently selected and highlighted in blue. The label "Presión de referencia" (Reference pressure) is visible but does not have an associated input field in this view.

Figura A3-1: Ventana de selección de tiempos

La otra variable, que se puede definir y que no pertenece a las propiedades del modelo, pero que el usuario debe conocer sobre su sistema, es la Presión de referencia (Figura A3-2). Ésta es la presión mínima que se debe garantizar en todos los nudos de consumo en cualquier instante. A partir del valor de esta presión se podrá determinar si la red con las características de funcionamiento definidas incumple los criterios mínimos de funcionamiento (en algún momento la presión en algún nudo se encuentra por debajo de la presión de referencia), o si existen sobrepresiones, es decir a los usuarios se les suministra una presión superior a la mínima requerida (presión de referencia). Esta sobrepresión, se puede deber a la propia configuración espacial de la red, es decir para que el usuario crítico obtenga la presión mínima el resto de usuarios necesariamente tendrán sobrepresiones (energía topográfica) o a un exceso de energía, lo que indica que incluso el usuario más desfavorable obtiene presiones superiores a la de referencia (energía de exceso). Más adelante se vuelve sobre este concepto.



The image shows a configuration window for a simulation. It contains three main sections:

- Duración simulación:** A group box containing two radio buttons: "Horas" (unselected) and "Días" (selected). To the right of "Días" is a text input field containing the number "1".
- Intervalo de cálculo:** A dropdown menu currently displaying "Cada minuto".
- Presión de referencia:** A text input field containing the number "30".

Figura A3-2: Introducción de variables para el cálculo.

A3.3.2 Resultados obtenidos

A continuación se explica cada uno de los valores que se obtienen del software de la auditoría energética de un sistema de agua a presión, así como las consideraciones que se tienen en cuenta a la hora de obtener estos valores.

Una vez ejecutada la simulación, es posible ver los resultados del balance hídrico, la auditoría energética y una serie de indicadores energéticos que permiten analizar el estado del sistema.

Todos los resultados se ofrecen al cabo del tiempo de simulación definido, esto significa que si el tiempo de simulación total es un día, los resultados tanto de m³ como de kWh se ofrecen al cabo de un día, si se simulan 30 días se ofrecen los resultados por mes y si el tiempo se extiende a 365 días, los resultados son kWh/año. El resto de períodos se indican a partir de la cantidad de días simulados, por ejemplo m³/10 días.

A3.3.2.1. Balance hídrico:

Una vez calculada la auditoría, se ofrecen tres tablas de resultados. La primera de ellas se corresponde con el balance hídrico realizado a partir de la simulación del modelo matemático (Figura 4-9).

Los valores que se muestran en esta tabla se corresponden con:

Volumen inyectado: Volumen que se introduce en la red a través de las diferentes fuentes de agua, considerando como fuente de agua únicamente los embalses definidos en el modelo.

En el caso que exista más de un embalse se desglosa el volumen que se inyecta a través de cada uno de ellos.

VOLÚMENES m ³ /día	
Volúmenes del sistema	
	Volumen inyectado total
	Volumen consumido
	Volumen fugado
	Volumen almacenado en los depósitos
Indicadores del sistema	
	Rendimiento volumétrico
	Fugas por unidad de longitud
Error	
	Error en el balance volumétrico

Figura A3-3: Tabla de resultados del Balance Hídrico

Volumen consumido: Volumen que se entrega a los nudos de consumo. Se calcula a partir de la demanda base en cada nudo y el factor multiplicador de la curva de modulación.

Volumen fugado: Es el volumen que escapa de la red a través de los emisores que se han definido en el modelo, y que se considera igual al volumen fugado real del sistema. La forma de simular el caudal fugado en un modelo matemático de una red de agua a presión es como una descarga a la atmósfera ($Q_f = K \cdot p^\gamma$, donde K es el coeficiente emisor del nudo (mayor cuanto mayor se suponga el caudal fugado por las tuberías que confluyen en el nudo); p , es la presión en el nudo, y γ es el exponente emisor (el mismo para toda la red y que caracteriza la influencia del material de las tuberías sobre el caudal fugado según las variaciones de presión). En el caso que la red no contenga emisores, el volumen fugado será cero.

Volumen almacenado en los depósitos: Es la diferencia entre el volumen inicial en los depósitos (función de la sección y del nivel inicial) y el volumen final (función de la sección y del nivel final). Obviamente, esta variación puede considerarse un volumen inyectado en el caso que el nivel final sea menor que el inicial (signo positivo) o un volumen consumido (signo negativo) si el nivel final es superior al inicial, pues además de suministrar agua a los nudos de consumo se ha llenado el depósito. Por tanto este volumen se puede sumar al volumen consumido o al volumen inyectado.

Rendimiento volumétrico: Es un indicador del estado de la red desde el punto de vista de los caudales circulantes. Se calcula como el cociente entre el total del volumen consumido entre el total del volumen inyectado. La diferencia entre ambos valores son las fugas, por lo que cuanto

menor sea este valor peor es el estado de la red desde la óptica de las pérdidas de agua. El valor del agua almacenada en los depósitos se suma o se resta al volumen consumido según este se haya llenado o vaciado durante el tiempo de la simulación.

Fugas por unidad de longitud: Se aporta otro indicador del estado de la red desde el punto de vista de las pérdidas de agua. Éste se calcula a partir del total del volumen fugado, los km de red (obtenidos como suma de todas las longitudes de las tuberías en el modelo) y el tiempo de simulación. Las unidades en las que se muestra este indicador serán $\text{m}^3/\text{km}\cdot\text{h}$.

Error cometido en el balance volumétrico: Se trata del error porcentual del balance, dado que el volumen de entrada (inyectado) debe ser exactamente igual al de salida (consumido) cualquier valor que no cumpla con esta igualdad se puede considerar un error. Este error está muy condicionado de nuevo a la existencia de depósitos dentro de la red, pues si el intervalo de cálculo escogido no coincide exactamente con el paso hidráulico es posible que no se contemplen todos los valores de caudal que quedan entre intervalos de cálculo y que dependen del hecho de que el depósito llegue a su nivel máximo y por tanto se cierre su entrada o alcance su valor mínimo y por tanto se cierre la tubería de salida, si alguna de estas situaciones no se diera exactamente al finalizar el intervalo de cálculo seleccionado, ese instante se desprecia y por tanto se desvirtúa el resultado., Cuanto menor sea el intervalo de cálculo seleccionado menor será el error cometido.

A3.3.2.2. Auditoría energética

Se dividen todas las energías que intervienen en la red entre la energía total aportada y la energía total consumida (Figura A3-4). Lógicamente, ambos valores deben coincidir, dado que toda la energía que entra en el volumen de control debe ser la energía que sale de éste. El posible error cometido entre ambos valores estará sujeto a la existencia de depósitos y será menor cuanto menor sea el intervalo de cálculo, pues más existe más posibilidad de que se registren y contabilicen todos los posibles estados de los depósitos.

ENERGÍAS kWh/día	
Energía total aportada	
Energía aportada por la bomba (Tpo. func. 12,05 h)	
Energía natural	
Energía consumida	
Energía entregada a los usuarios	
Energía mínima requerida	
Energía topográfica	
Energía de exceso	
Energía disipada por fricción	
Energía disipada en las válvulas	
Energía perdida a través de las fugas	
Energía perdida en la bomba	
Energía de compensación	
Error	
Error en la auditoría energética	
Auditoría energética	Indicadores

Figura A3-4: Tabla de resultados de la Auditoría Energética

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:

$$E_P(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left(\sum_{i=1}^{n_p} \left(\frac{q_{Pi}(t_k) \cdot h_{Pi}(t_k)}{\eta_{pi}(t_k)} \right) \right) \cdot \Delta t_k$$

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:

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

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:

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

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 perdida, 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:

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

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.

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

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

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

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:

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

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:

$$q_j = q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k)$$

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:

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

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:

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

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 constate 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.

A3.3.2.3. Indicadores energéticos

Adicionalmente se indican una serie de indicadores energéticos, que pueden ayudar más allá de los valores absolutos de las energías que circulan por el sistema a comprender el estado actual de la red y decidir las mejores estrategias para aumentar su eficiencia. Los indicadores propuestos a continuación proporcionan una idea rápida y calibrada de aspectos básicos relacionados con la totalidad del servicio.

INDICADORES	
Indicadores de Contexto	
Procedencia de la energía	$C_1 = \frac{E_{Natural}}{E_{Entrada}}$
Exigencia energética de la red	$C_2 = \frac{E_{uo}}{E_{min,plana}}$
Indicadores de Gestión	
Exceso de energía suministrada	$I_1 = \frac{E_{Entrada}}{E_{uo}}$
Eficiencia de la red	$I_2 = \frac{E_{Util}}{E_{Entrada}}$
Energía de fricción	$I_3 = \frac{E_{Friccion}}{E_{Entrada}}$
Energía asociada a las fugas	$I_4 = \frac{E_L + E_F - E'_F}{E_{Entrada}}$
Suficiencia en el cumplimiento de estándares	$I_5 = \frac{E_{Util}}{E_{uo}}$
Energía adicional de bombeo generada por fugas	$k = \frac{E_{bombeo}}{E'_{bombeo}}$
Auditoría energética Indicadores	

Figura A3-5: Tabla de Indicadores

En principio, se definen dos indicadores de contexto y seis indicadores energéticos de gestión. Los primeros, tal y como se define en el manual de indicadores de gestión del IWA (Alegre y col., 2006), son independientes de la gestión del sistema y dependen por tanto de las características físicas particulares de la red. Los segundos sí que facilitan información concreta del estado de la red y son por tanto modificables de acuerdo con las políticas orientadas a reducir el consumo energético.

INDICADORES DE CONTEXTO DEL SISTEMA

C1: Procedencia de la energía

Cada abastecimiento tiene, desde la óptica energética, unas características físicas diferentes. Pueden existir o no desniveles entre las distintas zonas del mismo y requerir bombes en cabecera o intermedios. Por ejemplo, el caso más favorable energéticamente hablando sería una red abastecida por un embalse en cabecera sin necesidad de bombeo, mientras que el caso

contrario sería el suministro de agua procedente de aguas subterráneas. La diferencia entre estas dos situaciones extremas la visualizaría el indicador de contexto C_1 .

El valor máximo que puede tomar C_1 es igual la unidad cuando toda la energía inyectada en la red es gravitatoria, gracias a la cota suficiente de los depósitos de cabecera. Sería cero en caso contrario, es decir, cuando toda la energía inyectada procede de bombeos. Los valores intermedios de la horquilla (0-1) dependen, para un mismo sistema, de las cotas de la red.

C2: Exigencia energética de la red

Además de la procedencia de la energía, también es de interés conocer la mayor o menor dificultad de gestionar una red energéticamente, es decir manteniendo el nivel de presiones ligeramente superior al mínimo exigido y lo más constante posible. Así que, el segundo indicador de contexto C_2 resume las exigencias energéticas de la red. Es el cociente entre la energía mínima requerida (E_{uo}) definida en cada nudo a partir de la altura mínima de servicio y la energía mínima teórica requerida por una red plana e ideal (sin fugas y, sin fricción), $E_{min,flat}$, que coincide con la de una red plana con sus nudos de consumo ubicados a la cota máxima, z_{max} . Los valores que C_2 puede tomar quedan tan sólo restringidos a los números positivos, y cuanto mayor sea su cuantía, mayor serán los desniveles topográficos entre los nudos de la red. El valor más favorable de C_2 es la unidad, red completamente plana.

Tabla A3-1: Indicadores de contexto del sistema.

C1 Procedencia de la energía	C2 Exigencia energética de la red
$C_1 = \frac{E_N(t_P)}{E_{Input}(t_P)}$	$C_2 = \frac{E_{uo}}{E_{min,flat}}$

INDICADORES ENERGÉTICOS DEL SISTEMA

Los indicadores energéticos definidos permiten determinar cuan eficiente es la operación de la red y son modificables mediante las operación del sistema

- El primer indicador (I_1) es el cociente entre la energía real entrante en el sistema y la energía mínima requerida ya definida. Representa, pues, las veces en que la energía entrante real excede a la energía útil teórica necesaria.
- El segundo indicador (I_2) es el cociente entre la energía útil y la entrante al sistema. El fin último de la energía aportada a una red es dar servicio a los abonados e I_2 representa un primer rendimiento y subraya el porcentaje de la energía inyectada en cabecera de red que es útil. Cuanto mayor sea el valor de I_2 mayor es la eficiencia energética en la distribución de agua, siendo físicamente imposible alcanzar el valor ideal de la unidad.

- El tercer indicador (I_3) representa la capacidad hidráulica de la red para cumplir adecuadamente con su función de distribución de agua, la cual exige, sobre todo, que el dimensionamiento de las conducciones sea correcto. Si ello no es así, las pérdidas de carga resultarían excesivas suponiendo un malgasto energético innecesario. Si bien este indicador no puede tomar el valor ideal de cero, puesto que eliminar las pérdidas de carga es imposible, debe mantenerse en cifras razonables (0.2-0.4).
- El cuarto indicador (I_4) representa la energía perdida debida a las fugas, suma de la energía inherente a ellas ($E_L(t_p)$) más la energía de fricción adicional que generan (diferencia entre la energía de fricción real ($E_F(t_p)$) y la energía de fricción de la misma red sin fugas, ($E'_F(t_p)$)
- El quinto indicador (I_5) es directamente el cociente entre la energía entregada a los usuarios y la energía mínima útil necesaria.
 - $I_5 < 1$, sería un rango de valor propio para redes con un nivel insuficiente de presiones
 - $I_5 > 1$, la gestión de la red mantendrá niveles de presión por encima de los mínimos necesarios. Cuanto más se acerque a la unidad el valor de este indicador, mayor será la eficiencia en la gestión de presiones.

Tabla A3-2: Indicadores energéticos del sistema.

I_1 Exceso de energía suministrada	I_2 Eficiencia de la red	I_3 Energía de fricción	I_4 Energía total asociada a fugas	I_5 Suficiencia en el cumplimiento de estándares
$I_1 = \frac{E_{Input}(t_p)}{E_{uo}(t_p)}$	$I_2 = \frac{E_U(t_p)}{E_{Input}(t_p)}$	$I_3 = \frac{E_F(t_p)}{E_{Input}(t_p)}$	$I_4 = \frac{E_L(t_p) + E_F(t_p) - E'_F(t_p)}{E_{Input}(t_p)}$	$I_5 = \frac{E_U(t_p)}{E_{min,useful}(t_p)}$

A3.4 Observaciones

En este documento se ha presentado una visión general del software para la realización de la auditoría energética en su versión beta.

En estos momentos se está realizando un proceso de depuración de cara a detectar posibles errores en el cálculo, y posibles errores en la comunicación de los archivos. Existen una serie de errores asociados a la simulación de la red en EPANET que el software no es capaz de asumir y por tanto los resultados obtenidos no son válidos, es por este motivo por el que el usuario debe simular, entender y verificar los resultados hidráulicos que ofrece EPANET antes de tratar de obtener al auditoría energética.

Del mismo modo, se están implementando una serie de mejoras y cálculos adicionales con el objetivo de que este mismo software permita realizar también estudios económicos a partir de precios de energía y potencia, para las diferentes estaciones de bombeo. Una de las grandes limitaciones de EPANET.

Anexo 4

Referencias

- A.E.A.S. (2014). "Encuesta sobre el Suministro de agua potable y saneamiento en España 2014". Documento técnico publicado por la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento.
- Abadia, A., Rocamora, C. , Ruiz, A. , Puerto, H. 2008. Energy efficiency in irrigation distribution networks I: Theory. *Biosystems engineering* 101 (2008) 21-27.
- Abdulrazzaq K.A. and Jahad U.A. (2014). "Evaluation of Uniformity Coefficients for Sprinkler Irrigation System under Traditional and Looped Network Field Conditions". *Journal of Babylon University Engineering Sciences*, 1(2).
- Alarcón A.L. y Moreno J.F. (2003). "El riego a la demanda". *Horticultura Internacional* (40-mayo 2003)
- Alegre H., Baptista J.M., Cabrera Jr. E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W., Parena R. (2006). "Performance indicators for water supply services". Second Edition, *Manual of Best Practice Series*, IWA Publishing, London.
- Almandoz, J., Cabrera, E., Arregui, F., Cabrera, E., Jr., and Cobacho, R. (2005). "Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE) 0733-9496(2005)131:6(458), 458-466.
- Alperovits E., Shamir U. (1977). "Design of optimal water distribution system". *Water Resour. Res.*, 136, 885–900,1977.
- Arora S. and Jaiswal A. Kr. (2013). "Optimal Cost of Irrigation Network Design using Epanet". *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887), 68(21), 41–45.
- Arregui F., Cabrera E. y Cobacho R. (2006). "Gestión integral de contadores de agua". Instituto Tecnológico del Agua- Universidad Politécnica de Valencia. ISBN: 84-608-0539-5
- AWWA. (2003) Committee Report: Applying Worldwide BMPs in Water Loss Control. *J. AWWA*, 95 (8), 65–79.
- Ayto. de Zaragoza (2011). Ordenanza Municipal para la Ecoeficiencia y la Calidad de la Gestión Integral del Agua. Ayuntamiento de Zaragoza. BOP nº 29 de 07 de febrero de 2011.

Berbel J., Gutiérrez-Martín C., Camacho E., Montesinos P., & Rodríguez (2014). “Efectos de la modernización de regadíos en el consumo de agua, energía y coste”. Congreso de regantes de Huelva. Universidad de Córdoba. 2014.

BID (2011). “Evaluación para sistemas de bombeo de agua. Manual de eficiencia energética.” Iniciativa de Agua y Saneamiento Iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático Washington, D.C. 2011

Bock E., Schmidt I., Stuenkel R., Zart D., (1995). “Nitrogen loss caused by denitrifying Nitrosomonas cells using ammonium or hydrogen as electron donors and nitrite as electron acceptor.” Arch. Microbiol, 163 (1), 16–20

Boulos P. F., and Bros, C. M. (2010). “Assessing the carbon footprint of water supply and distribution systems.” J. Am. Water Works Assoc., 102 (11), 47–54.

Brion L.M., Mays, L.W., (1991). “Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems”. Journal of Hydraulic Engineering. November 1991, 1551 - 1569

Burgi P.H. (1998). “Change in emphasis for hydraulic research at Bureau of Reclamation”. Journal of Hydraulic Engineering. July 1998, 658 - 661

Burt C.M., Piao X., Gaudi F., Busch B., and Taufik. (2008). “Electric Motor Efficiency under Variable Frequencies and Loads”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, 134(2), 129-136.

Bustamante M., (2014). La catástrofe eléctrica del regadío. Tribuna, 21/01/2014 pp 16. Diario ABC. Madrid.

Cabrera E. Jr., Pardo M.A. (2008). “Performance Assessment of Urban Infrastructure Services, Drinking Water, Waste Water and Solid Waste”, IWA Publishing, London, UK

Cabrera E., Pardo M. A., Cobacho R., y Cabrera E., Jr. (2010). “Energy audit of water networks.” J. Water Resour. Plann. Manage., 10.1061/(ASCE) WR.1943-5452.0000077, 669–677.

Cabrera E., Cobacho R., Espert V., y Soriano J. (2013). “Assessing the Full Economic Impact of Domestic Water Tanks. Asset management for enhancing energy efficiency in water and wastewater systems”. International Water Association, Marbella. España

- Cabrera E., Gómez E., Cabrera E., Jr., Soriano J., and Espert V. (2014). "Energy Assessment of Pressurized Water Systems." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE) WR.1943-5452.0000494, 04014095.
- Calejo M.J., Lamaddalena N., Teixeira J.L., and Pereira L.S. (2008). "Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on-demand using flow-driven simulation models". *Journal of Agricultural Water Management*, 95 (2008), 154-162.
- Carravetta A., Del Giudice G., Fecarotta O., Ramos H.M., (2012). "Energy Production in Water Distribution Networks: A PAT Design Strategy". *Water Resources Management* October 2012, Volume 26, Issue 13, pp 3947-3959
- Carravetta A., Del Giudice G., Fecarotta O., Ramos H.M., (2013). "Energy recovery in water systems by PATs: a comparisons among the different installation schemes." *Proceedings of the Computer and Control for the Water Industry*. Perugia (Italy), 2 – 4 September 2013.
- Carricho N., Covas D., Alegre H., Almeida M. (2013) "How to assess the effectiveness of energy management processes in water supply systems." *Proceedings of the International Conference on Asset Management for Enhancing Energy Efficiency in Water and Wastewater Systems*. IWA. Marbella, Spain 24 – 26 April, 2013.
- Casadesús J., Mata M., Marsal J., Girona J., (2012). "A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops". *Computers and Electronics in Agriculture* 83: 11–20.
- Cea M. y Alonso S. (2015). "Sistema de Ayuda a la Decisión para la Programación del Riego Basado en Aspectos Agronómicos." *IV Jornadas de Ingeniería del agua*, Octubre de 2015. Córdoba
- CEC, (2005). *California's Water–Energy Relationship*. Final Staff Report. California Energy Commission, CEC-700-2005-011-SF.
- Chandran K., Stein L., Klotz M., van Loosdrecht M., (2011). "Nitrous Oxide Production by Lithotrophic Ammonia-Oxidizing Bacteria and Implications for Engineered Nitrogen-Removal Systems." *Biochemical Society Transactions*, 39, 1832–1837.
- Charalambous B. (2011). "The hidden costs of resorting to intermittent supplies". *Water* 21. IWA Publishing. December 2011. 29-30

Clark R M., F. Abdesaken, P. F. Boulos, and R. E. Mau. (1996). "Mixing in distribution system storage tanks: its effect on water quality. *Journal of environmental engineering*". American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA, 122(9):814-821, (1996).

Cobacho R., Arregui F., Cabrera E., Cabrera E. Jr. (2008). "Private water storage tanks: evaluating their inefficiencies". *Journal Water Practice and Technology*, IWA Publishing. May 2008 | doi:10.2166/wpt.2008.025

Cobacho R., Arregui F., Parra J.C., Cabrera E. (2005). "Improving Efficiency in Water Use and Conservation in Spanish Hotels", *Water Science and Technology: Water Supply*. IWA Publishing vol. 5 no. 3-4 273-279

Colombo A. and Karney B. (2002). "Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward Comprehensive Picture." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, November - December 2002 pp 441 – 450.

Copeland C., (2014). *Energy-Water Nexus: The Water Sector's Energy Use*. Congressional Res. Serv. USA.

Corominas J. (2010) "Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad". *Ingeniería del Agua*. Vol. 17, No 3, septiembre 2010

Daelman, M.R.J., van Voorthuizen, E.M., van Dongen, L. G. J. M., van Loosdrecht, M.C.M. and Volcke, E.I.P., (2013^a). "Methane and nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment – results from a long-term study." *Water Science and Technology* 67(10), 2350-2355.

Di Nardo A., Di Natale M. and Santonastaso G.F. (2014). "A comparison between different techniques for water network sectorization". *Water Science & Technology: Water Supply*, 14 (6), 961–970.

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. DOUE nº327, 22 de diciembre de 2000.

Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas.

Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009, por la que se instaure un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía. DOUE nº285, 21 de octubre de 2009.

Duarte P., Covas D.I.C., Alegre H., (2009). "PI for assessing effectiveness of energy management processes in water supply systems". PI09: Benchmarking water services-the way forward. IWA. Amsterdam. March, 2009.

EEA (European Environmental Agency), (2014). "Performance of water utilities beyond compliance". Appendix 2. Technical report No 5/2014. Denmark.

Eisenberg M. (2012). "That's a bright idea!. Using USEPA's energy use assessment tool to control costs." Journal AWWA, December 2012, pp 20 – 22.

Environment Agency, Ofwat, Defra, (2012). "Review of the calculation of sustainable economic level of leakage and its integration with water resource management planning". Bristol. UK.

EPA (2008) "Summary of EPA Water and Energy Efficiency Meeting". Chicago, Illinois March 5, 2008. https://www.energystar.gov/ia/partners/downloads/meetings/water_summary_2008.pdf?442a-1e83. Accessed September 30, 2015

EPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). (2013). "Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities A Guide to Developing and Implementing Greenhouse Gas Reduction Programs"

Espert Alemany, Vicent, García-Serra García, Jorge (2013). "Estaciones de bombeo (Tomo I, Tomo II, Tomo III). 01-10-2013

Espert V.B., Cabrera E., Henarejos J.LL., Ladrón de Guevara P. (2015). "Sustitución de bombeos aspirando de depósitos de rotura de aspiración directa de red. El caso de la estación de bombeo de Adsubia carga por bombeos con Adsubia-Cabanes (Jávea)". IV Jornadas de Ingeniería del agua, Octubre de 2015. Córdoba

Farley M and Trow S (2003). Losses in Water Distribution Networks: A practitioner's guide to Assessment, Monitoring and Control. IWA Publishing. ISBN 1 900222 116,

Festa G., Verde D. & Magini R., (2009). "Rehabilitation of a water distribution system with diffused water losses", Proceeding of Fifth International Conference on Sustainable Water Resources

Management, Brebbia, C.A. & V. Popov (Ed), pp. 259-280, ISBN: 978-1-84564-199-3, Series Volume 125, Malta, September 2009, Publisher WIT Press, Southampton, Boston

Fontana N., Giugni M. and Portolano D., (2012). "Losses Reduction and Energy Production in Water-Distribution Networks." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, May-June 2012, pp 237 – 244.

Fox S., Shepherd W., Collins R., y Boxall J. (2015). "Experimental Quantification of Contaminant Ingress into a Buried Leaking Pipe during Transient Events". *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001040 , 04015036.

Garcia S., Faci E., Aliod R., Pano J., Seral P. (2015). "Algoritmos y herramientas para la aplicación de estrategias de reducción de costes energéticos en sistemas de riego a presión". IV Jornadas de Ingeniería del agua, Octubre de 2015. Córdoba

Gay L. F., and Sinha S. K. (2012). "Measuring energy efficiency in urban water systems using a mechanistic approach." *J. Infrastruct. Syst.*,10.1061/(ASCE) IS.1943-555X.0000072, 139–145.

Ghimire S.R., Barkdoll B.D., (2010). "Sensitivity analysis of municipal drinking water distribution system energy use to system properties". *Urban Water J.*, 2010, 7(4), 217–232.

Gilarranz M.A., (2012). "Mapping Water Research in Europe and Spain". The Water JPI. Joint Programming Initiative Water Challenges for a Changing World. Jornada de Presentación a la Comunidad Científica. MINECO. Madrid, diciembre 2012.

Giner C., Gómez P., Sanz F., García-Serra J., Soriano J. (2015). "Auditoría Energética de estaciones de bombeo. Caso de Estudio". IV Jornadas de Ingeniería del agua, Octubre de 2015. Córdoba

Giustolisi O., Laucelli D. and Berardi L., (2013). "Operational Optimization: Water Losses versus energy costs." *J. Hydraul. Eng.*, 139 (4), April 2013, pp 410 – 423.

Giustolisi O., Savic D., and Kapelan Z., (2008). "Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks." *J. Hydraul. Eng.*, 134(5), May 2008, pp 626–635.

GIZ (2011). "Guía para la reducción de las pérdidas de agua. Un enfoque en la gestión de la presión". Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). University of Applied Sciences Northwestern Switzerland (2011).

Gleick P. (1994). "Water and Energy". Annual Review of Energy and the Environment, Vol. 19: 267–299.

Gómez E., Cabrera E., Balaguer M., Soriano T., (2015a). "Direct and indirect water supply: an energy assessment." 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015. Elsevier.

Gómez E., Cabrera E., Soriano T., Balaguer M., (2015b). "On the weaknesses and limitations of EPANET as regards energy". Water Science and Technology: Water Supply. 16 (2); 369-377.

Gómez, E. (2014). "Alcoi, Ciudad Sostenible. Optimización del uso conjunto del agua y de la energía en la ciudad de Alcoi". ISBN. 978-84-941847-3-4.

Gómez P., García-Serra J., Soriano J., Giner C. (2015). "Procedimiento para la selección de la estrategia de regulación más adecuada en estaciones de bombeo". IV Jornadas de Ingeniería del agua, Octubre de 2015. Córdoba

Graaff M.S., Zandvoort M., Roest K., Frijns J., Janse T., van Loosdrecht M.C.M. (2012). "Quantification of methane and nitrous oxide greenhouse gas emissions from the urban water cycle." In: Proceedings of IWA World Water Congress, 26-30 October, 2012, Busan, Korea.

Grundfos, (2014). High efficiency motor technology that reduces energy waste in pump applications. Grundfos

Guisasola A., de Haas D., Keller J. and Yuan Z, (2008). "Methane formation in sewer systems." Water Research, 42, 1421-1430.

Hashemi S., Filion Y.R., Speight V.L., "Pipe-level energy metrics for energy assessment in water distribution networks" Procedia Engineering. 119 (2015) 139 - 147

IDAE (2005). "Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío". IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (octubre 2005)

IDAE (2008). "Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes". IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (abril 2005)

Indian Water Works Association (IWWA). (2000). "International Seminar on Intermittent Drinking Water Supply System Management: Technical Papers". Proceeding for the International Seminar on Intermittent Drinking Water Supply System Management, Mumbai, India.

INE (2008). "Estadísticas e indicadores del agua". Boletín informativo del Instituto Nacional de Estadística. <http://www.ine.es/revistas/cifraine/0108.pdf>

IPCC Climate Change, (2006). "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories." The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change, H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Hayama, Kanagawa, Japan.

IPCC Climate Change, (2013). "Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC Climate Change, (2014). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R. Pachauri and L. Meyer (editors), Geneva, Switzerland, IPCC, 151 p., ISBN: 978-92-9169-143-2 .

IPCC Climate Change, (2014). "Cambio climático 2014. Mitigación del cambio climático. Resumen para responsables de políticas" Contribución del grupo de trabajo III al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. 2014.

ITA (2014). "ITAFugas". Universitat Politècnica de València. Spain.

ITA (2015). "EAGLE tool, Energy Assessment of Global Pressurized Water Systems". Universitat Politècnica de València. Spain.

ITA (2016). "ITAEnergy". Universitat Politècnica de València. Spain.

IWA (2000). "Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures". IWA, International Water Association- Task Force on Water Losses, London, August 2000.

Kampschreur M.J., Temmink H., Kleerebezem R., Jetten M.S.M., van Loosdrecht M.C.M., (2009). "Nitrous Oxide Emission During Wastewater Treatment." *Water Res.*, 43(17), 4093-4103.

Kurek W. and Ostfeld A. (2014). "Multiobjective Water Distribution Systems Control of Pumping Cost, Water Quality, and Storage-Reliability Constraints." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000309, 184-193

L. A. Rossman, *Epanet2 users manual*. US EPA, Washington, D.C. USA. (2000)

Lamaddalena N. and Khila S., (2012). "Energy saving with variable speed pumps in on-demand irrigation systems". *Irrigation Science*, 30 (2) (2012), pp. 157–166.

Lambert A., Brown T.G., Takizawa M, Weimer D., (1999). "A review of performance indicators for real losses from water supply systems." *AQUA*, Vol 48 No 6. December 1999.

Lambert A., and Hirner W. (2000). "Losses from water supply systems: Standard terminology and recommended performance measures". (IWA's Blue Pages), International Water Association, London

Lazarova V., Choo K., Cornell P. (2012). "Meeting the challenges of the water-energy nexus: the role of reuse and wastewater treatment". *Water* 21. Pp. 12-17.

Liemberger R. and McKenzie R. (2005). "Accuracy limitations of the ILI – Is it an appropriate indicator for developing countries?" *Leakage 2005 Conference Proceedings*, 12–14 September 2005, Halifax, Canada.

Lingireddy S. y Wood D., (1998). "Improved Operation of Water Distribution Systems Using Variable – Speed Pumps." *J. Energy Eng. ASCE*. December 1998, pp 90 – 03.

M.A.P.A (2005). "Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España" IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Marzo 2005).

Machell J. y Boxall J. (2012). *Field Studies and Modeling Exploring Mean and Maximum Water Age Association to Water Quality in a Drinking Water Distribution Network*, *Journal of Water Resources Planning and Management*, November - December 2012, 624 - 638

MAGRAMA (2006). “Plan nacional de adaptación al cambio climático”. Marco para la coordinación entre administraciones públicas para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Oficina española de cambio climático. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

MAGRAMA (2008) “Plan Nacional de Regadíos. Horizonte 2008”. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

MAGRAMA (2010). “Estrategia nacional para la modernización sostenible de los regadíos H2015”. Informe de Sostenibilidad (Julio 2010). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

MAGRAMA (2013) “Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos”. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

MAGRAMA (2016). “Documento de Contexto, Prospectiva y la temática del Grupo Focal”. Grupo focal español para innovación en materia de regadío, energía y medio ambiente. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Mamade A., Loureiro D., Covas D., Alegre H. (2014). “Energy auditing as a tool for improving service efficiency of water supply systems”. *Procedia Engineering*. 89 (2014) 139 - 147

Marchi A., y Simpson A. R. (2013). Correction of the EPANET Inaccuracy in Computing the Efficiency of Variable Speed Pumps. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(4), 456–459.

MARM (2006). “Hechos y Cifras de la Agricultura, la Pesca y la Alimentación en España”. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Martin D.C., Stegman E.C., Feres E. (1990). “Irrigation Scheduling Principles. In: Management of Farm Irrigation Systems”. G.J. Hoffman et al.(eds.). ASAE monograph, St. Joseph, Michigan. pp. 155-199.

Matos R., Cardoso R., Ashley R., Duarte P., Molinari A. and Schulz A. (2003). “Performance Indicators for Wastewater Services”. IWA Publishing. London.

McIntosh, A. C. (2003). “Asian Water Supplies, Reaching the Urban Poor”. Asian Development Bank

- McKenzie (2001). "Presmac, Pressure Management Program". WRC Report No TT 152/01. <http://www.wrc.org.za/downloads/report%20lists/web%20files/presmac/Presmac%20Rpt%20TT%20152-01.PDF>
- McMahon J. E., Whitehead C. D., Biermayer P. (2006). "Saving Water Saves Energy". Research Paper at 4th International Conference on Energy efficiency in Domestic Appliance and Lighting, June 2006.
- Milly P., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R., Kundzewicz W., Lettenmaier D., Stouffer R., (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 319, pp. 573–574, February
- MINETUR (2015). "Informe de sostenibilidad ambiental de la planificación del sector eléctrico 2015-2020". Ministerio de Industria, Energía y Turismo (Mayo 2015).
- MOE (Market Observatory for Energy), (2011). Key figures. Directorate General for Energy. E.C.
- Moreno M.A., Córcoles J.I., Tarjuelo J.M., Ortega J.F. (2010). "Energy efficiency of pressurised irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule" *Journal of Biosystems Engineering* 107, 349 - 363.
- Morgan D. R., Goulter I. C. (1985). "Optimal urban water distribution design". *Water Resour. Res.*, 215, 642–652, 1985.
- National Asset Management Steering Group. (2002). "International infrastructure management manual". Thames, Australia/New Zealand, Ed., N.Z.
- Nieto M. (2016). "El cambio climático: El caso del agua en la Comunidad Valenciana". Seminario de Economía (CC.OO). 6 de abril 2016 (Valencia).
- Nogueira-Vilanova M.R., Perrella-Balestieri J.A. (2015). "Modeling of hydraulic and energy efficiency indicators for water supply systems" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48(2015) 540–557
- NYSERDA. (2008). "Statewide Assessment of Energy Use by the Municipal Water and Wastewater Sector." New York State Energy Research and Development Authority.
- OCCC (2015). Factor de emisión asociado a la energía eléctrica: el mix eléctrico. Oficina catalana del cambio climático.

http://canviclimatic.gencat.cat/es/reduex_emissions/factors_demissio_associats_a_lenergia/ (consultado mayo 2016).

OFWAT (Office of Water Services), (2010). "Playing our part – reducing greenhouse gas emissions in the water and sewerage sectors". Birmingham. UK

OJEU (Official Journal of the European Union), (2012), Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for water pumps, EC. Brussels.

ORDEN ITC/1857/2008, de 26 de junio, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir del 1 de julio de 2008. BOE nº156, 28 de febrero de 2008.

Ormsbee L.E., Walski T.M., Chase D.V. and Sharp W.W., (1989). "Methodology for improving pump operation efficiency." J. Water Resour. Plann. Manage., Vol. 115, No 2, March 1989, pp 148 – 164.

Ortega Álvarez J.F, Carrión Pérez P., Montero Martínez J., Tarjuelo Martín- Benito J.M. (2001). "Las nuevas tecnologías aplicadas al control automático del riego". Vida Rural (54) febrero 2001

Paish, O., (2002). "Small hydro power: technology and current status". Renew Sustain Energ Rev 6(6), 537–556.

Papa F., Radulj D., Karney B. and Robertson M., (2013). "Pump energy efficiency field testing & benchmarking in Canada." Proceedings of the International Conference on Asset Management for Enhancing Energy Efficiency in Water and Wastewater Systems. IWA. Marbella, Spain 24 – 26 April, 2013.

Pardo M.A. (2010). "Influencia de los costes del Agua y la Energía en la renovación de tuberías." Tesis Doctoral. Univ. Politécnica de Valencia, España.

Pardo M.A., Manzano J., Cabrera E., García- Serra J. (2013) "Energy audit of irrigation networks". Journal of Biosystems Engineering 115 (1), 89 -101.

Pelletier G., Mailhot A., and Villeneuve J. (2003). "Modeling Water Pipe Breaks—Three Case Studies." J. Water Resour. Plann. Manage., 10.1061/(ASCE) 0733-9496(2003)129:2(115), 115-123.

Pelli T., and Hitz H. U. (2000). "Energy indicators and savings in water supply." J. Am. Water Works Assn., 92 (6), 55–62.

Pérez García R., Andreu Navarro M.y Izquierdo Sebastián J. (2009). "Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua. Diseño de redes de distribución". Vol. II, cap. 14, pp. 587-654.

Perez Urrestarazu L. y Burt C.M. (2012). "Characterization of Pumps for Irrigation in Central California: Potential Energy Savings." Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, September 2012 pp 815 – 822

Porro J., Milleri C., Comas J., Rodriguez-Roda I., Pijuan M., Corominas L., Guo L., Daelman M., Volcke E.I.P., van Loosdrecht M.C.M., Vanrolleghem P.A., Nopens I. (2014b). "Risk assessment modelling of nitrous oxide in activated sludge systems: Quality not Quantity." In: Proceedings of 4th IWAWEF Wastewater Treatment Modelling Seminar, WWTmod 2014, Spa, Belgium, 30 March – 3 April 2014.

Puust R., Kapelan Z., Savic D. A., and Koppel T. (2010). "A review of methods for leakage management in pipe networks." Urban Water J.7 (1), 25–45

Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. BOE nº176, 24 de julio de 2001.

Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE nº45, 21 de febrero de 2003.

Renaud E., Clauzier M., Sandraz A. C., Pilot J. and Gilbert D. (2014). Introducing pressure and number of connections into water loss indicators for French drinking water supply networks. Water Science & Technology: Water Supply, 14 (6), 1105–1111.

Rojo A.; Fernando R.; Grilo J.; Trommsdorff C.; Oberkircher, L.; Alegre H.; Silva C.; Porro J.; Gómez E.; Cabrera E (2015). "Urban water cycle analysis as an energy efficiency tool aimed at reducing GHG emissions in the water sector". 4th IWA México Young Water Professionals Conference 2015 (Guanajuato, México).

Rossman L.A. (1999). "The EPANET Programmer's Toolkit for Analysis of Water Distribution Systems, in WRPMD'99 - Preparing for the 21st Century". Proc. 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference. Erin M. Wilson, (editor), ASCE, Reston, VA.

Rossman L. A. (2000). Epanet2 users manual, US EPA, Cincinnati.

Rossman L. A. (2011). "An Overview of EPANET Version 3.0." *Water Distribution Systems Analysis 2010*: pp. 14-18. doi: 10.1061/41203(425)3.

Sammartano V., Aric`o C., Carravetta A., Fecarotta O., Tucciarelli T. (2013). "Banki-michell optimal design by computational fluid dynamics testing and hydrodynamic analysis". *Energies* 6, 2362–2385.

Sarbu I., and Borza I. (1998). "Energetic optimization of water pumping in distribution systems." *Mech. Eng. (Am. Soc. Mech. Eng.)*, 42(2), 141–152

Savic D. A., and Walters G. A. (1997). "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks." *J. Water Resour. Plann. Manage. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 123 (2), 67–77.a6a

Schafer, Cynthia A. y Mihelcic, James R. (2012). "Effect of Storage Tank Material and Maintenance on Household Water Quality". *Journal - American Water Works Association*, 104 (9), E521-E529

Seago C.J. and Mckenzie R.S. (2007). "An Assessment of Non-Revenue Water in South Africa". Report No TT 300/07. WRC, South Africa.

Short M.D., Daikeler A., Peters G.M., Ashbolt N.J., Stuetz R.M., and Pierson, W.L., (2014). "Municipal gravity sewers: an unrecognised source of nitrous oxide." *Science of the Total Environment* 468–469 (2014) 211–218.

Silva C. y Rosa M. J. (2014). "Energy performance indicators of wastewater treatment - a field study with 17 Portuguese plants". IWA World Water Congress. Lisbon, September.

Soriano J., Arregui F., Veiga C., y Buchberger S. (2010). "Análisis y comparación de los principales esquemas de suministro en instalaciones generales de edificios". IWA Young Water Professional Conference. Barcelona. España.

Stokes C. S., Simpson A. R., and Maier H. R. (2014). "The costgreenhouse gas emission nexus for water distribution systems including the consideration of energy generating infrastructure: An integrated conceptual optimization framework and review of literature." *Earth Perspect.*, 1(9), 1–17.

Stokes C., Maier H., and Simpson A. (2015). "Effect of Storage Tank Size on the Minimization of Water Distribution System Cost and Greenhouse Gas Emissions While Considering Time-Dependent Emissions Factors." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE) WR.1943-5452.0000582, 04015052.

Thornton J., (2003). *Managing leakage by managing pressure: A practical approach*. Water 21, IWA Water Loss Task Force.

Thornton J., Sturm R., and Kunkel G. (2008). "Water loss control", McGraw-Hill, New York

Todini E. (2000). "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach". *Urban Water J.*, (2000), 2(2), 115–122.

Totsuka N., Trifunovic N., Vairavamoorthy K. (2004). "Intermittent urban water supply under water starving situations", *Proceedings of the 30th WEDC International Conference*, Vientiane, Lao PDR, 2004, 505-512

UKWIR/WRC (1994). "Managing leakage (Report C): Setting economic leakage targets". UK Water Industry Research. Water Research Centre, Water Services Association, Water Companies Association, ISBN 1 898920 08 7

Ulanicki B., Kahler J. and See H. (2007). "Dynamic Optimization Approach for Solving an Optimal Scheduling Problem in Water Distribution Systems." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, January - February 2007, pp 23-32.

UN (2014). "Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2014. Agua y Energía. Resumen ejecutivo". <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002269/226962s.pdf>

UN (2016). *Las Naciones Unidas y el cambio climático*. <http://www.un.org/climatechange/es/>

USEPA, (2013). "Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities: A Guide to Developing and Implementing Greenhouse Gas Reduction Programs," United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Van Zyl, J.E., Piller O., le Gat Y., (2008). "Sizing municipal storage tanks based on reliability criteria." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE) 0733-9496(2008)134:6(548), 548–555.

Viollet P.L., (2005). "Histoire de l'énergie hydraulique". Ecole National des Ponts et Chaussées. Paris.

Walski T.M. (1993). "Tips for saving energy in pumping operations." Journal of the American Water Works Association, July 1993, pp 49 – 53.

Walski T. M. (2011). "Practical tips for reducing energy use." 11th Int. Conf. on Computing and Control for the Water Industry. Exeter, U.K.

Ward S., Butler D., Memon F.A. (2011). "Benchmarking energy consumption and CO2 emissions from rainwater harvesting systems: an improved method by proxy". Water and Environment Journal, 26 (2) (2011), pp. 184–190 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00279.x> online

Water in the West (WW). (2013). "Water and Energy Nexus: A Literature Review." Stanford University. Standford, CA.

WEF (World Economic Forum), (2014): "Global Risks, 2013. Eight Edition." World Economic Forum, Geneve.

Wolff G., (2010). Agua y energía en California. Ingeniería del Agua, Volumen 17(3).

Wu, W., H. Maier, A. Simpson, (2010). "Single-Objective versus Multiobjective Optimization of Water Distribution Systems Accounting for Greenhouse Gas Emissions by Carbon Pricing." J. Water Resour. Plann. Manage. (2010) ASCE. 136(5), pp 555–565.

WW (Water in the West), (2013). "Water and Energy Nexus: A Literature Review". Stanford University. USA.

WWF (2015). "Observatorio de la electricidad. Mayo 2015". World Wildlife Fund España.