



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

TESIS DOCTORAL

Ecodiseño y ecogestión de redes de distribución de agua a presión

Roberto del Teso March

Directores:

Enrique Cabrera Marcet

Elena Gómez Sellés

Valencia, julio de 2020

RESUMEN

Todos los pronósticos indican que en los próximos años va a existir un aumento importante de población, que conllevará un crecimiento en la demanda de recursos hídricos y energéticos. Este hecho, junto a la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para hacer frente al cambio climático, ponen de relevancia la importancia de optimizar cualquier proceso relacionado con el nexo agua y energía.

Los sistemas de distribución de agua a presión son demandantes de energía, y un claro ejemplo de este nexo, ya que es imprescindible aportar energía al fluido para llevarlo desde la fuente de captación hasta los puntos de consumo. La fase del transporte de agua es una de las que mayor energía consume, representando habitualmente un importante porcentaje de los costes totales del servicio, por lo que parece oportuno hacer una revisión en profundidad de las necesidades energéticas del transporte de agua a presión.

En este trabajo se presenta un protocolo de actuación con diferentes etapas a abordar para disminuir el consumo energético en el transporte de agua a presión. Una ruta que permita reducir de manera general el consumo de energía de la instalación, garantizando en todo momento el suministro bajo los estándares de calidad establecidos.

La optimización energética de los sistemas de transporte de agua a presión debe comenzar en la fase de diseño. La concepción de las redes debe tener en cuenta el consumo energético que ésta tendrá en su fase de funcionamiento, aspectos fundamentales para ello son la selección de la fuente de suministro, la sectorización de los sistemas, y, en definitiva, el layout propuesto.

En la fase de operación, el análisis energético a realizar dependerá de la cantidad y calidad de los datos de la instalación. Un primer diagnóstico permite detectar si existe la necesidad de realizar un análisis más específico que detalle la energía consumida por el sistema. Este diagnóstico se puede llevar a cabo con pocos datos. Si el resultado del diagnóstico indica que existe un margen de mejora considerable, será necesario realizar la auditoría de la red, para lo cual es esencial contar con su correspondiente modelo matemático, y por tanto con datos mucho más precisos.

La auditoría de la red permite conocer en detalle cómo se distribuye la energía en el sistema, qué cantidad de energía es aprovechada por los usuarios, y cuanta se pierde por el camino. Lo idóneo sería inyectar únicamente la energía mínima requerida por los usuarios, pero esto es imposible de alcanzar, ya que existen diferentes ineficiencias desde la fuente de suministro hasta los puntos de consumo. Estas pérdidas se dividen en estructurales y operacionales.

Las pérdidas estructurales están vinculadas a los desniveles del sistema, de ahí que a la energía relacionada con estas pérdidas se le denomine energía topográfica. Mientras que las pérdidas operacionales están vinculadas a la gestión de la red: energía embebida en fugas, pérdidas energéticas en las estaciones de bombeo, fricción en tuberías, energía de exceso y cualquier otro tipo de pérdida energética vinculada a la gestión del sistema.

Para mejorar la eficiencia del sistema se debe realizar un análisis en profundidad de las pérdidas estructurales y operacionales de la red. El análisis de las pérdidas estructurales permitirá decidir si es aconsejable acometer actuaciones de mejora relacionadas con la energía topográfica. En tal caso, se evaluará la posibilidad de modificar el layout del sistema, recuperar parte de la energía topográfica o disiparla con válvulas reductoras de presión.

El análisis de las pérdidas energéticas operacionales vendrá definido por los niveles de referencia alcanzables de las mismas. Lo ideal sería que no existiese ningún tipo de pérdida, pero esto es imposible en un sistema real, por lo que para cada pérdida energética operacional se calcula un nivel de referencia a alcanzar basado en criterios económicos y de gestión. Comparando estos niveles de referencia, con las pérdidas de energía reales existentes, se puede evaluar y calificar el estado energético de la red desde el punto de vista operacional. A partir de esta calificación se estudiarán las acciones de mejora operacionales a llevar a cabo.

Una vez analizadas y evaluadas las acciones de mejora correspondientes a las pérdidas estructurales y operacionales, se realizará una calificación final del sistema que permite caracterizarlo energéticamente. En definitiva, el protocolo propuesto es el eje central de esta tesis y las aportaciones que se presentan facilitan su comprensión y seguimiento.

RESUM

Tots els pronòstics indiquen que en els pròxims anys existirà un augment important de població, que comportarà un creixement en la demanda de recursos hídrics i energètics. Aquest fet, al costat de la necessitat de reduir les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle per a fer front al canvi climàtic, posen de rellevància la importància d'optimitzar qualsevol procés relacionat amb el nexa aigua i energia.

Els sistemes de distribució d'aigua a pressió són demandants d'energia, i un clar exemple d'aquest nexa, ja que és imprescindible aportar energia al fluid per a portar-lo des de la font de captació fins als punts de consum. La fase del transport d'aigua és una de les quals major energia consumeix, representant habitualment un important percentatge dels costos totals del servei. Per la qual cosa, sembla oportú fer una revisió en profunditat de les necessitats energètiques del transport d'aigua a pressió.

En aquest treball es presenta un protocol d'actuació amb diferents etapes a abordar per a disminuir el consum energètic en el transport d'aigua a pressió. Una ruta que permeta reduir de manera general el consum d'energia de la instal·lació, garantint en tot moment el subministrament sota els estàndards de qualitat establits.

L'optimització energètica dels sistemes de transport d'aigua a pressió ha de començar en la fase de disseny. La concepció de les xarxes ha de tindre en compte el consum energètic que aquesta tindrà en la seua fase de funcionament. Aspectes fonamentals per a això són la selecció de la font de subministrament, la sectorització dels sistemes, i, en definitiva, el layout proposat.

En la fase d'operació, l'anàlisi energètic a realitzar dependrà de la quantitat i qualitat de les dades de la instal·lació. Un primer diagnòstic permet detectar si existeix la necessitat de realitzar una anàlisi més específic que detalle l'energia consumida pel sistema. Aquest diagnòstic es pot dur a terme amb poques dades. Si el resultat del diagnòstic indica que existeix un marge de millora considerable, serà necessari realitzar l'auditoria de la xarxa, per a això és essencial comptar amb el seu corresponent model matemàtic, i per tant amb dades molt més precises.

L'auditoria de la xarxa permet conèixer detalladament com es distribueix l'energia en el sistema, quina quantitat d'energia és aprofitada pels usuaris, i quanta es perd

pel camí. L'ídoni seria injectar únicament l'energia mínima requerida pels usuaris, però això és impossible d'aconseguir, ja que existeixen diferents ineficiències des de la font de subministrament fins als punts de consum. Aquestes pèrdues es divideixen en estructurals i operacionals.

Les pèrdues estructurals estan vinculades als desnivells del sistema, per aquest motiu a l'energia relacionada amb aquestes pèrdues se l'anomena energia topogràfica. Mentre que les pèrdues operacionals estan vinculades a la gestió de la xarxa: energia embeguda en fuites, pèrdues energètiques en les estacions de bombeig, fricció en canonades, energia d'excés i qualsevol altre tipus de pèrdua energètica vinculada a la gestió del sistema.

Per a millorar l'eficiència del sistema s'ha de realitzar una anàlisi en profunditat de les pèrdues estructurals i operacionals de la xarxa. L'anàlisi de les pèrdues estructurals permetrà decidir si és aconsellable escometre actuacions de millora relacionades amb l'energia topogràfica. En tal cas, s'avaluarà la possibilitat de modificar el layout del sistema, recuperar part de l'energia topogràfica o dissipar-la amb vàlvules reductores de pressió.

L'anàlisi de les pèrdues energètiques operacionals vindrà definit pels nivells de referència assolibles d'aquestes. L'ideal seria que no existira cap mena de pèrdua, però això és impossible en un sistema real. Per la qual cosa, per a cada pèrdua energètica operacional es calcula un nivell de referència a aconseguir basat en criteris econòmics i de gestió. Comparant aquests nivells de referència, amb les pèrdues d'energia reals existents, es pot avaluar i qualificar l'estat energètic de la xarxa des del punt de vista operacional. A partir d'aquesta qualificació s'estudiaran les accions de millora operacionals a dur a terme.

Una vegada analitzades i avaluades les accions de millora corresponents a les pèrdues estructurals i operacionals, es realitzarà una qualificació final del sistema que permet caracteritzar-lo energèticament. En definitiva, el protocol proposat és l'eix central d'aquesta tesi i les aportacions que es presenten faciliten la seua comprensió i seguiment.

ABSTRACT

In the coming years it is forecasted a significant increase in population, which will lead to a growth in the demand for water and energy resources. This fact, together with the need to reduce greenhouse gas emissions to address climate change, highlights the importance of optimizing any process related to the water and energy nexus.

Pressurized water distribution systems are energy demanding, and a clear example of this nexus. It is essential to provide energy to the fluid to transport it from the catchments to the points of consumption. The water transport phase is one of the phases that consume more energy, and usually represents a significant percentage of the total costs of the service. Therefore, it seems appropriate to make an in-depth revision of the energy needs this phase.

This work presents an action protocol with different stages to be tackled in order to reduce energy consumption in pressurised water transport. It allows a general reduction of the energy consumption in water networks, guaranteeing at any time the supply under the established quality standards.

The optimisation of energy in pressurised water transport systems must begin in the design phase. Therefore, the design of the networks must consider the energy consumption that it will have in its operation phase. Fundamental decisions in this phase are the selection of the supply source, the sectorization of the systems, and, in short, the proposed layout.

In the operation phase, the energy analysis to be carried out will depend on the quantity and quality of the data available from the system. A first diagnosis allows us to detect if there is a need to perform a more specific analysis that details the energy consumed by the system. This first diagnosis can be carried out with few data. If the result of the diagnosis indicates that there is considerable room for improvement, it will be necessary to conduct a network audit, for which it is essential to have a corresponding mathematical model, and therefore much more precise data.

The network audit allows us to know in detail how the energy is distributed in the system, how much energy is consumed by the users, and how much is lost along

the way. Ideally, only the minimum energy required by users should be injected. However, this is unfeasible, as there are different inefficiencies from the source of supply to the consumption points. These losses are divided into structural and operational.

Structural losses are linked to the topography of the system. Hence, the energy related to these losses is called topographic energy. Operational losses are linked to the management of the network: energy embedded in leaks, energy losses in pumping stations, friction in pipes, excess energy and any other type of energy loss linked to the management of the system.

To improve the efficiency of the system, an in-depth analysis of structural and operational losses in the network must be carried out. The analysis of the structural losses will allow to decide whether it is advisable to undertake improvement actions related to topographic energy. In this case, the possibility of modifying the layout of the system, recovering part of the topographic energy or dissipating it with pressure reducing valves will be evaluated.

The analysis of operational energy losses will be defined by the target of losses established. Ideally, there should be no losses at all, but this is impossible in a real system. Hence, for each type of operational energy loss, it is calculated a reference level to be reached, based on economic and management criteria. By comparing these reference levels with the actual existing energy losses, the energy status of the network can be evaluated and qualified from an operational point of view. Based on this qualification, improvement actions can be drawn.

Once the improvement actions corresponding to the structural and operational losses have been analysed and evaluated, the system will be given a complete qualification that will characterise its global energy behaviour. To sum up, the proposed protocol is the central axis of this thesis and the contributions presented facilitate its comprehension.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Resumen	iii
Resum	v
Abstract	vii
Índice de contenidos	ix
Índice de figuras	xii
Índice de tablas.....	xv
Capítulo 1 Introducción	1
1-1. Perspectivas futuras del nexo agua y energía	2
1-2. Energía y cambio climático.....	6
1-2.1. Huella de carbono	8
1-3. Energía en el ciclo urbano del agua.....	10
1-3.1. El coste energético en los servicios de agua	13
1-3.2. Mejora del nexo agua-energía en el ciclo integral del agua en España	16
1-4. Energía en el sector del riego	18
1-4.1. Cambios energéticos en el sector del riego en España	19
1-4.2. Sobreexplotación de acuíferos y aumento de energía	22
1-4.3. Energía solar fotovoltaica.....	22
1-5. Motivación y objetivos	24
Capítulo 2 Publicaciones.....	29
Capítulo 3 Resultados y discusión	35
3-1. Ecodiseño de las redes de distribución de agua a presión.....	37
3-1.1. Sectorización basada en EMAs	40
3-1.2. Fuentes de suministro	42

Fuentes de energía rígidas (RES)	42
Fuentes de energía variables (VES)	43
3-1.3. Diseño de sistemas simples.....	45
3-1.4. Estimación del gasto energético en fase de diseño	47
3-2. Pérdidas energéticas operacionales.....	51
3-2.1. Diagnóstico y auditoría energética.....	54
Diagnóstico rápido a partir del indicador Intensidad energética (I_e)	55
Diagnóstico completo	61
Auditoría energética	63
3-2.2. Niveles energéticos de referencia	65
Energía embebida en fugas	66
Pérdidas energéticas por fricción	72
Energía perdida en bombas.....	74
3-3. Pérdidas energéticas estructurales	83
3-3.1. La herramienta ITA Topographic Energy Assessment.....	90
3-4. Calificación energética de los sistemas de transporte de agua a presión ..	93
3-4.1. Calificación de sistemas complejos con modelo matemático.....	94
Calificación de las pérdidas estructurales: θ_{tr} y θ_{trm}	95
Calificación de las pérdidas operacionales: Índice energético global (I_s)... ..	99
Calificación final del sistema	102
3-4.2. Calificación de sistemas simples	104
Sistemas simples por bombeo.....	104
Sistemas simples por gravedad	106
Capítulo 4 Conclusiones y desarrollos futuros	109
4-1. Conclusiones.....	109
Análisis energético global del transporte de agua a presión	110

El diseño de las redes de agua.....	112
Diagnóstico y auditoría.....	112
Pérdidas energéticas estructurales y operacionales.....	113
Calificación de las redes.....	114
4-2. Desarrollos futuros.....	114
Indicadores energéticos estandarizados.....	115
Aplicación a diferentes tipos de redes.....	116
Desarrollo de una herramienta informática global.....	116
Matriz de impacto energética.....	116
Etiquetado energético de las redes de transporte de agua a presión.....	117
Capítulo 5 Referencias y glosario.....	121
5-1. Glosario.....	121
5-2. Referencias.....	129
Apéndices.....	141
Eco-Layouts in Water Distribution Systems.....	143
Eficiencia energética en redes de agua a presión en su fase de diseño.....	175
Quick energy assessment of irrigation water transport systems.....	201
Topographic energy management in water distribution systems.....	227
Labeling water transport efficiencies.....	255
Improving energy efficiencies in WDN with EPANET based tools.....	287

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Demanda global de agua por sector (WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO), 2019)	3
Figura 1-2: Impacto anual promedio por servicios inadecuados de agua potable y saneamiento, fenómenos extremos y conflictos (WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO), 2019)	7
Figura 1-3: Consumo eléctrico en los procesos del sector del agua (Magagna et al., 2019).....	11
Figura 1-4: Evolución de los precios de la electricidad para consumidores domésticos (izquierda) y no domésticos (derecha) en EU (Eurostat, 2018)	14
Figura 1-5: Evolución de los precios de la electricidad para consumidos domésticos y no domésticos en Australia (CEDA-Committee for Economic Development of Australia, 2012)	14
Figura 1-6: Ingresos de la compañía eléctrica por kWh para clientes residenciales de algunos estados de Norte América (Fremeth, 2018)	15
Figura 1-7: Evolución de la superficie regada en España según tipos de riego (Ministerio de agricultura, 2019).....	20
Figura 1-8: Evolución del agua extraída y consumida frente a la energía utilizada para el riego en España (Espinosa-Tasón et al., 2020)	21
Figura 2-1: Fases que engloba cada uno de los trabajos dentro del diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión	31
Figura 3-1: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión	36
Figura 3-2: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Fase de diseño.....	39
Figura 3-3: Configuración energética de sistemas simples de transporte de agua a presión en su fase de diseño	46
Figura 3-4: Variables que intervienen en la estimación del gasto energético de una red abastecida por bombeo en fase de diseño	49

Figura 3-5: Variables que intervienen en la estimación del gasto energético de una red gravitatoria (izquierda) y de una red gravitatoria con bombeo (derecha) en fase de diseño	50
Figura 3-6: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Fase de evaluación energética (diagnóstico y auditoría).....	55
Figura 3-7: Evaluación de la eficiencia energética del transporte de agua a presión a partir de la altura de suministro H , y la intensidad energética I_e	57
Figura 3-8: Ejemplo de un balance hídrico mostrado en “ITA Energy Audit”	64
Figura 3-9: Ejemplo de una auditoría energética con “ITA Energy Audit”	65
Figura 3-10: Gráfico explicativo del nivel económico de fugas (ELL)	68
Figura 3-11: Ejemplo de cálculo del nivel de referencia a alcanzar en la energía embebida en fugas con la herramienta “ITA Energy network labelling”	72
Figura 3-12: Ejemplo de cálculo del nivel de referencia a alcanzar en las pérdidas energéticas por fricción con la herramienta “ITA Energy network labelling”	74
Figura 3-13: Cobertura de una curva de consigna con tres bombas trabajando en paralelo.....	75
Figura 3-14: Eficiencia de un motor de inducción de jaula de ardilla de 60 Hz y 1800 rpm en función de su potencia nominal (HP) y de su carga (%) (National Electrical Manufacturers Association, 2007)	77
Figura 3-15: Curva de rendimiento mínimo según European Commission, 2012.	81
Figura 3-16: Ejemplo de obtención de la curva de rendimiento objetivo con la herramienta “ITA Energy network labelling”	83
Figura 3-17: Desglose de la energía topográfica en sus tres componentes.....	84
Figura 3-18: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Pérdidas estructurales en fase de funcionamiento	85
Figura 3-19: Descomposición de la energía topográfica en redes de diferente perfil	87

Figura 3-20: Red plana con fuentes de suministro rígidas (izquierda) y variables (derecha). Comparación de escenarios (a: plena carga, b: carga parcial, c: plena carga en sistema ideal).....	89
Figura 3-21: Auditoría energética de la herramienta “ITA Topographic Energy Assessment”	92
Figura 3-22: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Calificación inicial de pérdidas.....	94
Figura 3-23: Calificación de las pérdidas energéticas estructurales	96
Figura 3-24: Calificación de las pérdidas energéticas estructurales del caso de estudio 1 (izquierda) y 2 (derecha) del Apéndice IV	98
Figura 3-25: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Fase de evaluación energética (calificación inicial)	100
Figura 3-26: Cálculo del índice energético global con la herramienta “ITA Energy network labelling”	101
Figura 3-27: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Fase de evaluación energética (calificación final).....	103
Figura 3-28: Calificación de la eficiencia energética del transporte de agua a presión en sistemas simples por bombeo	105
Figura 3-29: Clasificación de sistemas simples por gravedad en fase de explotación	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Desglose del volumen tratado de agua y de las necesidades de energía para cada etapa del sector del agua en 2017 (Magagna et al., 2019)	12
Tabla 3-1: Eficiencia mínima de motores eléctricos IEC 60034-30 (IEC, 2011)	76
Tabla 3-2: Eficiencia de los variadores de frecuencia en función de su carga (%) y su potencia (hp) (U.S. Department of Energy, 2012)	78
Tabla 3-3: Valores de la constante C para diferentes valores de MEI y tipos de bombas (Europump, 2013)	80
Tabla 3-4: Niveles de eficiencia de sistemas simples por gravedad	107
Tabla 5-1: Abreviaturas y descripción de cada término utilizado en la tesis y en sus correspondientes publicaciones	122

Capítulo 1

Introducción

El agua es el componente más abundante en la superficie de la Tierra y el que mayor porcentaje representa en nuestro organismo, y es que, tal y como se dice habitualmente “el agua es vida”, y no es para menos, ya que sin ella la vida sería imposible. Del mismo modo, la energía ha sido, es y seguirá siendo una pieza fundamental para el confort humano y para el desarrollo social y económico de cualquier sector.

Agua y energía, dos piezas fundamentales en el día a día, interconectadas y ligadas la una a la otra, y cuya eficiencia es el centro de multitud de investigaciones actualmente. Una eficiencia en el uso del agua que pretende preservar el recurso hídrico disponible en el mundo, cada vez más escaso y de difícil acceso, y una eficiencia energética que pretende ahorrar costes y frenar el cambio climático, pues la generación de energía está relacionada con las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero.

El nexo agua y energía es evidente en multitud de procesos, siendo dependiente el uno del otro y viceversa. El agua es imprescindible en procesos energéticos, como

refrigeración o producción de energía hidroeléctrica. Del mismo modo, la energía está presente en todo el ciclo integral del agua: extracción del recurso mediante bombes, procesos de tratamiento y depuración, distribución del agua...

1-1. PERSPECTIVAS FUTURAS DEL NEXO AGUA Y ENERGÍA

En 1990 la población mundial era de 5300 millones de personas, siendo actualmente de 7700 millones, lo que supone un aumento del 45% en 30 años, y todos los estudios indican que el crecimiento va a continuar en las próximas décadas. El informe de la ONU sobre perspectivas de la población mundial, estima un aumento de habitantes que llegará a los 9700 millones en 2050, y que alcanzará los 11.000 millones en 2100, lo que supondría un aumento de más del doble de personas en apenas 100 años (United Nations, 2019). Este crecimiento poblacional hace suponer que en los próximos años la demanda hídrica y energética mundial aumentará. Con más personas, la demanda de agua será directamente mayor, tanto para satisfacer las necesidades humanas, como para hacer frente a una mayor demanda de alimentos y energía (WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO), 2019).

Así ha venido siendo hasta ahora, con un crecimiento anual de la demanda de agua en todo el mundo próximo al 1% desde 1980. Crecimiento fruto del aumento poblacional, desarrollo socioeconómico y evolución de consumos. Tal como puede verse en la Figura 1-1, actualmente el 69% del volumen de agua extraído en el mundo se destina a agricultura, el 19% a la industria, la cual incluye la generación de energía, y el 12% a los hogares y consumos municipales (WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO), 2019). En determinadas zonas, estos valores cambian, llegando a representar más del 90% el agua dulce extraída para agricultura, como sucede en Asia meridional (FAO Food and Agriculture Organization, 2016).

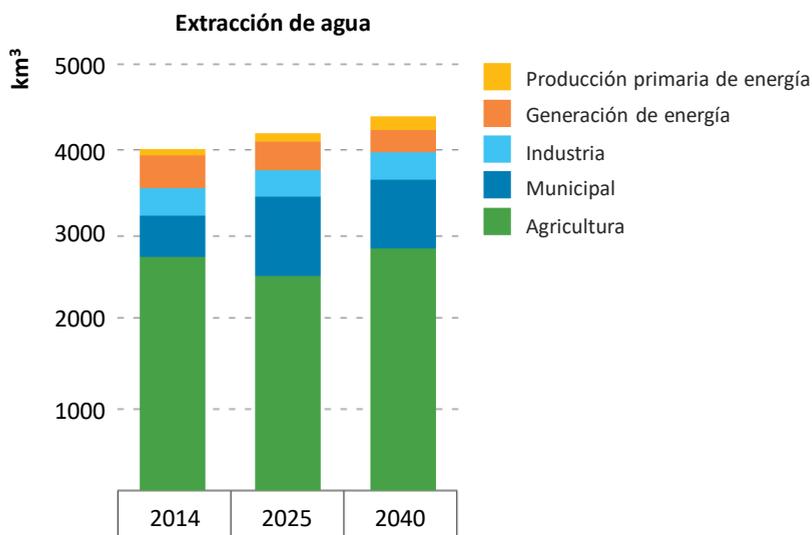


Figura 1-1: Demanda global de agua por sector (WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO), 2019)

Se estima que la demanda hídrica continúe creciendo un 1% anual como hasta ahora. Esto supone que en 2050 la demanda global de agua se habrá incrementado aproximadamente un 30% respecto a la demanda actual. Teniendo en cuenta que actualmente la escasez de agua afecta a dos quintas partes de la población mundial, se puede vaticinar que esta cifra se incrementará con el escenario futuro previsto (Naciones Unidas, 2019a), por lo que salvaguardar el recurso hídrico es de suma importancia.

Del mismo modo que se espera un aumento de la demanda hídrica, se estima que el consumo energético y de electricidad aumente en los próximos años en todo el mundo. La OEA y Naciones Unidas, estimaban en 2012 un crecimiento del 35% del consumo energético mundial para 2035 (Naciones Unidas, 2014), mientras que la Agencia Internacional de la Energía (IEA), prevé que la demanda energética tendrá un crecimiento constante del 1,3% anual hasta el año 2040, lo que supone que el consumo global de energía se incremente más del 25% entre 2020 y 2040 (IEA, 2019). Cabe destacar que este organismo pone especial énfasis en el aumento de la eficiencia energética como medio para hacer frente a este crecimiento a través de un modelo energético sostenible.

Todo indica que el escenario futuro estará regido por el aumento del consumo energético e hídrico, pero no hay que olvidar la interdependencia de estos dos recursos. El agua es esencial para la generación de energía, cualquier proceso energético necesita en algún momento el uso del recurso hídrico (extracción de materias primas, refrigeración de plantas, limpieza...). Del mismo modo, la energía es imprescindible en cada una de las etapas del ciclo integral del agua (captación, tratamiento, distribución, depuración...)

Según algunos organismos como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) o la Agencia Internacional de la Energía (IAE), el sector energético utiliza entorno al 10% del agua dulce total extraída a nivel mundial, llegando a representar el 40% en algunos países desarrollados (UNEP, 2014; IEA, 2020).

La dependencia del sector energético de un recurso vital como es el agua es evidente. El claro ejemplo está en la producción energética desde las centrales hidroeléctricas. En 2017 el 16% de la electricidad mundial fue generada a través de centrales hidroeléctricas, y aunque parece que la tendencia futura en energías renovables está en el sector fotovoltaico y eólico (IEA, 2019; IRENA, 2020), a día de hoy la producción hidroeléctrica es la fuente de energía eléctrica renovable más importante, representando el 68% de toda la electricidad renovable (IEA et al., 2019). Sin embargo, ha sufrido un descenso considerable (en 2010 representó el 82%) debido al rápido aumento de la generación de energía solar fotovoltaica, que se ha multiplicado por 10 en este periodo, reduciendo los costos en promedio un 80% (IRENA, 2020).

Del mismo modo que el sector energético necesita del recurso hídrico, el sector del agua requiere de manera imperiosa necesidades energéticas. Se cifra que alrededor del 4% del consumo de electricidad mundial se utiliza en procesos relacionados con el sector del agua, siendo esta cifra superior en algunas zonas del mundo como Oriente Medio, donde el sector del agua consume el 9% del consumo eléctrico (IEA, 2020).

Se estima que el aumento del consumo energético conllevará un crecimiento del 60% del consumo de agua por parte del sector energético entre 2014 y 2040 (IEA, 2017). Un pronóstico de crecimiento que entre 2012 y 2035 era del 85% según Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2014).

Para 2040 se estima que la cantidad de energía utilizada por el sector del agua será más del doble que la actual, pudiendo llegar a aumentar en un 80%. Este crecimiento se verá principalmente propiciado a proyectos de desalinización, que llegarán a representar el 20% de la demanda de electricidad relacionada con el agua. El crecimiento a nivel mundial del tratamiento de aguas y los grandes proyectos de trasvase también contribuirán a este aumento de la demanda energética por parte del sector del agua (IEA, 2017).

El pronóstico es claro, tanto la demanda hídrica como energética continuará aumentando considerablemente en los próximos años, y todo apunta a que la interdependencia de estos dos recursos se intensificará en el futuro, por lo que parece razonable que las políticas sobre agua y energía se desarrollen de manera conjunta.

Las estrategias a llevar a cabo para satisfacer las necesidades del aumento poblacional, y para poder hacer frente al actual cambio climático, pasan por la sostenibilidad de los recursos empleados en cualquier actividad, ya sea doméstica, industrial o agraria. Dado que el agua y la energía están prácticamente presentes en todos los procesos, un uso sostenible de estos recursos permitirá poder hacer frente al escenario esperado. Así se considera en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por las Naciones Unidas, donde dos de los diecisiete objetivos planteados están relacionados estrechamente con el agua y la energía. En concreto el ODS 6: Agua limpia y saneamiento y el ODS 7: Energía asequible y no contaminante. No parece casualidad que estén uno junto al otro, pues ambos recursos forman un nexo de unión de gran importancia.

El análisis de la International Energy Agency (IEA) destaca una serie de sinergias entre estos dos ODS, poniendo como ejemplo las zonas rurales, donde casi dos tercios de las personas que no tienen acceso a la electricidad tampoco tienen acceso al agua potable. Considerar las necesidades de suministro de agua cuando se planifica el suministro de electricidad puede ser una gran estrategia para optimizar el proceso de acceso a estos dos recursos (IEA, 2020).

Además, hay que recalcar que el *“Informe Mundial Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos”*, asegura que el cumplimiento de las metas establecidas para el ODS 6 contribuirá a alcanzar las metas de otros ODS como la seguridad alimentaria y energética, el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental, lo que ratifica

la importancia de lograr las metas establecidas en este ODS, tales como *“aumentar de aquí a 2030, el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce”* (Naciones Unidas, 2019a).

1-2. ENERGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

La producción de energía representa alrededor del 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero mundiales, siendo una gran contribuyente al cambio climático (Naciones Unidas, 2019b). En 2018 se alcanzaron niveles de récord en gases de efecto invernadero como el metano o el dióxido de carbono. Concretamente, el metano tuvo un incremento del 259% respecto al 2017, mientras que el dióxido de carbono creció un 147%. El aumento de las concentraciones de estos gases supone un aumento de las temperaturas. Esto ha hecho que la temperatura del planeta en 2019 esté 1,1 °C por encima de niveles preindustriales, pronosticándose un aumento de más de 3°C para el año 2100 si no se toman medidas urgentes (World Meteorological Organization, 2019).

Como resultado del crecimiento de la temperatura en el planeta, se prevé un incremento de los fenómenos meteorológicos extremos. Más de 160 millones de personas al año se ven afectadas por este tipo de desastres naturales: sequías, inundaciones, sismos, olas de calor... (Figura 1-2). Como consecuencia, uno de los grandes problemas, es la falta de garantías en la seguridad alimentaria de determinadas regiones del mundo. Las producciones se ven afectadas por estos fenómenos climáticos extremos, no llegando a producirse suficiente alimento para asegurar la alimentación de las personas.

Según el Foro económico mundial, tres de las cinco principales perspectivas de riesgo global para 2019 han tenido relación con el agua y el medio ambiente, tanto en términos de impacto como en términos de probabilidad. Destacan los eventos meteorológicos extremos, los desastres naturales y la falta de adaptación al cambio climático (World Economic Forum. Committed to improving the state of the world, 2019).

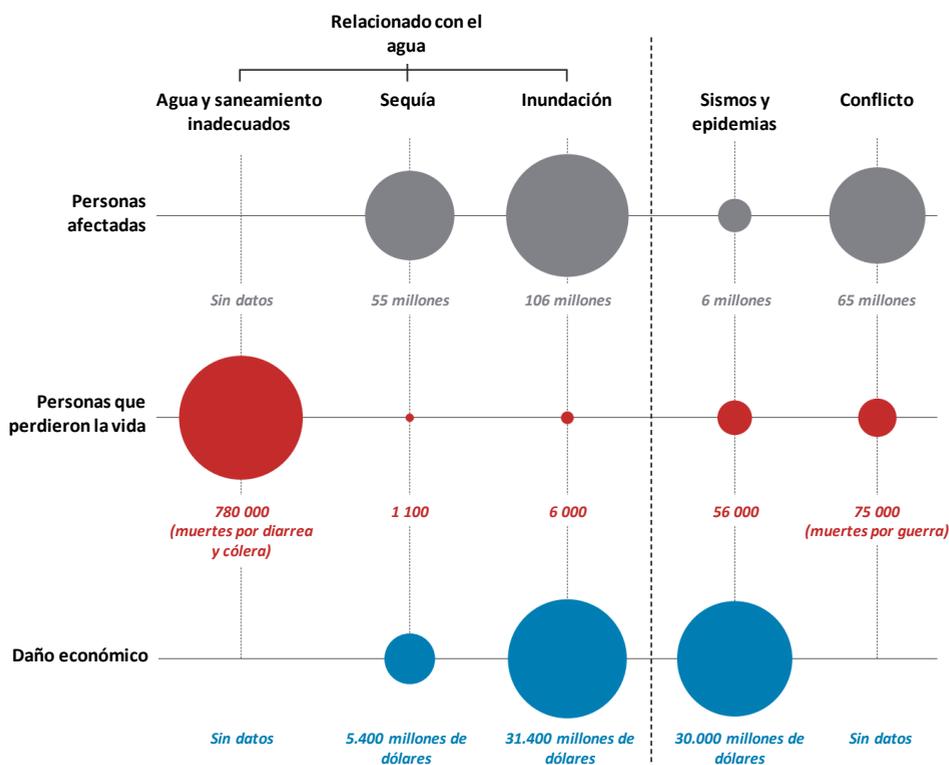


Figura 1-2: Impacto anual promedio por servicios inadecuados de agua potable y saneamiento, fenómenos extremos y conflictos (WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO), 2019)

Siendo la principal causa del aumento de temperatura en el planeta, se debe prestar especial atención a las emisiones de gases realizadas. El *“Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero”* correspondiente a los años 1990-2017 indica que el transporte es la actividad que mayores emisiones realiza, representando el 26,1% del total de las emisiones de España, seguido de la producción de energía y calor con un 20,2% (Gobierno de España: Ministerio para la Transición Ecológica, 2019). En Estados Unidos el transporte representó en 2017 el 29% de las emisiones totales realizadas, frente al 28% de la producción de electricidad (United States Environmental Protection Agency, 2019). Mientras que a nivel mundial, la producción de energía eléctrica y calor es el sector que mayores emisiones de CO₂ produce, representando el 49% del total de emisiones, mientras que el transporte representa el 20,4% (The World Bank, 2019).

Con la perspectiva futura esperada, y con el objetivo de frenar el cambio climático, la eficiencia energética debe ser una cuestión de suma importancia, y debe encabezar la gestión de los diferentes procesos industriales, agrarios e incluso domésticos. Estándares de energía con mayor eficiencia podrían disminuir el consumo energético en edificios e industrias en un 14% (Naciones Unidas, 2019b).

La meta establecida para el ODS 7 sobre duplicar la tasa mundial de mejora en la eficiencia energética, pone de relevancia este hecho. Además, algunos estudios afirman que mejorando la eficiencia energética se puede reducir la demanda de agua hasta un 15% en ciertas regiones (Linares and Khan, 2018), por lo que, con la mejora energética, no se consigue únicamente una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que se preserva un recurso tan importante como es el agua.

1-2.1. Huella de carbono

El concepto de huella de carbono aparece a finales de los años noventa, cuando la concienciación sobre el cambio climático comienza a tener cierta relevancia, especialmente tras la firma del conocido Protocolo de Kioto en 1997. Lo que en su momento eran conceptos técnicos que manejaban unos pocos especialistas en el tema, se ha convertido en vocabulario cotidiano con la crecida del movimiento contra el cambio climático de los últimos años. Hoy, podemos encontrar la definición de huella de carbono en el diccionario: *“totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto”*.

La huella de carbono cuantifica las emisiones de GEI que son liberados a la atmósfera al desarrollar cualquier actividad. Estas emisiones se clasifican en emisiones directas e indirectas.

Las emisiones directas, son aquellas producidas desde fuentes que están controladas por la organización que realiza la actividad. Coincide con emisiones liberadas en el sitio donde se produce la actividad, algunos ejemplos que clarifican la definición son: las emisiones del transporte, ya sea propio o alquilado, o las emisiones debidas a sistema de calefacción propios basados en quema de combustibles fósiles. En el ciclo integral del agua, un ejemplo de emisiones directas

es el metano y el óxido nitroso emitido en el tratamiento de aguas residuales, o las emisiones debidas a la puesta en funcionamiento de motores o grupos electrógenos diésel en sistemas de impulsión.

En cambio, las emisiones indirectas, aunque también son consecuencia de las actividades realizadas por la organización, se producen en fuentes que están controladas por otra organización. Un claro ejemplo es la electricidad consumida, si no existe un autoabastecimiento con fuentes renovables, las emisiones de la electricidad consumida son producidas en el sitio donde se genera. Otros ejemplos son las emisiones de los contratistas y servicios subcontratados por la organización, o la fabricación de productos químicos utilizados en la actividad. En el sector del agua, entre otras muchas, se clasifican como emisiones indirectas las emisiones de la energía comprada y utilizada para el bombeo y para el tratamiento en potabilización y depuración, o la liberación de metano y óxido nitroso de los lodos producidos en depuración que son destinados a los vertederos y a la agricultura.

El conocimiento de las emisiones procedentes de cualquier actividad, permite establecer medidas de reducción efectivas. Existen diferentes métodos para la estimación de la huella de carbono de una organización. Uno de los métodos más utilizados a nivel internacional es el GHG Protocol (WBCSD and WRI, 2012), el cual trata de proporcionar una serie de estándares a la hora de medir las emisiones de GEI. A partir de este protocolo se desarrolló la norma UNE-EN ISO 14064 sobre GEI, y otras normas entorno a ésta que tratan de ofrecer veracidad a los informes de cuantificación de emisión de GEI en Europa. Multitud de guías complementan a las normativas y protocolos existentes para el cálculo de la huella de carbono, como la IPCC 2006 GHG Workbook, con su última actualización de 2019 (Calvo Buendia et al., 2019). En 2010, la Comisión Europea publicó dos informes que recogen diferentes metodologías internacionales para el cálculo de la huella de carbono, analizando y comparando cada una de las metodologías, y proponiendo algunas recomendaciones al respecto (Marsh-Patrick, 2010; Chomkhamsri and Pelletier, 2011). También se han desarrollado calculadoras y herramientas que facilitan el cálculo de las emisiones, como las del GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol, 2017), la ofrecida en España por el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO, 2019), o, entre otras muchas, la ofrecida por la EPA (United States Environmental Protection Agency) cuya última actualización es de marzo de 2020 (EPA, 2020).

Como se ha visto, existen multitud de estudios, publicaciones y herramientas para realizar la estimación de las emisiones de GEI de forma genérica, para cualquier tipo de sector o actividad, pero, además, existen diferentes proyectos centrados en el cálculo de la huella de carbono de sectores concretos. El GHG Protocol, cuenta con herramientas específicas destinadas al cálculo de emisiones en el transporte, o de emisiones producidas por aparatos como los equipos de refrigeración y aire acondicionado (Greenhouse Gas Protocol, 2017). Por su parte, el MITECO, ofrece herramientas y guías para realizar el cálculo de la Huella de Carbono en sectores tan concretos como ayuntamientos o explotaciones agrícolas (MITECO y OECC, 2019), donde la última actualización del informe es septiembre de 2019, lo que deja entrever que sigue siendo un asunto de suma importancia.

En el sector del agua también se ha trabajado en la creación de guías y protocolos para el cálculo de las emisiones de GEI, prueba de ello es el proyecto WaCCliM (Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation), un proyecto mundial cuyo objetivo es descarbonizar el sector del agua y contribuir así a mitigar el cambio climático. Este proyecto ha permitido desarrollar la herramienta ECAM (Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool), una herramienta que ya va por su segunda edición y que está pensada para que las empresas de servicios de agua puedan evaluar sus emisiones de GEI (WaCCliM, 2018). ECAM no solo evalúa las emisiones de las diferentes fases del ciclo integral del agua, también evalúa el rendimiento energético e identifica oportunidades para lograr ser más eficientes y reducir las emisiones de CO₂.

1-3. ENERGÍA EN EL CICLO URBANO DEL AGUA

Con la importancia que tiene la energía en el cambio climático, parece evidente que la actuación directa sobre ella en cualquier actividad tendrá un beneficio en la emisión de gases de efecto invernadero. Concretamente, en el ciclo integral del agua, la energía está presente en prácticamente todas las etapas, por lo que la mejora de su eficiencia en este sector contribuirá a frenar el creciente cambio climático.

El ciclo urbano del agua se puede dividir en dos partes. Una primera parte que abarca desde la captación del recurso, hasta su consumo final, y una segunda parte

que engloba desde el drenaje hasta su retorno al medio o reutilización. La primera parte, que se correspondería con el suministro de agua, tiene diferentes fases, comenzando por la captación del recurso en el medio natural y su transporte hasta la planta de tratamiento, pasando por el propio tratamiento y/o potabilización, y finalizando con la distribución del agua tratada hasta el punto de consumo de los usuarios.

Cada una de estas fases tiene un consumo energético determinado, representando, actualmente, la fase del transporte de agua a presión (suministro y distribución) aproximadamente la mitad del consumo energético (Magagna et al., 2019). La previsión de los informes realizados por la Agencia Internacional de la Energía es que el consumo eléctrico en el sector del agua crezca en los próximos 20 años alrededor del 50% (Figura 1-3). En cambio, en este aumento del consumo eléctrico, apenas aumenta el consumo por transporte de agua a presión, siendo el principal causante del aumento la desalación y el trasvase de agua (Magagna et al., 2019), tal como puede verse en la Figura 1-3. Hechos cuya explicación podría darse debido a la creciente falta de recursos hídricos superficiales, potenciando la desalación de agua marina y el trasvase de agua desde las zonas con mayor recurso a las zonas con escasez del mismo.

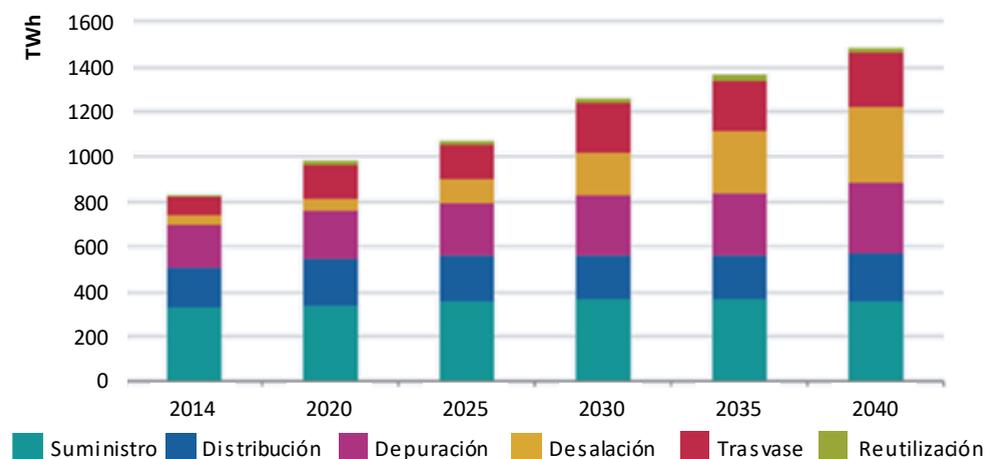


Figura 1-3: Consumo eléctrico en los procesos del sector del agua (Magagna et al., 2019)

El sector del agua representa un 2,60% del consumo energético total europeo, siendo la fase de distribución el 1,13%, tal como puede verse en la Tabla 1-1. Cabe destacar en esta tabla que, pese a que la desalación únicamente representa el 2,1% del volumen de agua, usa el 25,7% de las necesidades energéticas del sector, lo que pone de relevancia que este tipo de tratamiento conlleva un gran consumo energético.

Tabla 1-1: Desglose del volumen tratado de agua y de las necesidades de energía para cada etapa del sector del agua en 2017 (Magagna et al., 2019)

Etapa de uso	Volumen (billones m³)	Energía (GWh)	Energía (%)	% sobre el total de electricidad en EU
Suministro de agua potable	49,5	35.000	43,5%	1,13%
Desalación para uso municipal	2,1	20.695	25,7%	0,67%
Depuración de agua	47,9	24.747	30,8%	0,80%
Total	99,5	80.442	100%	2,60%

Aunque el sector del agua, en el ámbito europeo, no represente una cantidad muy elevada del gasto energético total, se le debe prestar la atención que merece, ya que en otros territorios puede suponer un gasto energético mucho más elevado. En el caso de la India, el bombeo de agua representa entre el 20 y el 30% de toda la electricidad del país (Howells, 2018).

Tradicionalmente, la mejora de la eficiencia en los sistemas de distribución de agua, ha venido encabezada con el objetivo de preservar el recurso hídrico mediante la reducción de fugas y la gestión de la demanda. En 2005, se publicó la relevancia del binomio agua-energía en el Estado de California, estimando que el 19% del total de energía utilizada en este Estado se asociaba al uso del agua en diferentes sectores, y cuantificando el consumo energético en el sector del agua en un 3,8% del total del Estado (Klein et al., 2005). Incluso se especificó la intensidad energética media de algunos de los procesos, a destacar los 0,32 kWh/m³ de la fase de distribución y los 0,66 kWh/m³ de la depuración.

A partir de esta publicación, diferentes estudios buscaron cuantificar el nexo agua-energía en el ciclo urbano del agua, con el objetivo de proponer medidas de mejora

conjuntas que permitan optimizar la eficiencia hídrica y energética de los sistemas. Incluso determinados organismos, han cuantificado el impacto energético del ciclo integral del agua en sus sistemas, como ha hecho el Canal de Isabel II en el informe “Huella energética en el ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid” (Ferrer Polo et al., 2017), del que se desprende que la fase con mayor consumo específico de energía es la depuración (0,33 kWh/m³) seguida de la aducción (0,15 kWh/m³).

La conclusión de este informe, afirma que, para conseguir la reducción del consumo energético de la instalación, debe adecuarse el número de bombas necesarias y su punto de funcionamiento. La instalación de sistemas de control y variadores de frecuencia ayudará a lograr la mejora de la eficiencia energética, pudiendo llegarse a un ahorro del 10% del consumo energético total. En definitiva, mejorar cualquier factor relacionado con el gasto energético de un sistema de agua a presión, conlleva una reducción de la energía necesaria y un aumento de su eficiencia

Tal como indica la Agencia Internacional de la Energía, existe un potencial significativo de ahorro de energía en el sector del agua. Para lograrlo se debe apostar por la eficiencia energética de los procesos, y por la recuperación de energía disponible en el sector (IEA, 2020). Un ejemplo es la depuración de aguas residuales, las cuales contienen cantidades significativas de energía incorporada que, si se aprovechan, podrían cubrir alrededor del 50% de las necesidades de electricidad de los servicios públicos municipales. También existe una gran oportunidad para reducir las pérdidas de agua por fugas, roturas y robos, lo que además de ahorrar agua, ahorraría energía (IEA, 2020).

1-3.1. El coste energético en los servicios de agua

La energía empleada en los servicios de agua puede suponer un importante coste, llegando a representar el 14% de los costes totales, siendo el coste energético del transporte y el tratamiento de agua, de entre el 60 y el 80% del coste energético total (World Water Assessment Programme, 2009). Por lo tanto, la eficiencia energética en el sector del agua, además de contribuir a frenar el cambio climático, puede conllevar importantes ahorros en el servicio. Estos costes energéticos vienen aumentando a nivel mundial desde 1970, estimándose que seguirán creciendo en el futuro, o al menos esa es la tendencia, tal como puede verse en las siguientes gráficas.

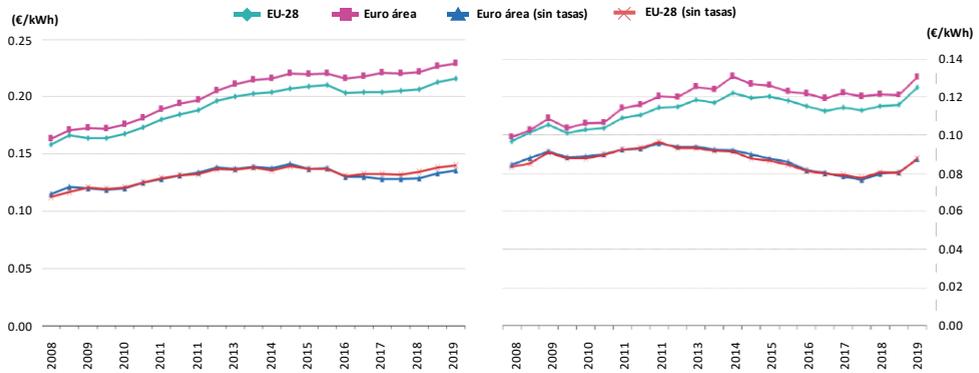


Figura 1-4: Evolución de los precios de la electricidad para consumidores domésticos (izquierda) y no domésticos (derecha) en EU (Eurostat, 2018)

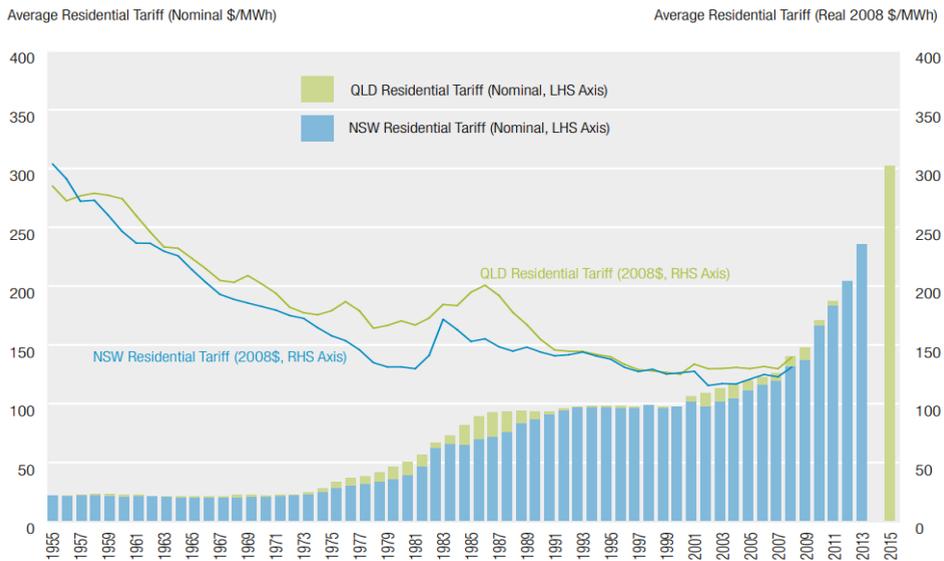


Figura 1-5: Evolución de los precios de la electricidad para consumidos domésticos y no domésticos en Australia (CEDA-Committee for Economic Development of Australia, 2012)

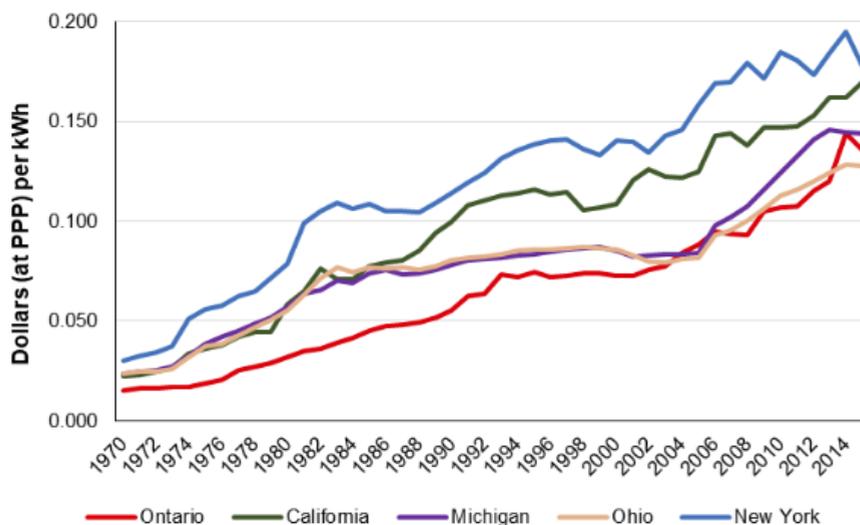


Figura 1-6: Ingresos de la compañía eléctrica por kWh para clientes residenciales de algunos estados de Norte América (Fremeth, 2018)

Según el “XV Estudio nacional sobre suministro de agua potable y saneamiento en España”, los costes energéticos en la fase de depuración suponen el 15% del total, mientras que en abastecimiento representan el 5% (AEAS and AGA, 2018).

En los últimos años, existe un creciente interés en realizar el abastecimiento mediante fuentes de energía renovables, especialmente mediante energía solar fotovoltaica, y en particular en el sector del riego, tal como se verá en el punto 1-4. Esta tecnología puede conllevar un ahorro considerable en los costes del servicio (Sánchez, 2019).

El uso de energías renovables como fuente de abastecimiento energético es creciente en todos los sectores. Crecimiento impulsado, en parte, por las políticas de regulación establecidas, como el posible aumento de la tasa ambiental a pagar por cada tonelada de CO₂ emitida. Red Eléctrica de España, estima que la energía solar fotovoltaica será la energía que más crezca entre 2025 y 2030, un 36%, seguida de la energía eólica con un crecimiento del 15% (MITECO, 2020). Por su parte, la Agencia Internacional de la Energía, estima que, para 2030, el 57% de la electricidad podría ser renovable (de la cual el 34% provendría de la energía solar y eólica) y esta proporción podría alcanzar el 86% en 2050 (de los cuales el 60%

vendría del sol y del viento). Esta aceleración en el despliegue de las energías renovables, combinada con el aumento de la electrificación y la eficiencia energética, podría lograr más del 90% de las reducciones de las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la energía que se necesitan para 2050 (IEA et al., 2019)

Existe una clara tendencia a tratar de conseguir, en un futuro no muy lejano, una huella de carbono neutra. Un objetivo ambicioso para todos los sectores, pero cuya hoja de ruta está cada vez más documentada y trabajada, prueba de ello es la guía publicada en el proyecto WaCClim: *“The Roadmap to a Low-Carbon Urban Water Utility”* (Ballard et al., 2018), o el lanzamiento realizado por la Comisión Europea en 2018 del plan estratégico a largo plazo para lograr una descarbonización de la economía en 2050 (European Commission, 2018). Para alcanzar este objetivo, desde España se ha lanzado el *“Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030”* (PNIEC), que pretende reducir en 2030 un 90% las emisiones de GEI respecto a 1990. Un reto difícil de lograr sin el consecuente avance de las energías renovables, y la descarbonización del sector eléctrico (MITECO, 2020).

En este Plan, se proponen medidas específicas para mejorar la eficiencia energética de las diferentes fases del ciclo integral del agua. Destacando la importancia de conocer los procesos y sistemas de gestión llevados a cabo, así como las tecnologías encaminadas a mejorar su eficiencia.

Aunque se vaticine un aumento de las energías renovables en el sector del agua, y se posicione la energía solar como firme candidata a ser la solución para conseguir una descarbonización completa del transporte de agua a presión, la realidad es que actualmente la gran mayoría de sistemas de impulsión, tanto en abastecimientos urbanos como en regadíos, se realiza a través de conexiones eléctricas tradicionales. Por lo que, por el momento, se tratará de minimizar la emisión de GEI maximizando la eficiencia energética de las redes de agua.

1-3.2. Mejora del nexo agua-energía en el ciclo integral del agua en España

El problema energético en las redes de agua a presión viene tratando de resolverse desde hace años. Ya en 2005, desde el IDAE, se creó un documento con la intención

de mejorar la eficiencia energética en regadío (IDAE, 2005). Diferentes estrategias y técnica se han ido implementando desde entonces en los servicios de agua con la intención de mejorar su eficiencia energética, técnicas como el aprovechamiento de biogás en EDAR, o la utilización de energías renovables para realizar el abastecimiento.

En el sector del agua, el consumo de energía por cada metro cúbico de agua utilizado en España es actualmente de 0,98 kWh/m³ (AEAS and AGA, 2018), bastante inferior al valor de 2,87 kWh/m³ estimado en 2007 (Corominas, 2010), y al valor de 1,12 kWh/m³ estimado para la ciudad de Valencia en 2009 (Murgui et al., 2009). Aunque el principal descenso del consumo energético específico se ha producido en la desalación. En los años 70, las primeras plantas de desalación por evaporación consumían más de 50 kWh/m³, cifra inasumible que en los años 80 pasó a ser menos de la mitad con la llegada de las primeras plantas de ósmosis inversa (del Villar, 2014). Este valor que se ha ido optimizando con la evolución de la tecnología, desde los 5,3 kWh/m³ de 1995, hasta los actuales 2,9 kWh/m³ para agua marina (Durán, 2018). Con una optimización de la tecnología se podrían llegar a valores por debajo de 2,5 kWh/m³ (Uche, 2013; Voutchkov, 2016).

En 2010, con escasez de datos, se estimaba que el consumo de la fase de abastecimiento (captación, tratamiento y distribución) era del orden de 0,4-1 kWh/m³, y la fase de saneamiento de 0,5-0,7 kWh/m³ (IDAE, 2010), siendo actualmente, con datos mucho más precisos, la fase de depuración de 0,43 kWh/m³ y la fase de abastecimiento de 0,48 kWh/m³ (AEAS and AGA, 2018). Esto indica que, casi la mitad del consumo energético actual se emplea en la fase de abastecimiento (0,48 kWh/m³ respecto a los 0,98 kWh/m³ totales). Además, el 63% de los operadores calculan la huella de carbono que se produce en su abastecimiento, y cuentan con planes para mitigar o compensar las emisiones realizadas (AEAS and AGA, 2018), lo que pone de relevancia la creciente concienciación en la necesidad de reducir el consumo energético, y tender a una huella de carbono neutra.

La energía requerida para hacer frente a los diferentes procesos del ciclo integral del agua, dependerá de varios factores, como la calidad del recurso, la tecnología empleada, o como no, la cantidad de agua a suministrar y depurar. Cuanto menos suministro de agua se precise, menor energía se requerirá en ambas fases. En este sentido, también se han logrado mejoras, puesto que la dotación empleada media

se ha reducido desde 2007 más del 20%, pasando de 301 a 240 litro por habitante y día en 2016 (AEAS and AGA, 2018). Esto es debido tanto a la gestión de la demanda realizada, como a la mejora en la detección de fugas y la implementación de tecnologías para aumentar la eficiencia hídrica de las redes.

Una de las medidas más utilizada en cuanto a la reducción de agua fugada, es la sectorización de los sistemas. El 88% de las redes de distribución de España está sectorizada, con 15 sectores de media para áreas metropolitanas y 34 para municipios de más de 100.000 habitantes. Esto permite realizar una mejor gestión de la presión y del volumen de agua de cada sector, lo que permite aumentar la eficiencia hídrica y energética de la red. Además, aproximadamente, el 95% de los municipios llevan a cabo campañas de detección de fugas en aproximadamente el 70% de la red (AEAS and AGA, 2018).

Con estas medidas, se ha logrado que la media del agua no registrada (ANR) en España sea del 22,2%. De este 22,2%, el 12,2% se estima que es debido a pérdidas reales (fugas en la red y acometidas y roturas) mientras que el 10% restante son pérdidas aparentes (1,6% consumos no autorizados, 2,7% consumos autorizados no medidos y el 5,7% errores de los contadores).

La evolución de las cifras e investigaciones desarrolladas en España en los últimos años, indica que se está realizando un esfuerzo considerable por mejorar la eficiencia del ciclo integral del agua, y no puede ser de otra forma para hacer frente al escenario futuro de escasez y demanda que se espera.

1-4. ENERGÍA EN EL SECTOR DEL RIEGO

Como se ha visto en el apartado anterior, el ciclo urbano del agua representa un importante consumo de agua y energía. No obstante, no hay que dejar de lado el consumo de estos dos recursos por parte del sector del riego. Con el aumento de población producido en los últimos años, y el derivado crecimiento de necesidades alimentarias, la demanda de agua de riego se ha visto incrementada considerablemente.

Con el objetivo de aumentar la eficiencia hídrica del sector, a principios de siglo XXI se llevó a cabo un cambio en las técnicas de riego, modificando el riego en lámina

libre por el riego presurizado. Esta modernización del sector aumentó la eficiencia en el uso del agua, pero también la dependencia y el uso de la energía por parte de los agricultores (Villamayor-Tomas, 2017). Con el paso de los años, la eficiencia hídrica en el riego ha venido acompañada del aumento del consumo energético en este sector. Un buen ejemplo es la situación acontecida en España con la modernización del riego.

1-4.1. Cambios energéticos en el sector del riego en España

En el período comprendido entre 2002 y 2015, se llevó a cabo en España el proceso de modernización del riego, con el objetivo de mejorar la eficiencia hídrica y la producción agraria (Berbel et al., 2019). No obstante, este cambio de regadío, conllevó un aumento de la superficie regable, y un aumento del consumo de agua, aunque este consumo es más eficiente que con el riego tradicional por gravedad.

En el caso de España, la superficie regada aumentó un 7,04% entre 2009 y 2019. Siendo el riego localizado la tecnología que más se ha visto incrementada, un 18,77% en los últimos 10 años. En el lado opuesto, el riego por gravedad, ha disminuido un 8,94% para el mismo periodo de tiempo (Ministerio de agricultura, 2019), tal como puede verse en la Figura 1-7.

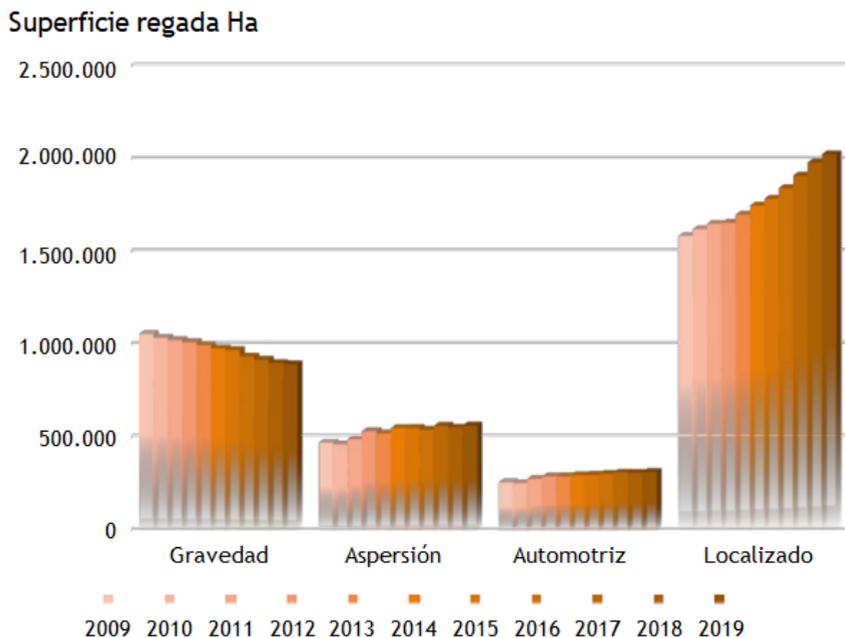


Figura 1-7: Evolución de la superficie regada en España según tipos de riego (Ministerio de agricultura, 2019)

El cambio en las tecnologías del riego, ha llevado a un aumento del consumo energético del sector. En la Figura 1-8 se muestra la relación entre la extracción y uso del agua, y el consumo energético que conlleva. Se puede ver como entre el año 2000 y 2017, consumos de agua similares requieren cada año más energía. Una conclusión similar a la que publicó Corominas, 2010 en su relevante estudio sobre el agua y la energía en el riego en España, donde se indica que la superficie de riego se incrementó 2,5 veces entre 1950 y 2007, al igual que el consumo de agua. el Mientras que la energía se multiplicó por 19 en el mismo periodo de tiempo.

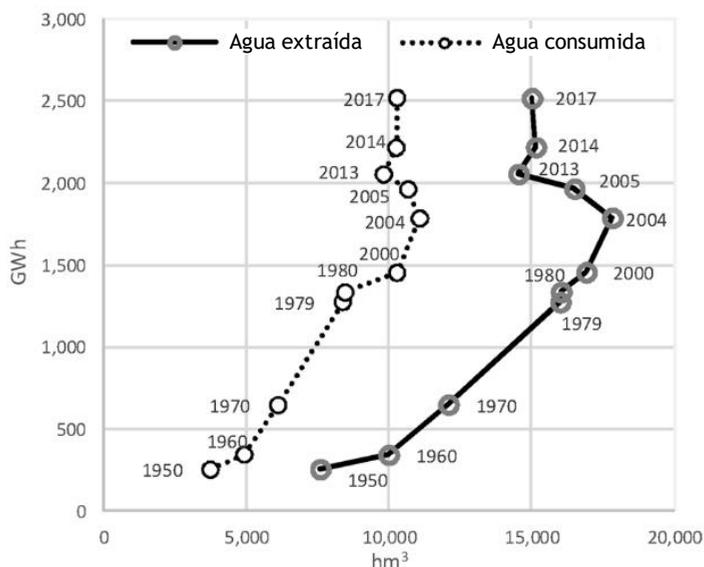


Figura 1-8: Evolución del agua extraída y consumida frente a la energía utilizada para el riego en España (Espinosa-Tasón et al., 2020)

La agricultura de regadío en España tiene una gran importancia tanto a nivel nacional como internacional. Representa casi un tercio de la superficie total de regadío de la Unión Europea, y produce el 80% de las exportaciones agrícolas totales de España.

Es un sector cuyo gasto hídrico y energético es de suma relevancia, representando el 40% de la demanda total de electricidad relacionada con el agua (Villamayor-Tomas, 2017), y alrededor de un 3% del consumo energético total nacional (IDAE, 2019). Además, consume unas tres cuartas partes de los recursos hídricos totales de España (Villamayor-Tomas, 2017; Berbel et al., 2019).

El aumento del consumo energético debido al cambio en las tecnologías de riego, junto a las diferentes políticas del sector eléctrico, ha provocado un incremento de los costes de las comunidades de regantes, principalmente por el aumento del coste del término de potencia. Como se verá más adelante, el riego a través de bombeos solares está siendo la solución financiera para muchas comunidades de regantes.

1-4.2. Sobreexplotación de acuíferos y aumento de energía

La extracción mundial de aguas subterráneas ha aumentado considerablemente desde 1950. Esto ha llevado a una sobreexplotación de acuíferos generalizada, y un aumento exponencial del consumo energético debido al aumento de altura de bombeo que conlleva el descenso del nivel freático. Es necesario estimar el consumo de energía en los sistemas de riego presurizado en general, y de manera especial en estas zonas con sobreexplotación de acuíferos, con la intención de reducir las emisiones y la mejora de la eficiencia del riego.

En España, la fuente principal de agua es superficial y supone el 68% del total de agua extraída, seguida con un 28% de las aguas subterráneas y en menor porcentaje del agua procedente de trasvases, desalación y aguas depuradas (Camacho et al., 2017). No obstante, en muchos países del mundo, la principal fuente de agua para riego es la subterránea. El riego que depende de las aguas subterráneas es uno de los métodos de irrigación que más energía consume, teniendo una mayor emisión de gases de efecto invernadero que el riego desde aguas superficiales (Acharya et al., 2015).

Este es el caso de la llanura del norte de China, donde el consumo actual de energía para el riego también se ha visto incrementada considerablemente, 2,9 veces desde 1986 a 2005, y se ha convertido en el mayor consumidor de energía del mundo en riegos con agua subterránea (Chen et al., 2019). Algo similar ocurre en otras zonas del mundo como Estados Unidos (Smidt et al., 2016) o India, donde el bombeo para riego contribuye en un 11% a la emisión total de carbono del país (Rajan et al., 2020).

1-4.3. Energía solar fotovoltaica

En el sector del riego, los costes energéticos suponen entre un 40 y un 70% de los costes totales del sector (WWF, 2015), suponiendo el mayor gasto de los costes de operación y mantenimiento (Rodríguez-Díaz et al., 2011). Estos costes se han incrementado desde la modernización del regadío, suponiendo un incremento del coste en algunos casos del 400% y el 500% en menos de 5 años (Rodríguez-Díaz et al., 2011; WWF, 2015). Esto es debido tanto al aumento del consumo energético, como al aumento de las tarifas eléctricas.

Con el propósito de combatir las consecuencias de la creciente demanda energética de los sistemas de riego, diferentes investigaciones y proyectos se están llevando a cabo para abastecer los sistemas de bombeo mediante energía fotovoltaica, con el objetivo de producir energía para el autoconsumo y así reducir los costes energéticos de los sistemas de riego modernizados (Abu-Aligah, 2011; Yadav et al., 2019; Mukherjee and Sengupta, 2020).

Desde 2010 han crecido las publicaciones científicas y los proyectos relacionados con bombeos abastecidos mediante energía solar, en especial bombeos destinados a regadíos (Zhang et al., 2018), lo que hace suponer que será una tecnología en continuo avance y mejora. Algunos estudios revelan que la energía solar fotovoltaica es la fuente de energía más viable desde el punto de vista económico y ambiental para el bombeo en determinadas redes de riego (Mérida et al., 2019). En algunos casos donde ya se ha implementado esta tecnología, los costes de las comunidades de regantes se han visto reducidos hasta en un 75% (Sánchez, 2019).

El proyecto europeo MASLOWATEN es un ejemplo, propone sistemas de riego fotovoltaico (PVIS de sus siglas en inglés photovoltaic irrigation systems) de alta potencia, tanto independientes como híbridos (con grupos diésel o con conexión a red eléctrica). Este proyecto enmarcado en los fondos para proyectos relacionados con el Horizonte 2020, finalizó recientemente y ha sido capaz de mostrar la viabilidad técnica y económica de estos PVIS de gran potencia (Almeida et al., 2018).

Esta tecnología reduce en gran medida los costos operativos y el consumo de agua, al utilizar técnicas de agricultura de precisión y riegos de baja presión. En este proyecto, el ahorro en el coste energético ha supuesto entre un 60% y un 80%. Mientras que el consumo de agua se ha visto reducido en un 30% aproximadamente (EASME European Commission, 2019).

Aunque exista un crecimiento de los bombeos solares, y todo indique que este puede ser un gran paso para la descarbonización del riego, no hay que olvidar la importancia que tiene del diseño de las redes en el consumo energético final. Desde el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) se recomiendan algunos criterios de diseño para disminuir el consumo energético de los sistemas de agua a presión. Criterios basados en la topografía del terreno, proponiendo sectorizar por hidrantes situados a cotas similares, y por parcelas con una tipología

de riego similar con el objeto de evitar la utilización de válvulas reductoras de presión (PRVs), encargadas de disipar parte de la energía que se ha introducido a la red, y por tanto ineficientes desde el punto de vista energético. Estas medidas, junto a la implementación de turnos de riego que permitan regar zonas con demanda de presión similares, y la utilización de bombeos con variador de frecuencia que permita adaptar la altura de la bomba a las demandas de presión de los hidrantes, son algunas de las medidas propuestas por el IDAE con el objeto de mejorar la eficiencia energética en el regadío y la disminución de los costes que representa (Sánchez de Vera, 2017). Estos criterios de diseño y gestión están en línea con los propuestos en este trabajo.

1-5. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

La tendencia futura hacia un crecimiento en las demandas hídricas y energéticas, junto a la conveniencia de frenar el cambio climático reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, ponen de relevancia la importancia de optimizar cualquier proceso relacionado con el nexo agua y energía. El transporte y distribución de agua a presión, es un claro ejemplo de este nexo, ya que es imprescindible aportar energía al fluido para llevarlo desde la fuente de captación hasta las estaciones de tratamiento o puntos de consumo. Esta etapa del ciclo integral del agua, es una de las que mayor energía consume, representando habitualmente un importante porcentaje de los costes totales del servicio, por lo que parece oportuno hacer una revisión en profundidad de las necesidades energéticas de esta fase.

El gran movimiento ecológico que emprendió a finales del siglo XIX y que se ha visto potenciado en los últimos años, trata de promover productos o actividades que no son perjudiciales para el medio ambiente. El presente trabajo, enmarcado en este tendencioso movimiento ecológico, se desarrolla con el objetivo de minimizar la demanda energética en la fase de transporte y distribución de agua, los costes asociados a ella, y las emisiones de gases de efecto invernadero derivados de esta actividad. Se persigue reducir los efectos perjudiciales para el medio ambiente que puede causar el transporte de agua a presión, principalmente desde el punto de vista energético, pero también desde la perspectiva de preservación del recurso hídrico.

Para lograr estos objetivos, se plantea un protocolo de actuación, en el que se presentan diferentes etapas a llevar a cabo para la mejora energética de los sistemas de distribución de agua a presión. Un protocolo que analiza energéticamente tanto la fase de diseño como la fase de explotación del sistema. Al proceso de minimizar el gasto energético de las redes en su fase de diseño, se le ha denominado ecodiseño. De la misma manera, al proceso de minimizar el gasto energético en la fase de explotación de la red, se le ha llamado ecogestión, lo que lleva al título del presente trabajo: “Ecodiseño y ecogestión en redes de distribución de agua”.

En la fase de diseño, se tendrá en cuenta la energía requerida por la instalación para decidir el diseño final, algo que tradicionalmente no se ha venido haciendo. Habitualmente, los diseños han venido favorecidos principalmente por el ahorro de los costes de construcción y explotación del sistema. De este modo, es usual encontrar diseños radiales concebidos para minimizar diámetros y costes de tubería y construcción. Así como diseños pensados para bombear agua a un depósito en horas valle, cuando la energía es más barata, para posteriormente abastecer por gravedad en horas punta, cuando la energía es más cara.

Ante el cambio de paradigma energético existente, con una irrupción de las energías renovables que puede provocar un cambio del mercado eléctrico, este modelo de abastecimiento puede quedar obsoleto en el futuro. Por ello, se cuestiona los diseños tradicionales y se proponen unas pautas a seguir para que el trazado del sistema y las fuentes de suministro, permitan que la energía consumida por el sistema en fase de explotación sea la menor posible. Se apuesta por un ecodiseño que minimice las exigencias energéticas de la red, tanto la potencia máxima que se demande (kW) como la energía que se consuma (kWh), sin depender el diseño de las condiciones del mercado eléctrico. De este modo, se atiende a la física del sistema como principal eje de su concepción.

En fase de explotación, se siguen parte de las directrices dictaminadas por la Comisión Europea en su sistema de ecogestión y auditoría medioambiental EMAS: “*Eco-Management and Audit Scheme*” (European Parliament, 2009). Con el EMAS, se pretende que las empresas y organizaciones tengan un plan de acción medioambiental definido que les ayude a tener un crecimiento sostenible. Para ello, en primer lugar, debe realizarse un análisis o diagnóstico que permita medir el

desempeño ambiental que realiza la organización, y proponer medidas que ayuden a mejorarlo mediante métodos de gestión ambiental. La efectividad de las medidas, se verifica a través de auditorías internas que supervisen el desempeño de los procedimientos y prácticas implementados.

A las organizaciones que cumplen con el esquema EMAS, se les otorga una etiqueta de reconocimiento que permite darles visibilidad y reconocimiento por su definida política medioambiental. Siguiendo un esquema similar al EMAS, se ha planificado la ecogestión de los sistemas de distribución de agua en el protocolo de este trabajo. Se parte de un diagnóstico energético de la red y se finaliza en un etiquetado que permite visibilizar la eficiencia energética del sistema.

El comienzo del protocolo planteado, en su fase de ecogestión, se corresponde con la realización del diagnóstico energético del sistema. Esta fase permite evaluar el margen de mejora energético de la red, en caso de ser relevante, se concretará el destino de la energía inyectada en el sistema mediante la correspondiente auditoría energética.

La auditoría energética permite conocer de manera detallada, el uso que tiene la energía que se inyecta al sistema, la cual se puede clasificar en tres partes:

- Energía mínima requerida. Que es la energía utilizada para garantizar las exigencias del servicio, es decir, la demanda de agua de los usuarios a una presión mínima requerida.
- Pérdidas energéticas estructurales: energía destinada a vencer los desniveles de terreno, llamada energía topográfica.
- Pérdidas energéticas operacionales: energía empleada en ineficiencias del sistema vinculadas a la fase de funcionamiento y gestión de la red, como ineficiencias en la estación de bombeo, energía embebida en fugas, pérdidas energéticas por fricción o excesos de presión innecesarios.

Lo ideal sería que toda la energía inyectada se destinase a cubrir exclusivamente la energía mínima requerida, pero esto sería un escenario hipotético e ideal, puesto que las pérdidas energéticas, ya sean estructurales u operacionales, no pueden eliminarse por completo. No obstante, estas pérdidas energéticas pueden minimizarse.

A lo largo del trabajo se proponen objetivos energéticos alcanzables, basados en criterios económicos y de gestión, de cada una de las pérdidas. Se trata de establecer una hoja de ruta encaminada a reducir cada pérdida energética hasta su nivel de referencia definido, con el objetivo de minimizar el consumo energético total del sistema. Un proceso de minimización energética que garantiza que se cumplan los requerimientos del servicio en cuanto a demanda de los usuarios y presión mínima de servicio a cumplir en los puntos de suministro.

La inversión necesaria para lograr minimizar cada pérdida puede ser muy elevada, llegado el momento, puede darse que la inversión a realizar para reducir la energía no sea rentable. Por esta razón, en el protocolo de actuación propuesto, cada medida de actuación se acompaña de un análisis económico que evalúa la viabilidad de la acción.

El protocolo de actuación diferencia dos tipos de análisis a realizar, por un lado, un análisis enfocado a gestionar las pérdidas energéticas estructurales, donde el layout del sistema juega un papel fundamental (entendiendo layout como el diseño realizado del sistema en cuanto al trazado definido y sus fuentes de suministro). Por otro lado, la gestión de las pérdidas operacionales, centradas en el análisis de las estaciones de bombeo, fugas y fricción.

Tras la auditoría energética de la red, en primer lugar, se realiza el análisis de la gestión de pérdidas estructurales, en el que se prioriza el análisis del layout del sistema para reducir esta componente energética, seguido de una propuesta de recuperación de energía y finalizando con la opción de disipar sobrantes energéticos. Una vez propuestas las medidas de mejora para las pérdidas estructurales y analizado el alcance que tendría la implementación de estas medidas, se pasa a analizar las pérdidas energéticas operacionales.

En la gestión de las pérdidas energéticas operacionales, se prioriza la implementación de medidas en las pérdidas que mayor margen de mejora tengan. Este margen de mejora se establece tras el análisis de un indicador propuesto que compara las pérdidas operacionales obtenidas mediante la auditoría, con el nivel objetivo a alcanzar que se haya definido para cada pérdida, y teniendo en cuenta el peso que representa cada pérdida sobre el total energético consumido por la red.

De una manera similar a la propuesta por el EMAS, tras cada implementación de propuesta de mejora energética, tanto estructural como operacional, se realiza un proceso de revisión, auditando de nuevo la red para comprobar las mejoras establecidas y la afección al resto de pérdidas energéticas. Esta revisión permite comprobar si se deben realizar más medidas, o por el contrario se ha finalizado el proceso de gestión de las pérdidas energéticas estructurales y operacionales. Llegados a este punto, en el que la viabilidad económica de las propuestas de mejora es rechazada, el protocolo de actuación finaliza con el análisis de un sistema de indicadores propuesto que permite calificar el nivel energético de la red desde el punto de vista estructural y operacional.

Cada una de las fases del protocolo que se presenta en este trabajo, ha sido previamente publicada de manera independiente en revistas científicas o presentada en congresos. Como se verá en el siguiente capítulo, el diagrama de trabajo presentado en forma de protocolo para reducir la energía consumida por las redes de agua a presión, aúna cada uno de los trabajos realizados previamente, con la intención de establecer una hoja de ruta que permite mejorar la eficiencia energética de los sistemas de distribución de agua.

Capítulo 2

Publicaciones

Esta tesis ha sido desarrollada como un compendio de seis trabajos de investigación. Cuatro de los trabajos han sido publicados en revistas científicas internacionales, con revisión por pares, e indexadas en el Journal Citation Report (JCR). Mientras que dos de ellos han sido presentados mediante ponencia oral en congresos. A continuación, se listan los trabajos incluidos en el presente documento y el apéndice donde se puede encontrar la versión de autor de cada artículo adaptado al formato de la tesis:

Cabrera, E., Gómez, E., Soriano, J., and del Teso, R. 2019. "Eco-layouts in water distribution networks". *Journal of Water Resource Planning Management*, 145(1): 04018088. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001024)
[With permission from ASCE]

- Impact Factor 2018: 3,404. Rank: 13/91 (Q1). Water Resources
- Versión de autor en el Apéndice I

del Teso, R.; Gómez, E.; Cabrera, E.; Estruch-Juan, E. 2017. “Eficiencia energética en redes de agua a presión en fase de diseño”. En *V Jornadas de Ingeniería del Agua*. A Coruña, España, 25-26 octubre 2017.

- Libro de resúmenes. ISBN: 978-84-9749-670-4 pp. 69-70
- Versión de autor en el Apéndice II

Cabrera, E.; del Teso, R.; Gómez, E.; Estruch-Juan, E.; Soriano, J. 2019. “Quick energy assessment of irrigation water transport systems”. *Biosystems engineering* 188, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.013>

- Impact Factor 2018: 2,983. Rank: 7/57 (Q1). Agriculture, multidisciplinary.
- Versión de autor en el Apéndice III

del Teso, R.; Gómez, E.; Estruch-Juan, E.; Cabrera, E. 2019. “Topographic energy management in water distribution systems”. *Water Resources Management*, 33, 4385–4400. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02375-9>

- Impact Factor 2018: 2,987. Rank: 24/132 (Q1). Engineering, civil.
- Versión de autor en el Apéndice IV

Gómez, E.; del Teso, R.; Cabrera, E.; Cabrera Jr, E.; Soriano, J. 2018. “Labeling water transport efficiencies”. *Water*, 10(7), 935. <https://doi.org/10.3390/w10070935>

- Impact Factor 2018: 2,524. Rank: 29/91 (Q2). Water Resources.
- Versión de autor en el Apéndice V

Gómez, E.; del Teso, R.; Cabrera, E.; Estruch-Juan, E. 2018. “Improving energy efficiencies in WDN with EPANET based tools”. In *Proceedings of 1st International WDSA/CCWI 2018 Joint Conference*. Kingston, Ontario, Canada. 23-25 July 2018.

- Published in Congress Proceedings
- Versión de autor en el Apéndice VI

El orden en el que se presentan los anteriores trabajos no se corresponde con el orden de creación y publicación de los mismos, sin embargo, es la disposición coherente para llevar a cabo un protocolo que permita minimizar los requerimientos energéticos en las redes de distribución de agua. En la Figura 2-1 se muestra dicho protocolo en forma de diagrama de flujo, y las fases que engloba cada uno de los trabajos expuestos en los apéndices.

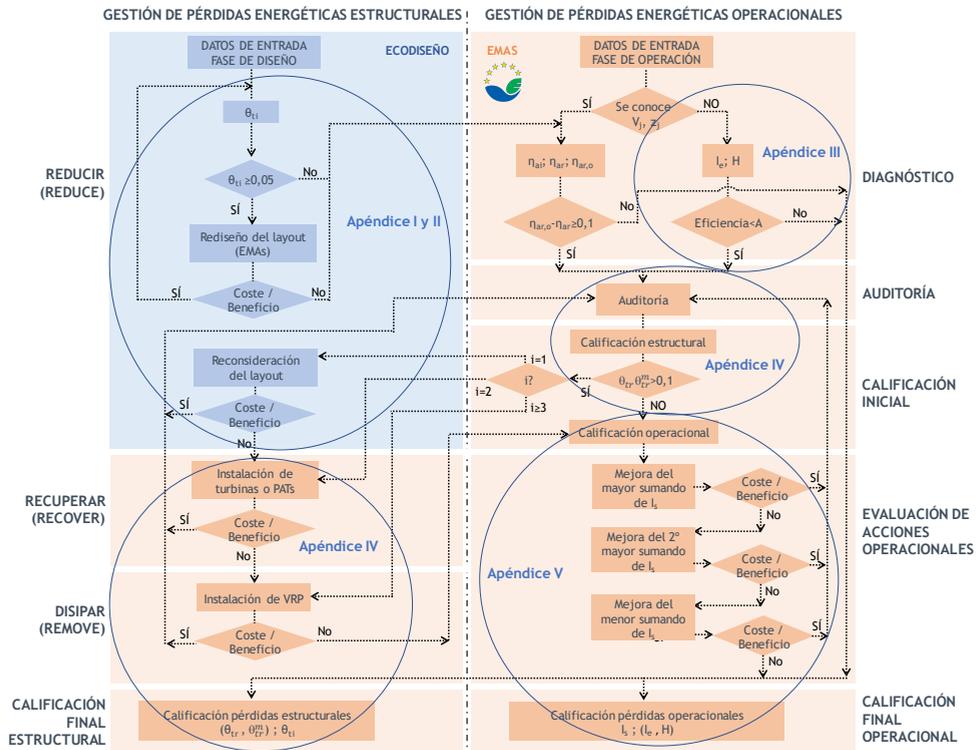


Figura 2-1: Fases que engloba cada uno de los trabajos dentro del diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión

Como se puede observar, cada uno de los artículos presentados en los Apéndices de este trabajo, corresponden a un apartado del protocolo de actuación, cuyo orden se corresponde con el seguimiento del diagrama. El trabajo del Apéndice VI es un resumen de las diferentes herramientas que se utilizan en cada una de las fases del protocolo de actuación, de ahí que no se incluya dentro del diagrama. A modo de síntesis, a continuación, se presenta una descripción breve de cada uno de los artículos, y su función dentro del seguimiento del protocolo mostrado.

La optimización energética de los sistemas de transporte de agua a presión debe comenzar en la fase de diseño. Por ello, el primero de los trabajos presentado en el Apéndice I (Eco-Layouts in Water Distribution Systems), se centra en la importancia de contemplar el requisito energético de las redes a la hora de ser diseñadas, de manera que se reduzca tanto cuanto sea posible la futura energía demandada por

la instalación desde esta primera fase de diseño. Este trabajo enfatiza en la importancia de tener en cuenta aspectos como los desniveles del terreno, el tipo de fuente de suministro o la sectorización de los sistemas basada en áreas de similar demanda energética. Pautas a seguir que también son aplicables en aquellos sistemas en funcionamiento que vayan a ser rediseñados.

El segundo de los trabajos, presentado en el Apéndice II (Eficiencia energética en redes de agua a presión en fase de diseño), desarrolla un ejemplo donde se puede ver los diferentes consumos energéticos de un sistema en función del diseño que se realice del mismo. En el caso analizado en este trabajo, se evidencia que la eficiencia energética al realizar el suministro mediante depósitos de cabecera, es menor que al realizar el abastecimiento con bombeo directo y sectorizando el sistema.

En la fase de operación del sistema, el análisis energético comienza realizando un primer diagnóstico que permita detectar la necesidad de mejorar la eficiencia energética de la red. Existen dos metodologías para diagnosticar el sistema, seleccionar una u otra dependerá de los datos con los que se cuente. Si se conoce la distribución espacial de consumos, es decir, la localización física de cada usuario y su caudal consumido, el diagnóstico se realizará siguiendo el método descrito en Cabrera et al. 2015. En caso contrario, el diagnóstico a realizar será el descrito en el trabajo presentado en el Apéndice III (Quick energy assessment of irrigation water transport systems). Un trabajo que describe una metodología para diagnosticar y calificar energéticamente las redes de distribución con los mínimos datos posibles.

Si el resultado del diagnóstico arroja la necesidad de conocer con mayor detalle el consumo energético del sistema, será necesario realizar la auditoría de la red, para lo cual es esencial contar con su correspondiente modelo matemático. En el Apéndice IV (Topographic energy management in water distribution systems) se presenta una metodología que permite auditar el sistema, y conocer en detalle donde se invierte la energía suministrada desde las fuentes de abastecimiento. Este trabajo está centrado en el análisis y la gestión de la energía topográfica, calificada como una pérdida energética estructural al estar vinculada a los desniveles del sistema. La auditoría presentada en este artículo, se centra en el desglose de las pérdidas energéticas estructurales, lo que permite conocer cuanta energía

topográfica se puede reducir sin afectar al correcto funcionamiento del sistema. En función de su resultado, se realiza una primera calificación estructural del sistema que permitirá decidir si es aconsejable acometer actuaciones de mejora relacionadas con la energía topográfica.

Las pérdidas energéticas estructurales pueden representar un enorme consumo energético, ya que, para abastecer a los nudos más altos del sistema, los nudos situados en cotas más bajas se ven sometidos a más presión de la estrictamente necesaria. Esta sobrepresión se traduce en un exceso de energía, y en un aumento de las fugas. Por tanto, aunque la energía topográfica no es una pérdida energética como tal, se le debe prestar una especial atención, ya que puede causar importantes ineficiencias energéticas en el sistema.

Tras el análisis y mejora de la energía topográfica, los esfuerzos para minimizar la demanda energética de la red deben centrarse en analizar las pérdidas energéticas operacionales. Estas pérdidas son: energía embebida en fugas, pérdidas energéticas en las estaciones de bombeo, fricción en tuberías, energía de exceso y, en definitiva, cualquier otro tipo de pérdida energética vinculada a la gestión del sistema, como podría ser la despresurización en tanques.

Para minimizar las pérdidas energéticas operacionales, existen niveles de referencia alcanzables de las mismas. En un caso real, las pérdidas energéticas no pueden eliminarse por completo, pero pueden minimizarse en base a criterios económicos y de gestión. En este trabajo, se proponen niveles de referencia alcanzables de cada una de las pérdidas energéticas operacionales.

Comparando los niveles de referencia energéticos a alcanzar en cada una de las pérdidas, con las pérdidas de energía reales existentes, se puede evaluar y calificar el estado energético de la red. Para ello, se presenta el trabajo del Apéndice V (Labeling water transport efficiencies), el cual desarrolla un sistema de indicadores que permite evaluar y calificar de manera concreta y detallada el estado energético del sistema desde el punto de vista de las pérdidas energéticas operacionales. El análisis de los indicadores, permitirá priorizar las acciones de medida operacionales a llevar a cabo para mejorar la eficiencia energética del sistema.

Por último, en el Apéndice VI (Improving energy efficiencies in WDN with EPANET based tools) se presentan las diferentes herramientas que se han utilizado para el

desarrollo del resto de trabajos. Una serie de herramientas que permiten llevar a cabo cada una de las fases del protocolo de actuación para reducir los requerimientos energéticos de las redes de agua. Bien partiendo de los datos básicos del sistema, o con información detallada del modelo matemático realizado con EPANET, estas herramientas permiten evaluar el estado energético de un sistema de distribución de agua a presión. El análisis de los resultados ofrecidos por estas herramientas, ayudarán a la toma de decisiones en la priorización de actuaciones encaminadas a mejorar la eficiencia energética de los sistemas.

En definitiva, los trabajos presentados pretenden mejorar la eficiencia energética de las redes de distribución de agua en todas sus fases, comenzando con un diseño que permita minimizar la futura demanda energética, pasando por el análisis y mejora de las pérdidas energéticas estructurales y operacionales de las redes en su fase de funcionamiento, y terminando con una evaluación y calificación del estado del sistema que permita priorizar las actuaciones de mejora a llevar a cabo desde un punto de vista energético. Todo ello con el apoyo de una serie de herramientas informáticas.

Capítulo 3

Resultados y discusión

Cada uno de los apartados y subapartados que componen este capítulo, explican de manera detallada el protocolo de actuación para reducir los requerimientos energéticos de las redes de distribución de agua a presión que se representa en forma de diagrama de flujo en la Figura 3-1.

Este protocolo parte del diagrama mostrado en los artículos del Apéndice I y Apéndice VI, pero ampliado de manera que aúne cada uno de los trabajos presentados en el capítulo anterior, formando un protocolo de actuación que servirá de guía a gestores y operadores de sistemas de distribución de agua a presión, para mejorar la eficiencia energética de éstos.

En este capítulo, se puntualizan los resultados y conclusiones obtenidas en cada trabajo publicado, y se amplía información complementaria y relevante de cada uno de ellos. Siempre siguiendo el protocolo de actuación desde la fase de diseño

del sistema, hasta la calificación energética final del mismo, concretando a qué apartado corresponde cada uno de los trabajos, y la manera de interpretar cada paso del diagrama de flujo.

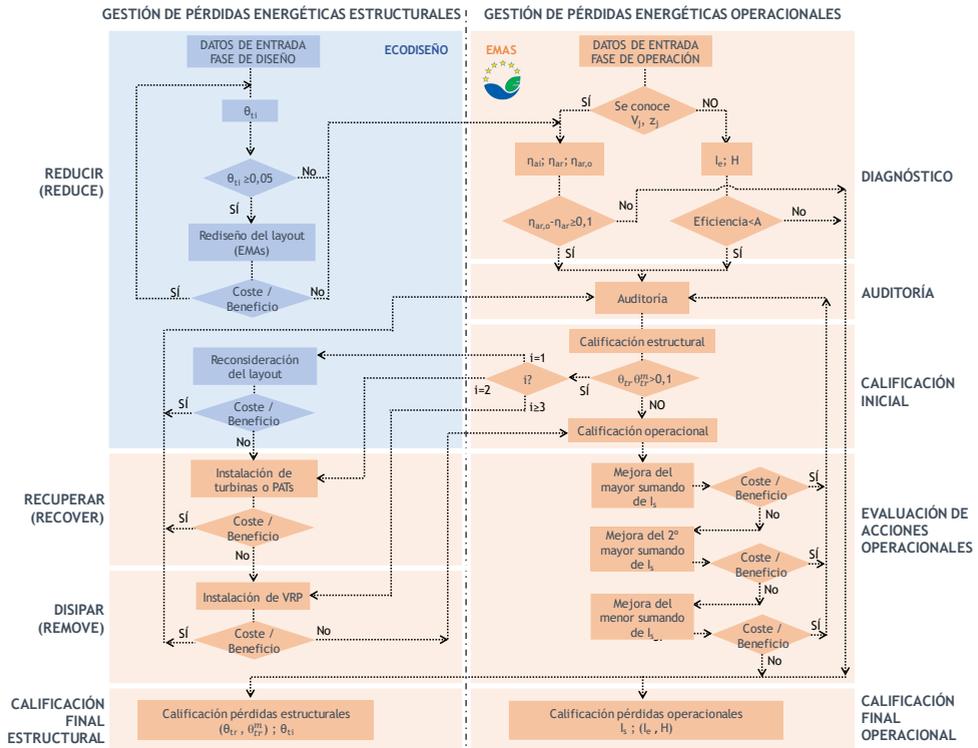


Figura 3-1: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión

El diagrama presentado se divide en dos partes: en la parte izquierda se analizan las pérdidas energéticas estructurales, vinculadas a la topografía de la red y explicadas detalladamente en el artículo presentado en el Apéndice IV. En la parte derecha se analizan las pérdidas operacionales, vinculadas a la fase de funcionamiento y gestión de la red y evaluadas en los trabajos presentados en el Apéndice III y Apéndice V.

A continuación, se explican cada una de las fases del protocolo, comenzando por el ecodiseño, pasando al análisis de las pérdidas estructurales y su auditoría,

evaluando las pérdidas operacionales a partir de los niveles de referencia alcanzables y finalizando con la calificación energética de los sistemas de transporte de agua a presión. La fase de diagnóstico y auditoría se ha presentado en trabajos previos al actual (Cabrera et al., 2010, 2015), por lo que no se profundiza en su desarrollo, aunque se realizan diferentes comentarios a tener en cuenta.

3-1. ECODISEÑO DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA A PRESIÓN

Según el *“Real Decreto 187/2011, de 18 de febrero, relativo al establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía”*, se define el concepto diseño ecológico como sigue: *“integración de los aspectos medioambientales en el diseño del producto con el fin de mejorar su comportamiento medioambiental a lo largo de todo su ciclo vida”* (Gobierno de España, 2011)

Este término de diseño ecológico, o ecodiseño está alcanzando gran protagonismo en la Unión Europea, tanto en edificación, como en productos o bienes y servicios, tal como indican algunas de sus normas y directivas:

- The European Eco-Management and Audit Scheme. Improving your environmental and business performance (2011).
- Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products.
- Commission Regulation (EU) No 547/2012 of 25 June 2012 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for water pumps.

Desde esta perspectiva del ecodiseño, se deben buscar diseños en las redes que permitan minimizar su gasto energético a lo largo de su vida útil. Así, por ejemplo, en las redes de saneamiento, existe una tendencia hacia la descentralización. El objetivo del saneamiento descentralizado es evitar redes extensas que lleguen a depuradoras de gran tamaño, ya que los sistemas con estas características tienen un gran consumo energético y provocan una gran afección si deja de funcionar la depuradora por algún tipo de fallo (Bakhshipour et al., 2018). Por esta razón, las

redes descentralizadas apuestan por tratar y depurar las aguas residuales de zonas más reducidas (grupos de viviendas, sectores de población, propiedades privadas...), es decir, realizan un tratamiento del agua residual en zonas próximas a su generación, de manera que se eviten grandes redes de colectores que transporten el agua residual a largas distancias hasta llegar a las plantas de tratamiento.

Esta idea, cada vez más extendida en las redes de saneamiento, se puede aplicar a la conceptualización de las redes de distribución de agua urbana. De manera que desde el punto de captación hasta los puntos de suministro no existan grandes redes de tuberías, sino que se priorice buscar diferentes puntos de suministro que abastezcan a zonas específicas con las condiciones estipuladas de presión y caudal. Esto evitará excesos de energía, y permitirá una mejor gestión del sistema.

No obstante, en las redes de distribución de agua a presión, tradicionalmente se ha diseñado buscando cumplir los estándares de calidad (demanda y presión), maximizar la fiabilidad y minimizar la inversión, mientras los aspectos energéticos se han abordado siempre a posteriori, una vez definido el trazado y ya construida la red.

Tal como indica la definición anterior, el ecodiseño de un sistema se logrará reduciendo al máximo el impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida. Para ello, es esencial diseñar pensando en reducir al máximo el gasto energético que requerirá la red una vez puesta en funcionamiento, lo que exigiría adaptar, tanto como fuese posible, la presión de la red a la fijada por los estándares.

Para minimizar las necesidades energéticas de las redes de agua, deben tenerse en cuenta tanto las pérdidas energéticas denominadas estructurales, vinculadas a la topografía y desniveles del sistema, como las pérdidas energéticas operacionales, relacionadas con la gestión y operación del sistema.

Minimizar el consumo de energía exige atacar el problema desde el comienzo del diseño, tratando de entregar al agua sólo la energía mínima requerida para cumplir los estándares de calidad, pues todo exceso, aunque muchas veces inevitable, es una ineficiencia que aleja a la instalación del ecodiseño.

Esta será la primera parte del protocolo de minimización de energía requerida por una red de agua a presión, la cual puede verse destacada en el diagrama de flujo de la Figura 3-2.

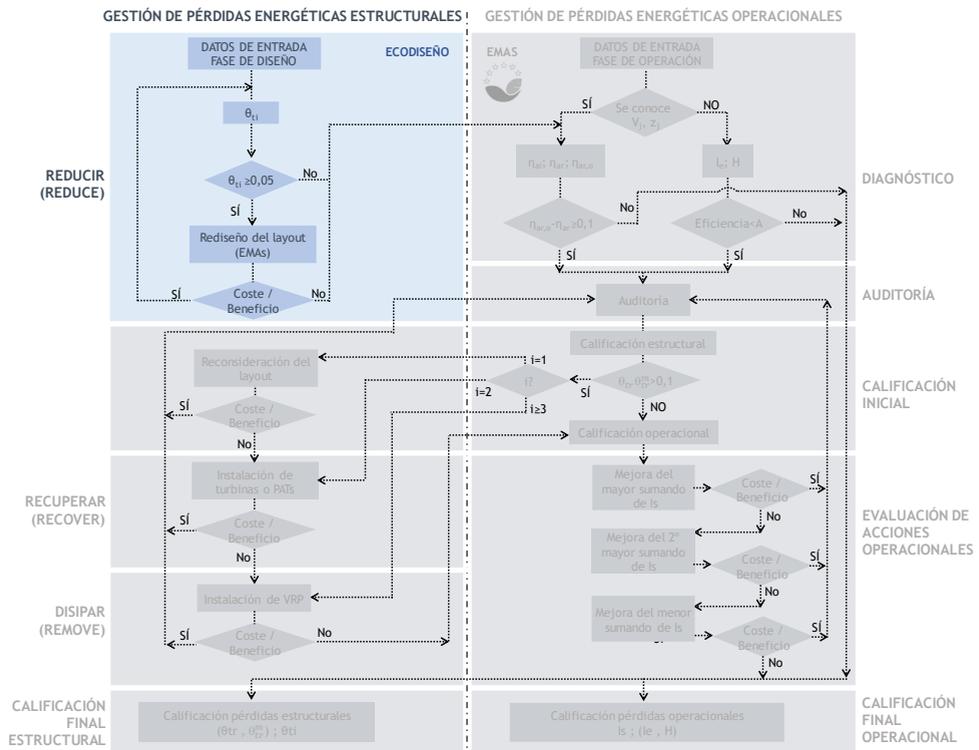


Figura 3-2: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Fase de diseño

En este primer paso de la fase de diseño, destinado a abordar la minimización de energía a suministrar a la red, se analiza el caso ideal sin pérdidas operacionales. De manera que el diseño final del sistema venga propiciado por haber minimizado las pérdidas energéticas vinculadas a la topografía y desnivel del terreno, es decir, las pérdidas estructurales.

Partiendo de los datos de los puntos de consumo y las fuentes de suministro, se evalúa el peso de la topografía en el diseño del sistema con el indicador de energía topográfica ideal θ_{ti} . Este indicador, relaciona la energía suministrada de manera

ideal en la red (E_{si}), con la energía topográfica ideal (E_{ti}), sin tener en cuenta las pérdidas energéticas operacionales. En el Apéndice I se describe cada uno de estos términos y su manera de obtenerlos:

$$\theta_{ti} = \frac{E_{ti}}{E_{si}} \quad (3-1)$$

Si el resultado de θ_{ti} indica que existe más de un 5% de energía topográfica ideal en el sistema, se deben plantear diferentes alternativas de rediseño del trazado, y evaluar si éstas son económicamente viables, con su correspondiente estudio coste/beneficio. Si el ahorro energético previsto no justifica la inversión necesaria, la alternativa planteada se rechazará. En caso contrario, se recalculará de nuevo el peso de la energía topográfica ideal con el nuevo diseño, y se volverá a comprobar si θ_{ti} es superior a 0,05. Se plantearán tantas alternativas como sean necesarias hasta conseguir que θ_{ti} sea inferior al 0,05, o bien hasta que el análisis coste/beneficio de todas las posibles actuaciones no sea favorable. Llegados a este punto se finalizará la fase de diseño del sistema.

Este bloque del diagrama de flujo se corresponde con la primera de las conocidas tres erres (Reduce, Recover y Remove), pues trata de reducir al máximo posible los requerimientos energéticos de la red desde su fase de diseño teniendo en cuenta las pérdidas energéticas estructurales.

En el Apéndice I se describen diferentes consideraciones a tener en cuenta en el diseño de las redes. Tales como la sectorización en áreas de gestión energética (EMAs del inglés Energy Management Areas), o la selección de la fuente energética de abastecimiento. A continuación, se describen y amplían estas consideraciones.

3-1.1. Sectorización basada en EMAs

El concepto de EMAs es similar al de DMAs (District Metered Areas) y al de PMAs (Pressure Management Areas). El objetivo es sectorizar para facilitar la gestión de la red. En el caso del DMA, la sectorización pretende tener controlado el caudal suministrado en cada zona, en el PMA se pretende gestionar la presión en los sectores, mientras que en los EMA es la energía el factor a tener en cuenta para realizar una gestión lo más eficiente posible.

Los estudios realizados para sectorizar un sistema basándose en criterios energéticos (Salguero et al., 2017) son menores que los que se han realizado con el objetivo de mejorar el rendimiento hidráulico, normalmente centrados en reducir las fugas a partir del control de la presión y el caudal en sistemas sectorizados.

En el Apéndice I se analiza el diseño de varias redes de suministro. La primera de ellas es un bombeo a depósito desde el que se abastece por gravedad dos zonas situadas a cotas diferentes. En este ejemplo se plantea la subdivisión del sistema en dos EMAs diferentes, uno por cada zona de consumo, con una fuente de suministro exclusiva para cada zona. Esto permite reducir la energía topográfica del sistema, y por tanto la energía total suministrada. Los requerimientos energéticos de los consumidores son los mismos, pero al reducir las pérdidas estructurales con un nuevo diseño del sistema, se reduce la energía total a suministrar en la instalación. El análisis energético se realiza para la situación ideal, sin pérdidas energéticas operacionales, por lo que únicamente influye la topografía de la red.

En el segundo ejemplo de este trabajo, se plantea el diseño óptimo de una red de riego, cuya configuración inicial sigue los estándares de diseño tradicionales, colocando la fuente de suministro en el centro de la red, abasteciendo de manera radial al sistema con la intención de ahorrar costes de instalación de tuberías. Con este diseño, para que los hidrantes situados a cotas más elevadas cuenten con presiones próximas a la presión requerida, los hidrantes situados en cotas más bajas estarán sometidos a un exceso de presión que no se requiere para su correcto funcionamiento.

Para reducir los requerimientos energéticos del sistema, se plantean dos escenarios, el primero de ellos divide la red en dos EMAs, con dos fuentes de suministro independientes. Una de ellas se encarga de abastecer la zona de cotas más elevadas, y la segunda la zona de menores cotas. El segundo escenario divide la red en 8 EMAs diferentes, cada EMA abastece a un grupo de hidrantes situados a la misma cota, y cuenta con un sistema de bombeo independiente.

Se analizan los costes de cada escenario, evaluando el coste de las tuberías, de las bombas y de la energía de cada caso, concluyendo que el escenario con 8 EMAs es el que menos costes anuales tiene, y el que menor energía demanda, pese a ser el que mayor longitud de tuberías posee. Este escenario tiene el mayor rendimiento

energético, debido a que desaparece la componente topográfica en el análisis realizado.

El último ejemplo analizado, es una red extensamente utilizada en la literatura como es la de Anytown, en la cual se propone realizar una sectorización basada en EMAs con abastecimiento independiente de cada subsector. Con esta propuesta se logra mejorar considerablemente la eficiencia energética de la red, pasando de consumir 9,1 kWh/día, a consumir 6,8 kWh/día, lo que supone un ahorro anual de alrededor de US\$100.000/año si se considera un coste de la energía de US\$0,12/kWh.

3-1.2. Fuentes de suministro

Las fuentes de suministro de un sistema, influyen en gran medida en la energía aportada al mismo, y por lo tanto son una pieza clave a la hora de aportar la energía estrictamente necesaria. Estas fuentes, se pueden dividir en rígidas y variables en función de su capacidad para regular y adecuar la altura de suministro a las necesidades del punto más desfavorable de la red.

En los Apéndices I, II y III se trata de manera detallada la influencia del tipo de fuente de suministro en los sistemas de distribución de agua a presión. El Apéndice I hace una primera clasificación entre las fuentes de energía rígidas (RES de su acrónimo inglés Rigid Energy Sources) y las fuentes de energía variables (VES: Variable Energy Sources), y comenta la relación existente entre el tipo de fuente de suministro y la gestión de la energía topográfica. En el Apéndice II se detalla la diferencia en el resultado energético de un mismo sistema abastecido por RES y por VES. Diferencia que se puede ver de manera gráfica en la figura 1 del Apéndice IV. Pese a estar explicado y detallado en parte de los artículos adjuntos a este trabajo, a continuación, se detalla las principales particularidades y diferencias entre RES y VES.

Fuentes de energía rígidas (RES)

Se consideran fuentes de suministro rígidas a aquellas que aportan caudal desde una determinada altura sin capacidad de regulación, tal y como ocurre con los depósitos o embalses, donde sólo las variaciones de nivel modifican la altura de suministro. Este tipo de fuentes no están pensadas para ajustar su altura de

abastecimiento en función de las necesidades de los usuarios, sino que pretenden almacenar un determinado volumen de agua a una altura suficiente para garantizar en todo momento el suministro.

Tradicionalmente se han utilizado este tipo de fuentes para el abastecimiento de poblaciones o zonas de riego, bombeando el agua a cotas elevadas, donde se sitúa el depósito, para posteriormente realizar el suministro por gravedad. Esto conlleva habitualmente un exceso de presión en los nudos de consumo, que se traduce en un gasto energético innecesario y en un aumento de las fugas de la red. Aunque la altura de suministro de la RES se diseñe para que en el momento de máxima demanda la presión en el nudo crítico sea la presión de servicio, en los momentos donde la demanda no sea máxima, la pendiente hidráulica del sistema disminuirá y existirá una sobrepresión en el nudo crítico, y por tanto en el resto de nudos. Esta sobrepresión se traducirá en un excedente de energía que se considerará energía topográfica, pues depende de la cota del nivel de agua en la RES. Para evitar estos excedentes, no se puede actuar sobre la fuente de suministro directamente, sino que son necesarias otras alternativas, como incorporar elementos disipadores de presión, tales como válvulas, o, si el sistema lo permite, turbinas que permitan recuperar parte del excedente de energía.

Fuentes de energía variables (VES)

Si la altura de suministro puede gestionarse y cambiar en función de las necesidades de los consumidores en cada instante, se considerará una fuente de suministro variable, como ocurre con las redes de inyección directa a través de bombas, donde la altura de bombeo puede modificarse y adaptarse a la presión mínima requerida en el nudo crítico.

La principal diferencia a la hora de analizar energéticamente un sistema abastecido con fuentes de energía variables, es que aparece el término energético de exceso (E_{er}). En un sistema abastecido por VES, toda presión por encima de la presión de servicio del nudo más desfavorable se considera presión de exceso, y por tanto una energía de exceso suministrada. Esta energía de exceso podría eliminarse realizando una adecuada gestión de las bombas que adapte el punto de funcionamiento a los requerimientos exactos de altura y caudal demandado por la red. La misma red, pero abastecida mediante RES, considerará la presión suministrada en el nudo más desfavorable por encima de la mínima requerida,

como una presión que no puede gestionarse desde la fuente de suministro. De ahí que la energía suministrada que sea superior a la mínima requerida por el nudo crítico de un sistema abastecido por RES se considere energía topográfica y no energía de exceso, pues está vinculada a la cota del depósito de suministro.

Existe un debate abierto entre realizar el abastecimiento de un sistema con bombeos directos o a través de impulsiones de agua a depósitos de cabecera y posterior suministro por gravedad. Con el bombeo directo se puede optimizar la energía entregada a los usuarios en función de las necesidades de los mismos, pero perdiendo la garantía de suministro en el caso de existir un fallo eléctrico. En contraposición, la idea de llenar los depósitos con bombas en los horarios donde las tarifas eléctricas sean más económicas, permite abaratar los costes energéticos y contar con un volumen de reserva de agua en caso de fallo eléctrico. No obstante, se debe tener en cuenta que las tarifas eléctricas pueden cambiar a lo largo de la vida útil de la instalación, y lo que en fase de diseño resultó ser el escenario más económico, pase a no serlo.

Además de las variables energéticas, influyen otro tipo de variables a la hora de seleccionar el tipo de abastecimiento, como el almacenamiento de volúmenes de agua necesarios para afrontar emergencias, o la degradación de la calidad del agua. Al respecto, cabe destacar, que el almacenamiento del agua en depósitos produce un aumento de su tiempo de permanencia, lo que conlleva un incremento de la degradación del cloro y por tanto un deterioro de la calidad del agua. Por esta razón, hay que minimizar el tiempo de residencia en el interior de los depósitos, factores determinantes para ello son la geometría y el volumen del mismo.

Los criterios de dimensionado de los depósitos han cambiado a lo largo del tiempo. Inicialmente se fijaba un volumen de seguridad (suministro de emergencia más protección de incendios) con independencia de su integración en el funcionamiento de la red. Actualmente, la necesidad de compatibilizar la fiabilidad de suministro con su impacto en la calidad del agua, exige ajustar su dimensionado, lo que requiere simular su comportamiento conjuntamente con la red.

En definitiva, ambas maneras de realizar el suministro tienen ventajas e inconvenientes, debiendo estudiarse en profundidad cada una de ellas a la hora de tomar una decisión. Sin embargo, no hay discusión posible sobre el ahorro energético que produce cada kWh que no es requerido por el sistema. De manera

que aquella instalación que minimice su demanda energética en kWh, será eficiente energéticamente sin depender de los posibles cambios tarifarios.

Se ha realizado un estudio cuya finalidad es comparar en un sistema concreto las dos opciones de suministro, bien mediante un depósito de regulación en cabecera (RES) o bien en directo (VES). El análisis realizado tiene en cuenta la componente energética (kWh/año), económica (€/año) y ambiental (kg CO₂/año). Para ello se ha realizado el análisis de ciclo de vida (ACV o LCA de sus siglas en inglés Life Cycle Assessment) de los dos esquemas de funcionamiento.

Las conclusiones de este estudio indican que, para la red analizada, tanto la potencia máxima demandada, como la energía anual consumida es menor en el caso de realizar el abastecimiento mediante VES. Del mismo modo, el volumen de agua bombeado anual es menor, con un ahorro en la producción de agua considerable. El balance económico anual también es favorable para el abastecimiento con VES, al igual que el análisis ambiental.

Las conclusiones obtenidas en el caso analizado no son extrapolables sin condición a todos los sistemas de abastecimiento, pues cada uno tiene sus peculiaridades y características específicas. Si bien es cierto, los resultados obtenidos, sí justifican que se realicen estudios detallados sobre la viabilidad del suministro en directo, pues puede resultar, como en este sistema, la mejor alternativa desde todos los puntos de vista.

3-1.3. Diseño de sistemas simples

Además de considerar los aspectos energéticos vistos anteriormente en la fase de diseño de redes de distribución de agua urbanas y de riego, también se debe considerar en sistemas simples. Se consideran sistemas simples aquellas redes de agua a presión que transportan agua de un punto a otro, sin ningún requisito de presión. En tal caso, el desnivel y la longitud existente entre estos dos puntos será el condicionante energético a tener en cuenta, por tanto, la pendiente hidráulica con la que se diseña el sistema juega un papel fundamental en la energía consumida por la red.

En el artículo desarrollado en el Apéndice III, se clasifican los sistemas simples en cinco configuraciones diferentes. Dos sistemas por bombeo: el primero de ellos con

la cota del punto inicial de aspiración (z_i) inferior a la cota del nudo final de impulsión (z_f); el segundo, un sistema por gravedad con la cota del punto inicial superior a la cota del nudo final, pero con necesidad de un bombeo adicional que permita vencer las pérdidas por fricción. Los otros tres sistemas son sistemas por gravedad, dos de ellos con exceso de energía (en el caso 4 disipada con PRVs y en el caso 5 recuperada con turbinas o bombas trabajando como turbinas, ampliamente conocidas como PATs, por sus siglas en inglés: Pumps As Turbines). En la siguiente imagen, adaptada de la figura 2 del artículo, se puede ver esta clasificación:

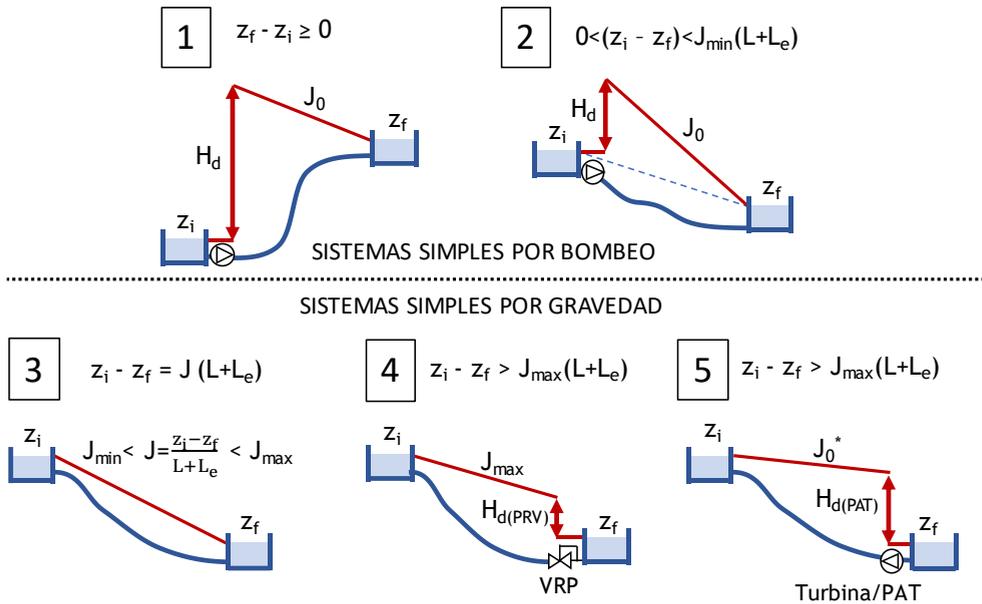


Figura 3-3: Configuración energética de sistemas simples de transporte de agua a presión en su fase de diseño

El diseño óptimo de estos sistemas, desde el punto de vista energético, vendrá definido por la pendiente hidráulica de diseño definida en cada caso. A partir de esta pendiente hidráulica, y conocido el caudal a trasegar en el sistema, se determinará el diámetro a instalar en la tubería.

En el caso de los sistemas simple por bombeo (caso 1 y 2), la pendiente hidráulica de diseño se determinará desde una óptica económica. Para ello es necesario modelar analíticamente los costes anuales (energéticos y de inversión) en función

de la pendiente hidráulica J . Esto permite obtener la pendiente hidráulica óptima del sistema (J_o) a partir de la derivada de costes totales anuales de la red relacionados con las pérdidas por fricción. El cálculo detallado de la pendiente hidráulica óptima J_o aparece en el artículo (Cabrera et al., 2018).

Tal como se observa en la Figura 3-3, en función de la configuración energética del sistema, el dimensionado se realizará a partir de una de las siguientes pendientes hidráulicas:

- J_{min} es la pendiente hidráulica mínima. Está relacionada con la velocidad mínima de circulación necesaria para evitar la sedimentación y garantizar los parámetros de calidad del agua.
- J_o corresponde a la pendiente óptima económica de una tubería que requiere energía de bombeo.
- J_o^* corresponde a la pendiente óptima económica de una tubería por gravedad en la que se puede recuperar energía. Ésta pendiente hidráulica es similar a J_o , pero ligada al precio de venta de la energía.
- J_{max} es la pendiente hidráulica máxima. Está relacionada con la velocidad máxima de circulación del agua que garantice la seguridad de la instalación y prevenga la erosión de las tuberías.

La pendiente hidráulica J para el diseño del caso 3 será la que se muestra en la Figura 3-3. Este valor estará comprendido entre J_{min} y J_{max} . En el caso 4 interesa dimensionar con la pendiente hidráulica máxima posible (J_{max}), de esta manera, además de garantizar una velocidad máxima, el diámetro de los tubos será el menor posible, lo que conlleva un ahorro de costes, y una disipación energética por fricción mayor.

Por último, en el caso de que sea rentable instalar una turbina o PAT para recuperar parte del exceso energético (caso 5), el sistema debe dimensionarse mediante la pendiente hidráulica J_o^* , cuyo cálculo aparece desarrollado en el Apéndice III.

3-1.4. Estimación del gasto energético en fase de diseño

Una vez realizado el diseño del sistema de distribución de agua a presión, y antes de su puesta en funcionamiento, se puede estimar el gasto energético que tendrá

en fase de operación. Para ello, se deberán estimar unas condiciones de trabajo, que permitan prever las pérdidas energéticas operacionales de la instalación.

La intensidad energética (I_e) es un indicador habitualmente utilizado para caracterizar las exigencias energéticas en el ciclo integral del agua, puesto que relaciona los dos recursos, agua y energía (kWh/m³). En sistemas en funcionamiento, es común relacionar los datos energéticos de la facturación eléctrica de las bombas (kWh) con el volumen registrado por los contadores (m³), y a partir de estos datos obtener el indicador I_e y caracterizar la exigencia energética del sistema.

Con la estimación del indicador de intensidad energética (I_{ee}), tal como aparece en la ecuación (3-2), se puede predecir las exigencias energéticas que tendrá el sistema antes de su puesta en funcionamiento.

$$I_{ee} = \frac{0.002725}{\eta_{pe}\eta_{le}} \left[(z_c - z_s) + (z_s - z_l)\eta_{pe} + h_{fe} + \frac{p_o}{\gamma} \right] kWh/m^3 \quad (3-2)$$

Para ello, siguiendo un proceso *top-down*, se estimarán las condiciones de trabajo que existirán en la instalación: rendimiento estimado en la estación de bombeo (η_{pe}), pérdidas estimadas por fricción (h_{fe}) y rendimiento hidráulico estimado de la red (η_{le}). En la ecuación (3-2), el factor 0,002725 es un factor de cambio de unidades (metros a kWh/m³), z_c es la cota del nudo energéticamente más exigente, o crítico (N_c). La cota z_s es la de la fuente de suministro, y la cota z_l es la cota del nudo de consumo o suministro más bajo del sistema, el cual se tomará como nivel de referencia. Esta cota de referencia puede ser variable en el tiempo en el caso de que el nudo más bajo se corresponda con un elemento que pueda cambiar de nivel, como un depósito que se llena y se vacía. En tal caso se deberá escoger como cota de referencia el nivel más bajo dentro del tiempo analizado.

El resto de variables son la presión de servicio (p_o/γ) y el peso específico del agua ($\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$). Conviene aclarar que, en esta ecuación, el rendimiento del bombeo, η_{pe} , acompaña a la diferencia de cotas ($z_s - z_l$) debido a que esta diferencia corresponde a la altura aportada de manera natural, la cual no está afectada por la eficiencia del bombeo, como los demás sumandos.

El resultado de la ecuación (3-2) viene condicionado por la posición del nudo crítico (N_c), por lo que es conveniente detectar cuál es este nudo, que será aquel que cumpla la siguiente relación:

$$\{z_i + (H_s - H_i)\}_{max} = \{z_i + h_{fe(s \rightarrow i)}\}_{max} = z_c + (H_s - H_c) \quad (3-3)$$

Siendo z_i la cota de un nudo genérico i , H_i su altura piezométrica, H_s la altura de suministro en la fuente y H_c la altura piezométrica del nudo crítico. $h_{fe(s \rightarrow i)}$ es la pérdida por fricción estimada entre la fuente de suministro y el nudo genérico i .

La ecuación (3-2) es válida siempre que $z_c \geq z_s \geq z_l$, desigualdades que se cumplen en los sistemas más habituales a los que se les vienen aplicando indicadores energéticos, como el que muestra el esquema de la Figura 3-4.

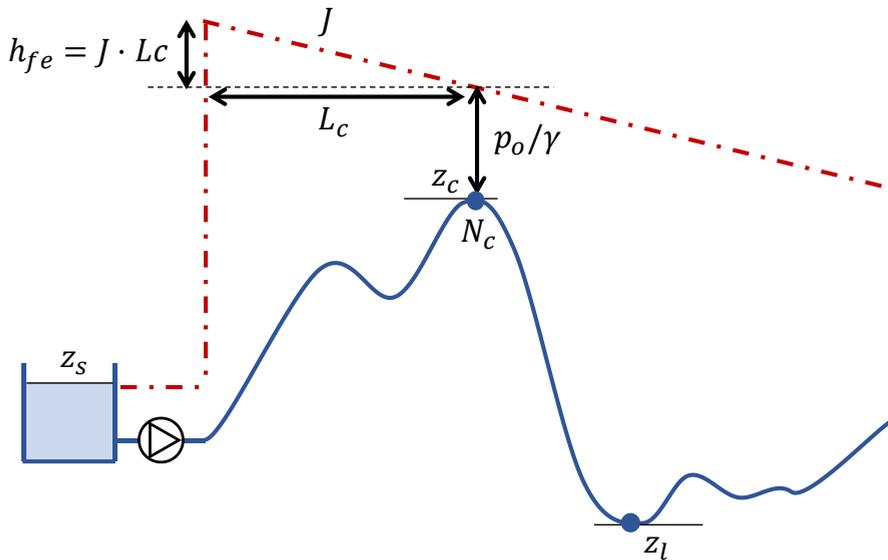


Figura 3-4: Variables que intervienen en la estimación del gasto energético de una red abastecida por bombeo en fase de diseño

En los sistemas gravitatorios ($z_s \geq z_c$) como generalmente no incluyen bombes, se prescinde de realizar el análisis energético. No obstante, en estos casos también se puede estimar la energía suministrada a partir del indicador I_{ee} .

En aquellos casos que el abastecimiento sea puramente gravitatorio, es decir, la diferencia de cotas entre la fuente y el nudo crítico es igual o superior a la pérdida de carga más la presión de servicio, la intensidad energética estimada resulta:

$$I_{ee} = \frac{0.002725}{\eta_{le}} (z_s - z_l) \text{ kWh/m}^3 \quad (3-4)$$

En el caso de que la diferencia de cotas entre la fuente y el nudo crítico sea inferior a la pérdida de carga más la presión de servicio, se necesitará un bombeo adicional para satisfacer las necesidades energéticas del sistema. En tal caso la intensidad energética estimada será:

$$I_{ee} = \frac{0.002725}{\eta_{pe}\eta_{le}} \left[h_{fe} + \frac{p_o}{\gamma} - (z_s - z_c) + (z_s - z_l)\eta_{pe} \right] \text{ kWh/m}^3 \quad (3-5)$$

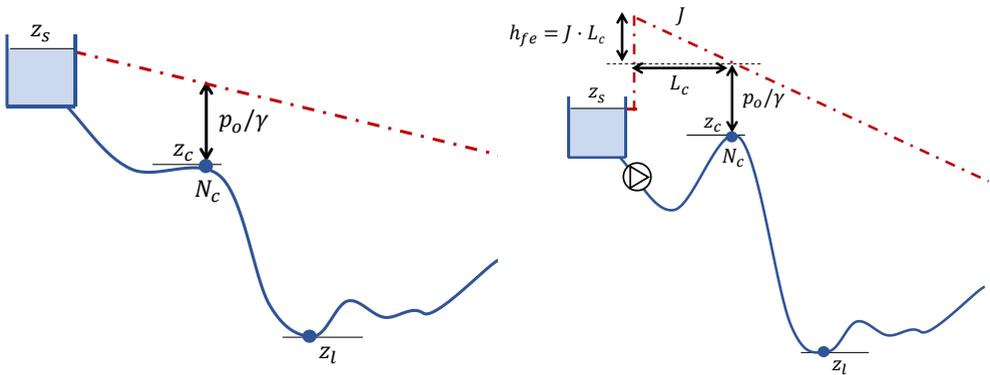


Figura 3-5: Variables que intervienen en la estimación del gasto energético de una red gravitatoria (izquierda) y de una red gravitatoria con bombeo (derecha) en fase de diseño

La estimación de energía total suministrada al sistema (E_{se}) se obtendrá a partir del volumen que se estima que demandarán los usuarios (V_e) y el indicador de intensidad energética estimada (I_{ee}), tal como aparece en la ecuación (3-6):

$$E_{se} = I_{ee} V_e \quad (3-6)$$

En función del estado de carga de la red, el nudo crítico puede ser diferente, al igual que tampoco son constantes en el tiempo las pérdidas de carga, el rendimiento de la bomba o el rendimiento hidráulico del sistema. Estos cambios en el sistema, modifican temporalmente los valores de I_{ee} . Para contar con una aproximación de la energía suministrada a la red, no se considerarán estas posibles variaciones a lo largo del tiempo, sino que se utilizarán valores medios del sistema representativos de lo que se estima ocurrirá en la red.

En el Apéndice III se profundiza en la explicación y desarrollo del indicador I_e , puntualizando la importancia de definir de manera adecuada la pendiente hidráulica J para estimar las pérdidas por fricción del sistema.

Actualmente se está trabajando en el desarrollo de un modelo determinístico predictor de la demanda energética de un sistema, similar al que se ha explicado en este punto, pero extendido a sistemas multifuente y complementado con dos indicadores de contexto que permiten conocer la procedencia de la energía (natural o de eje), y el peso relativo de la energía topográfica.

3-2. PÉRDIDAS ENERGÉTICAS OPERACIONALES

Tal como se ha comentado previamente, las pérdidas energéticas operacionales son aquellas que están vinculadas a la fase de operación del sistema, se han desarrollado y explicado en trabajos previos (Cabrera et al., 2010, 2015) y se han evaluado, particularizado y detallado en cada uno de los trabajos presentados en los apéndices de esta tesis. A modo de resumen, se detalla a continuación conceptualmente las principales pérdidas energéticas operacionales y las novedades que se presentan en este trabajo respecto a los trabajos previos ya realizados:

- Pérdidas energéticas en las estaciones de bombeo (E_{pr}): Diferencia entre la energía de entrada a la estación de bombeo y la energía final entregada por las bombas al fluido. Depende fundamentalmente del rendimiento de cada uno de los elementos que forman parte de la estación de bombeo, de entre los que destaca el rendimiento de la propia bomba, puesto que tanto el rendimiento del motor como el del variador de frecuencia, en caso de existir, son relativamente elevados y no introducen apenas pérdidas en la

estación. Esto se puntualiza y concreta en el apartado “energía perdida en bombas” del punto 3-2.2.

- Energía disipada por fricción (E_{fr}): El rozamiento del agua con las paredes de las tuberías provoca una pérdida energética en el sistema, esta pérdida energética es la denominada fricción en tuberías. Además, cualquier pérdida energética puntual causada por un elemento que provoca una disipación energética, como pueden ser las válvulas, también se incluiría en este término. En el Apéndice IV aparece una formulación nodal que permite realizar el cálculo de la energía disipada por fricción en el sistema a partir de la presión existente en cada nudo, en lugar de realizar el cálculo partiendo de la pérdida de carga existente en cada tubería, tal como aparece en (Cabrera et al., 2010). Ambas formulaciones dan resultados idénticos.
- Energía embebida en fugas (E_{lr}): El agua fugada en un sistema, además de conllevar una ineficiencia medioambiental por la pérdida del recurso que se produce, conlleva una pérdida energética, puesto que la energía que se ha invertido en introducir en el sistema el caudal fugado se pierde. Esta energía dependerá de la presión existente en el lugar de la fuga. En los nudos de consumo, parte de la presión suministrada es la mínima requerida para cumplir los estándares de calidad, y la presión por encima de este valor puede deberse o bien a la topografía o al exceso de presión suministrado por las bombas. Por tanto, tal como aparece en el Apéndice IV, la energía embebida en fugas total es suma de la energía embebida en fugas causada por la sobrepresión derivada de la topografía y del exceso de presión suministrado por las bombas (E_{lr}^{te}), y de la energía embebida en fugas causada por la altura de suministro estrictamente necesaria para cumplir con la presión de servicio (E_{lr}^o). Este desglose de la energía embebida en fugas, no se había realizado previamente y es fundamental para que el balance energético sea correcto desde el enfoque nodal planteado.
- Energía de exceso (E_{er}): Un cambio destacable se ha realizado en la caracterización de esta pérdida energética respecto a la publicada por Cabrera et al., 2015. Tal como aparece en los artículos de los apéndices, y como se ha explicado en el punto anterior, el exceso de energía es función del tipo de fuente de suministro del sistema. En los casos en que la fuente

de suministro sea variable (VES), toda presión por encima de la presión de servicio del nudo más desfavorable se considera presión de exceso, y por tanto una pérdida energética operacional vinculada a una incorrecta gestión de la fuente de suministro desde el punto de vista energético, pues este excedente energético puede ser eliminado cambiando la altura de suministro de las bombas. La misma situación, pero realizándose el abastecimiento desde una fuente de suministro rígida (RES) se considerará energía topográfica, siendo necesario un cambio en la estructura del sistema para su eliminación. El nivel de referencia a alcanzar en la energía de exceso siempre debe ser 0 kWh.

- Otros tipos de pérdidas energéticas operacionales (E_{or}): Cualquier pérdida energética que no esté contabilizada en los términos anteriores, se definiría en este apartado, debiendo contabilizarse en el balance energético final. Algunos ejemplos pueden ser la despresurización de la red en tanques de rotura de carga, o aljibes domiciliarios.

En el artículo presentado en el Apéndice IV se realiza un repaso de cada una de las pérdidas energéticas operacionales, así como del balance energético de un sistema de distribución de agua a presión, donde la energía suministrada total (E_{sr}) es igual a la energía mínima requerida por los usuarios (E_{uo}) más las pérdidas energéticas operacionales ($E_{pr} + E_{fr} + E_{lr}^o + E_{er} + E_{or}$) y estructurales (E_{tr}) del sistema:

$$E_{sr} = E_{uo} + E_{pr} + E_{fr} + E_{lr}^o + E_{er} + E_{or} + E_{tr} \quad (3-7)$$

En el balance energético presentado en el Apéndice IV no se tiene en cuenta la componente E_{or} , ya que se da puntualmente y el objetivo debe ser limitar su existencia. No obstante, en caso de existir, se deberá tener en cuenta, ya que en ocasiones puede llegar a ser representativa en el balance energético final. Tampoco se contabiliza la energía almacenada en los depósitos de compensación existentes en una red. Estos depósitos se llenan y se vacían en función del momento del día, pero en un análisis a largo plazo, la energía almacenada se puede considerar nula.

El balance energético anterior no incluye como sumando el total de energía embebida en fugas (E_{lr}), sino únicamente la energía embebida en fugas debida a la altura de suministro estrictamente necesaria para cumplir con la presión de servicio (E_{lr}^o). Si se considerara el total de energía embebida en fugas, se estaría

duplicando el término de energía embebida en fugas derivada de la topografía y el exceso de presión (E_{lr}^{te}), puesto que este término ya está incluido en la energía topográfica y en la energía de exceso, al calcularse estas energías con el volumen total de agua asociado al nudo, suma del volumen fugado y del consumido. Este matiz es importante tenerlo en cuenta para que la igualdad entre la energía suministrada y la energía consumida se cumpla, y el balance energético sea correcto.

3-2.1. Diagnóstico y auditoría energética

Para evaluar el consumo energético del sistema en su fase de funcionamiento, se comenzará realizando un diagnóstico que permita estimar la relevancia de las pérdidas energéticas. Si estas pérdidas se consideran elevadas, se realizará un estudio en profundidad de la energía consumida en la red mediante la auditoría energética, paso previo al estudio de medidas de mejora.

El diagnóstico energético será más preciso cuanto mayor información se disponga del sistema. De ahí que en el diagrama de flujo de la Figura 3-6 se distinguen dos métodos para realizar este diagnóstico en función de los datos de entrada disponibles en la fase operación. Si no se conoce la distribución espacial de caudales, es decir, no se cuenta con información de la cota (z_j) y consumo en cada nudo (v_j), se propone un primer método para el diagnóstico en el que se necesitan pocos datos de partida. Así, de una manera rápida y con la mínima información, se puede evaluar si el consumo energético de la instalación es razonable, relacionando la intensidad energética de la red (I_e) con la altura de suministro (H).

El segundo diagnóstico propuesto está basado en Cabrera et al. 2015, y en este caso se requieren los datos de la distribución espacial de consumos, entre otros, para realizarlo. Esto implica conocer la cota de cada nudo (z_j) y su consumo (v_j).

En función de los resultados ofrecidos por el diagnóstico energético del sistema, ya se realice a través de un método u otro, se valora si efectuar la correspondiente auditoría energética para conocer el desglose de la energía consumida en la red. En caso de que los resultados del diagnóstico indiquen que no es necesario realizar la auditoría, puesto que las pérdidas energéticas no son relevantes, se propondrá una

calificación energética final de la red desde el punto de vista operacional y estructural.

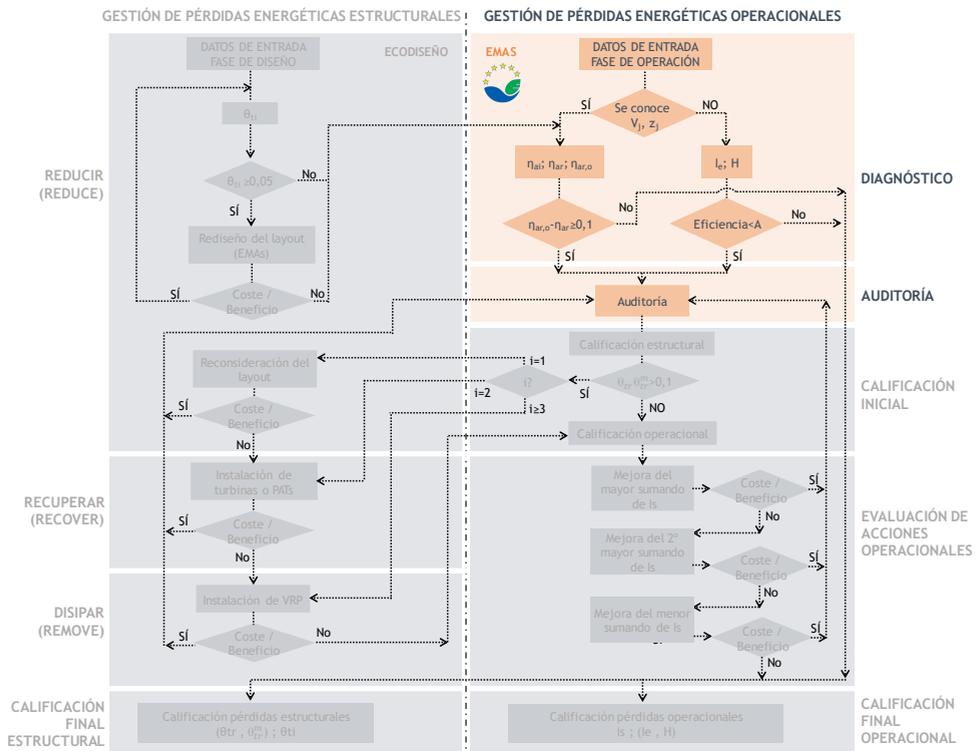


Figura 3-6: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Fase de evaluación energética (diagnóstico y auditoría)

En los siguientes subapartados, se explica de manera resumida los dos métodos de diagnóstico energético incluidos en el diagrama de flujo, así como la auditoría energética a realizar en caso de que los resultados del diagnóstico arrojen la necesidad de estudiar mejoras en las pérdidas energéticas del sistema.

Diagnóstico rápido a partir del indicador Intensidad energética (I_e)

Existen diferentes indicadores que tratan de evaluar y caracterizar la energía consumida en el transporte de agua a presión. Uno de los más utilizados es la intensidad energética, que relaciona la energía consumida en el sistema (kWh) con el volumen de agua que circula por la red (m^3), tal como se ha introducido en el

punto 3-1.4. Para obtener este indicador, habitualmente se toma como dato energético la información que aparece en la factura eléctrica, estando ésta relacionada con el consumo de las bombas. En tal caso, no se está considerando la energía natural del sistema, que, pese a que no supone un coste económico ni provoca emisiones de CO₂, se debe tener en cuenta, puesto que afecta a la eficiencia energética de la red.

En cuanto al volumen de agua que se utiliza en el cálculo de la intensidad energética, es común que se utilice el dato del volumen registrado por los contadores, pero en tal caso, no se estará incluyendo el volumen de agua fugado, ni el volumen de pérdidas aparentes.

Para caracterizar energéticamente el transporte de agua a presión, en el Apéndice III se propone un método que permite realizar de una manera rápida, y con pocos datos, el diagnóstico energético de una red a partir del indicador de intensidad energética, sin necesidad de conocer la distribución espacial de caudales. El artículo mostrado en dicho Apéndice, presenta dos ejemplos de sistemas de riego, pero la metodología desarrollada es perfectamente aplicable en redes urbanas.

La Figura 3-7, adaptada de la figura 1 del Apéndice III, muestra un gráfico que relaciona la altura de suministro, denominada altura equivalente H, con la intensidad energética de la red. Se indican cuatro zonas que permiten calificar energéticamente el sistema de la A a la D, siendo A una calificación excelente y D una calificación inaceptable.

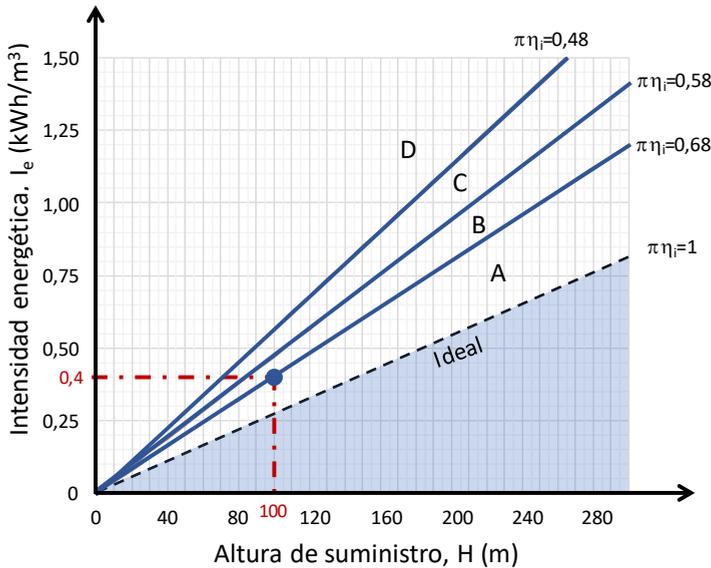


Figura 3-7: Evaluación de la eficiencia energética del transporte de agua a presión a partir de la altura de suministro H , y la intensidad energética I_e .

La obtención de la intensidad energética, requerida para realizar este diagnóstico, puede realizarse de manera similar a la ecuación (3-2) desarrollada en el punto 3-1.4, pero adaptando los valores de rendimiento hidráulico (η_l), rendimiento del bombeo (η_p) y pérdidas por fricción (h_f), a valores medios del sistema en su fase de operación. De esta manera la ecuación será la siguiente

$$I_e = \frac{0,002725}{\eta_p \eta_l} \left[(z_c - z_s) + (z_s - z_l) \eta_p + h_f + \left(\frac{p_o}{\gamma} - \frac{p_i}{\gamma} \right) \right] kWh/m^3 \quad (3-8)$$

Esta ecuación incluye la posibilidad de que exista una presión en la aspiración de la fuente de suministro (p_i/γ), aunque habitualmente esta presión es igual a la atmosférica. En la ecuación que se presenta en el artículo del Apéndice III, la cota del nudo crítico se denomina z_f mientras que en la ecuación (3-8) se ha mantenido la denominación z_c del punto 3-1.4. Del mismo modo, y con la intención de utilizar la misma nomenclatura en todos los casos, la cota de la fuente de suministro, que se denomina z_i en el Apéndice III, mantiene la denominación z_s del punto 3-1.4 en la ecuación (3-8). En el glosario del Capítulo 5 se recogen todas las nomenclaturas

y notaciones utilizadas en este trabajo, mostrando la equivalencia entre ellas y proponiendo una notación común a utilizar.

El estado de carga de la red influirá en el valor de la intensidad energética, ya que los valores de pérdida de carga, rendimiento hidráulico y rendimiento de las bombas no son contantes en el tiempo. Conviene utilizar valores medios en el tiempo de estudio de cada una de estas variables, tanto para el cálculo de la intensidad energética, como para el cálculo de la altura de suministro que se verá más adelante.

Cuanto más específica y contrastada sea la información disponible, menor será la incertidumbre de la intensidad energética, y mayor precisión tendrá el diagnóstico. Si se cuenta con información específica del rendimiento de las bombas, y de las pérdidas de agua de la red, los valores medios de estas variables serán conocidos para el lapso de tiempo analizado. En caso contrario, será necesaria su estimación. Del mismo modo, para conocer las pérdidas por fricción, será necesario conocer la presión en el nudo crítico y la longitud desde la fuente de suministro hasta el mismo, para poder obtener la pendiente hidráulica J y a partir de ésta las pérdidas por fricción. En caso de no contar con este dato, se estimará una pendiente hidráulica media del sistema que permita estimar h_f .

Si se conoce la factura eléctrica de las bombas, y el volumen total de agua inyectado desde la fuente de suministro (V), se puede conocer la intensidad energética real del bombeo, dividiendo la energía consumida por las bombas (E_p) entre el volumen de agua inyectado (V). En tal caso, faltaría añadir la componente de energía natural (E_n) para poder evaluar la intensidad energética completa de la red. Si solamente se conoce la factura eléctrica de las bombas, y se desconoce V , su valor se puede estimar a partir del volumen registrado por los contadores (V_r) y del rendimiento hidráulico estimado del sistema (η_{le}):

$$I_e = \frac{E_p + E_n}{V} = \frac{E_p + \gamma V(z_s - z_l)}{V} \approx \frac{E_p + E_n}{V_r} \eta_{le} \text{ kWh/m}^3 \quad (3-9)$$

La altura de suministro, o altura equivalente H , se corresponde con los sumandos incluidos en el corchete de la ecuación (3-8):

$$H = \left[(z_c - z_s) + (z_s - z_l)\eta_p + h_f + \left(\frac{p_o}{\gamma} - \frac{p_i}{\gamma} \right) \right] (m) \quad (3-10)$$

Si directamente se conoce la altura de bombeo H_p , la expresión (3-10) anterior se sintetiza, siendo la altura de suministro H , suma de la altura de bombeo y de la altura aportada de manera natural ($z_s - z_l$):

$$H = H_p + (z_s - z_l) (m) \quad (3-11)$$

De esta manera, la intensidad energética se relaciona con la altura de suministro mediante el factor de cambio de unidades 0,002725 (paso de metros a kWh/m³), y el rendimiento hidráulico y de bombeo:

$$I_e(kWh/m^3) = \frac{0,002725}{\eta_p \eta_l} H(m) \quad (3-12)$$

Los límites de separación de las cinco zonas que permiten evaluar y calificar la eficiencia del sistema en la Figura 3-7, se corresponden con la relación entre la altura de suministro y la intensidad energética para diferentes combinaciones de rendimiento hidráulico y de bombeo. El límite ideal de este gráfico se corresponde con el análisis del sistema en caso de no existir pérdidas operacionales, de manera que el rendimiento de la bomba y el rendimiento hidráulico son igual a 1. El límite de la zona A calificada como excelente, viene determinada por una equivalencia ampliamente utilizada, donde una intensidad energética de 0,4 kWh/m³ se corresponde con una altura de suministro de 100 m, un rendimiento hidráulico del 90% y un rendimiento de la bomba del 75%, valores representativos de este tipo de ineficiencias.

De esta manera, el límite A se propone para $\eta_p=0,75$ y $\eta_l=0,9$, siendo el factor $\Pi\eta_i=\eta_p \cdot \eta_l = 0,75 \cdot 0,9 = 0,68$, tal como aparece en la Figura 3-7. El resto de límites se corresponde con una separación de 0,1 puntos respecto a este límite de la zona A. Se puede ser tan exigente como se desee en la instauración de cada uno de los límites de eficiencia, únicamente se debe considerar los valores límite deseados, dados por la relación: $\Pi\eta_i=\eta_p \cdot \eta_l$. Así, se puede limitar cada una de las zonas en función de los valores que se deseen considerar para el rendimiento de las bombas

y para el rendimiento hidráulico. Por ejemplo, se puede limitar la zona A para bombas con rendimientos superiores a 0,85 y rendimientos hidráulicos superiores a 0,95, siendo el factor $\Pi\eta_i = \eta_p \cdot \eta_l = 0,85 \cdot 0,95 = 0,81$ y viéndose reducida el área de la zona A de la Figura 3-7.

Si el diagnóstico realizado mediante el indicador de intensidad energética y altura suministrada indica que la eficiencia del sistema recae en una zona inferior a la calificada con A, se deberá realizar la correspondiente auditoría energética que permita conocer el desglose de la energía total suministrada a la red, y así estudiar que ineficiencias tienen mayor margen de mejora.

Este diagnóstico presentado, parte de contar con escasos datos de la instalación (cotas de las fuentes de suministro, presión de servicio, facturas eléctricas, registros de caudales...), debiendo estimar las variables de las que no se tiene datos concretos. Si el análisis indica la necesidad de realizar la correspondiente auditoría energética, será necesario recabar los máximos datos posibles para caracterizar la red de la forma más cercana a la realidad mediante el modelo matemático del sistema.

En el ejemplo 6.1 del Apéndice III se realiza el diagnóstico energético descrito en este apartado para un sistema simple que bombea agua desde un pozo hasta un embalse. Conocida la intensidad energética y la altura de suministro del ejemplo, el gráfico indica que la eficiencia de la instalación se encuentra en el límite entre la zona C y D, un diagnóstico que refleja la necesidad de realizar mejoras energéticas en este sistema.

En el ejemplo 6.3 del mismo Apéndice III, se evalúa la intensidad energética y la altura de suministro de un abastecimiento de riego antes y después de realizar una serie de mejoras operacionales y estructurales. El punto de intersección entre la intensidad energética y la altura de suministro de la instalación, recae en la zona D calificada como inaceptable. Este sistema fue estudiado y analizado energéticamente mediante su modelo matemático, la auditoría energética arrojó un gran margen de mejora en la energía topográfica, y en la gestión de las bombas. Esto llevó a implementar como medidas de mejora la sectorización de la red, el reordenamiento de turnos de riego y algunos cambios en la estación de bombeo y en su gestión, lo que conllevó una reducción de la intensidad energética, siendo su valor actual de 0,16 kWh/m³, menos de la mitad que antes de las actuaciones.

Diagnóstico completo

Si en la fase de operación de la red se cuenta con información de la distribución espacial de caudales, se realizará el diagnóstico completo del sistema, basado en la publicación de Cabrera et al. 2015. Este diagnóstico compara tres indicadores de rendimiento energético de la red:

$$\eta_{ar} \frac{E_{uo}}{E_{sr}} \leq \eta_{ar,o} = \frac{E_{uo}}{E_{so}} \leq \eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} \quad (3-13)$$

- El rendimiento ideal del sistema (η_{ai}): compara la energía total suministrada en el caso ideal sin pérdidas operacionales (E_{si}), con la energía mínima requerida por los usuarios (E_{uo}). Éste será el mayor rendimiento del sistema con su layout actual, puesto que no tiene en cuenta las pérdidas operacionales, razón por la que es inalcanzable, pero ofrece información sobre el margen de mejora de la red.
- El rendimiento real del sistema (η_{ar}): compara la energía suministrada real en el sistema (E_{sr}), incluyendo la energía natural y la de bombeo, con la energía mínima requerida. Este indicador tiene en cuenta las pérdidas operacionales, y por tanto es el rendimiento real que tiene el sistema en fase de operación. La comparación de este rendimiento con el rendimiento ideal, da una idea del margen de mejora que tiene el sistema.
- El rendimiento real objetivo ($\eta_{ar,o}$): dado que el rendimiento ideal del sistema es inalcanzable, se propone un rendimiento objetivo a alcanzar en la red con valor comprendido entre el rendimiento real y el ideal. Este indicador compara la energía suministrada objetivo (E_{so}), calculada a partir de niveles de referencia a alcanzar en cada una de las pérdidas energéticas operacionales, con la energía mínima requerida. En el siguiente punto 3-2.2 se especifican diferentes métodos para calcular los niveles energéticos de referencia de cada una de las pérdidas energéticas operacionales.

Para realizar este diagnóstico energético de la red se ha desarrollado la herramienta “ITA global energy assessment”, presentada y explicada de manera resumida en el punto 2.1 del Apéndice VI. El desarrollo de esta herramienta está basado en los cálculos presentados en Cabrera et al., 2015, y en la herramienta EAGLE presentada

en Gómez, 2016. El cálculo del diagnóstico energético que realiza esta herramienta, parte de una serie de datos básicos del sistema como son las cotas, los volúmenes de agua inyectados y registrados, la presión de servicio, o el punto de funcionamiento de las bombas en caso de existir suministro por bombeo. Con estos datos, la herramienta ofrece como resultado el rendimiento energético ideal (η_{ai}) y real (η_{ar}) del sistema que permite evaluar la eficiencia de la red. Además, a partir de establecer unos objetivos a alcanzar en las ineficiencias del sistema (fugas, rendimiento en los bombeos y pendiente hidráulica), la herramienta ofrece el rendimiento objetivo a alcanzar por el sistema ($\eta_{ar,o}$). La comparación entre el rendimiento energético ideal, objetivo y real, supone una estimación de la eficiencia energética del sistema:

Este diagnóstico completo tiene algunas ventajas respecto al diagnóstico rápido del punto anterior. El diagnóstico completo permite estimar el peso de la energía topográfica en la red, ya que, conocida la distribución espacial de consumos, se puede calcular la energía topográfica ideal (E_{ti}). Así, se conocerá la relevancia de la energía topográfica respecto al total de energía suministrado en el caso ideal sin pérdidas, a través del indicador θ_{ti} . Este indicador se puede estimar en el diagnóstico rápido a partir de una cota media del sistema (\bar{z}), sin necesidad de conocer la distribución espacial de caudales:

$$\theta_{ti} = \frac{E_{ti}}{E_{si}} \approx \frac{(z_h - \bar{z})}{(z_h - z_l) + \frac{p_o}{\gamma}} \quad (3-14)$$

El problema de aplicar la expresión anterior, sin conocer la distribución espacial de caudales, es que no se puede obtener la cota media ponderada con la demanda de cada nudo, de manera que esta cota media geométrica puede no ser representativa de la red. En tal caso, las conclusiones que se derivan de este indicador sobre las ineficiencias estructurales pueden ser erróneas.

El diagnóstico completo tiene una segunda ventaja, permite realizar el cálculo del rendimiento real de la red asignando una presión de servicio diferente a cada nudo. Esto tiene especial interés en las redes de riego, donde puede ser habitual que las exigencias de presión en los hidrantes sean diferentes.

Una vez realizado el diagnóstico completo, si la diferencia entre el rendimiento real objetivo y el rendimiento real es sustancial, superior al 10%, se precisará realizar la auditoría energética de la red para conocer el desglose de cada una de las pérdidas energéticas. En el siguiente subapartado se puntualiza los aspectos más importantes de la auditoría energética.

Auditoría energética

Para realizar la auditoría energética del sistema, es imprescindible disponer del modelo matemático de la red. Esto permitirá conocer con certeza, en cada punto y en cada instante de tiempo, las diferentes variables hidráulicas que afectan al consumo energético del sistema: presión en cada uno de los puntos de la red, pérdida unitaria en las tuberías, rendimiento de las estaciones de bombeo, caudal consumido y fugado, desniveles de los puntos de consumo y fuentes de suministro...

Cabe destacar la importancia del modelo matemático en esta fase de análisis energético, ya que los resultados obtenidos derivarán de los datos que contemple el modelo. Es de suma importancia su calibración, siendo uno de los factores con mayor incertidumbre la asignación de pérdidas a la hora de realizar la carga hidráulica del modelo.

La herramienta “ITA Water Audit”, descrita en el Apéndice VI, y presentada en Gómez, 2016 bajo el nombre de ITAFugas, facilita la carga hidráulica del modelo, incluyendo en el mismo las pérdidas aparentes y reales. Esta herramienta permite convertir los nudos del modelo en emisores, calculando el caudal fugado en función de la presión. Para ello, se define la desagregación de pérdidas totales en aparentes y reales. Para simular las pérdidas aparentes se incrementa automáticamente en el modelo la demanda base de los nudos. Mientras que para simular las pérdidas reales se asigna a cada nudo un coeficiente del emisor, que permita simular el caudal saliente en función de la presión existente en la conexión.

Los resultados del modelo final de EPANET, debidamente calibrado y con las pérdidas definidas, serán utilizados para el cálculo de la auditoría energética. Para ello se ha desarrollado la herramienta “ITA Energy audit”, descrita en el Apéndice VI, y la cual parte de la herramienta ITAEnergy presentada en Gómez, 2016. Definiendo en esta herramienta la presión de servicio y el periodo de tiempo de

análisis, se obtendrá un balance energético en el que la energía total suministrada desde cada una de las fuentes es igual a la energía mínima requerida por los usuarios más el sumatorio de pérdidas energéticas (estructurales y operacionales), tal como se mostró en la ecuación (3-7). Esta herramienta simula el modelo de EPANET y utiliza sus resultados para realizar la auditoría energética.

Como primer apartado de resultados, la herramienta muestra el balance hídrico del sistema (Figura 3-8), en el cual se indica el volumen inyectado total (especificando el volumen que aporta cada fuente), el volumen consumido total, y el volumen fugado. En caso de existir depósitos, se indica el volumen de agua que quedaría almacenado en los mismos, o el volumen que ceden al sistema, durante el período de tiempo definido. Con estos datos se calculan dos indicadores, por un lado, el rendimiento volumétrico que relaciona el volumen inyectado total, con el volumen consumido, y por otro lado las fugas por unidad de longitud, que relaciona el volumen fugado con los km de tubería existente en la red. Los valores de estos indicadores, permiten evaluar el estado de la red en cuanto a pérdidas de agua se refiere.

VOLÚMENES m3/día	
Volúmenes del sistema	
Volumen inyectado total	2,873.247 m3
Volumen inyectado embalse 1	2,539.278 m3
Volumen inyectado embalse 2	333.969 m3
Volumen consumido	2,259.033 m3
Volumen fugado	614.222 m3
Volumen almacenado en los depósitos	0.00 m3
Indicadores del sistema	
Rendimiento volumétrico	78.62 %
Fugas por unidad de longitud	2.042 m3/km h
Error	
Error en el balance volumétrico	0.00 %

Figura 3-8: Ejemplo de un balance hídrico mostrado en “ITA Energy Audit”

Como resultado de la auditoría energética, se indica la energía total aportada al sistema, especificando la energía que aporta cada una de las fuentes, ya sea en forma de bombeos o a través de energía natural. Por otro lado, se indica la energía

consumida por la red: energía mínima requerida, pérdidas energéticas operacionales y pérdidas energéticas estructurales. Además, en los resultados de la auditoría, se indica la energía almacenada en los depósitos de compensación. Esta energía es la que ha entrado en los depósitos o la que éstos han aportado al sistema, no obstante, en periodos de simulación largos este término no será significativo con respecto al resto de términos de la auditoría, por lo que se puede llegar a considerar despreciable.

Esta herramienta está centrada en el análisis de las pérdidas energéticas operacionales, de ahí que se detallen aspectos como la diferencia entre la energía perdida por fricción debida a las tuberías y debida a las válvulas, o las pérdidas energéticas en cada estación de bombeo. En la Figura 3-9 se muestra un esquema del desglose energético que realiza la herramienta “ITA Energy Audit”.

ENERGÍAS kWh/día	
Energía total aportada	
Energía aportada por las bombas	
Energía de la bomba1 (Tpo. func. 24.00 h)	
Energía de la bomba2 (Tpo. func. 24.00 h)	
Energía natural	
Energía del embalse 1	
Energía del embalse 2	
Energía total 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 las bombas	
Energía perdida en la bomba B1	
Energía perdida en la bomba B2	
Energía de compensación	

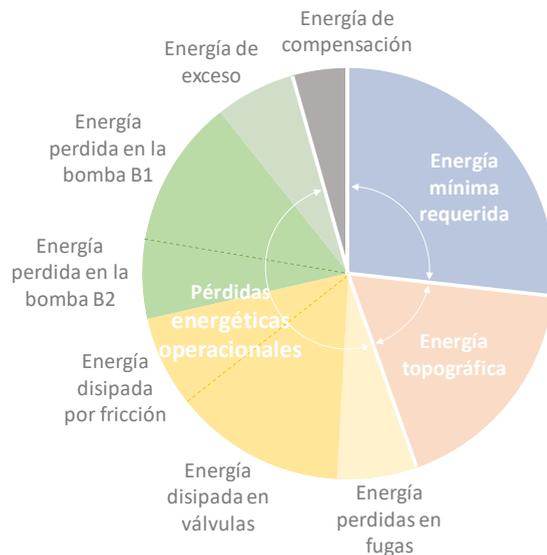


Figura 3-9: Ejemplo de una auditoría energética con “ITA Energy Audit”

3-2.2. Niveles energéticos de referencia

Para evaluar la importancia de cada pérdida energética operacional en el sistema, es necesario conocer el peso que representan sobre el total de energía

suministrada, así como el margen de mejora existente para cada una de ellas. En un sistema ideal no existen pérdidas energéticas operacionales, pero esto es inalcanzable en la realidad, por lo que deben estimarse una serie de niveles de referencia alcanzables para cada una de las pérdidas energéticas operacionales.

El peso de cada una de las pérdidas energéticas es conocido con la auditoría energética, mientras que existen diferentes maneras de estimar el nivel de referencia a alcanzar en cada ineficiencia. A continuación, se desarrollan niveles de referencia alcanzables para cada una de las pérdidas energéticas operacionales.

Energía embebida en fugas

Para obtener la máxima eficiencia posible, parece obvio pensar en reducir tanto como sea posible la cantidad de agua fugada, pero existe un nivel de fugas a partir del cual no es rentable económicamente seguir invirtiendo en tareas que traten de reducir el agua fugada, el llamado Nivel Económico de Fugas, más conocido por sus siglas en inglés Economic Level of Leakage (ELL).

Hay un momento en el que la inversión económica a realizar en los trabajos necesarios para disminuir las fugas se iguala al coste marginal del agua que se pierde. Este punto es el ELL y es el que se tomará como referencia a alcanzar para las fugas, por tanto, se pretende reducir el volumen de agua fugada de una instalación hasta alcanzar el ELL.

Existen diferentes métodos para calcular el ELL, todos relacionan el agua perdida con los costes que conlleva, incluyendo tanto el precio del agua como las inversiones en mantenimiento necesarias. El objetivo es tratar de llegar a un equilibrio entre los tres actores involucrados: volumen de agua perdida, precio del agua e inversión en mantenimiento. Para ello se debe disponer de información suficiente de la red a analizar.

Los gastos en reparaciones y mantenimiento se pueden representar mediante una curva que relaciona el coste de reparación (€) con el agua incontrolada (m^3). Cuando existen muchas fugas, los costes de reparación asociados a éstas son pequeños, pues es más sencillo detectarlas y repararlas. En cambio, los costes de reparación y mantenimiento son más altos cuando existen menos fugas, pues cuesta más reducir el volumen de agua fugado. De hecho, existe un umbral a partir del cual no se puede seguir reduciendo las fugas por mucha inversión que se realice,

el llamado Umbral Mínimo de Fugas (UMF) o Unavoidable Average Real Losses (UARL) en inglés. Este umbral representa las pérdidas reales mínimas que podrían lograrse técnicamente con la presión de funcionamiento del sistema, la longitud media de las acometidas y la densidad de acometidas existentes. Su cálculo en unidades de l/acometida/día se realiza como sigue:

$$UARL = \left(\frac{18 \times L + 0,8 \times N_c + 25 \times L_p \bar{p}}{N_c} \right) \quad (3-15)$$

Donde:

- L es la longitud total de la red (km)
- N_c es el número de acometidas
- L_p es la longitud total de acometidas (km)
- \bar{p} es la presión media del sistema (mca)

La curva de gastos en reparaciones y mantenimiento depende de la política de mantenimiento que se realice, así como de la edad y el estado de la red. Esta curva se conoce comúnmente por el acrónimo ALCC, derivado de su nombre en inglés Active Leakage Control Curve, y depende de cada instalación.

En cuanto a los costes del agua, normalmente se asume que son contantes, e incluye los gastos directos e indirectos. De esta manera, a mayor agua incontrolada, mayor coste, construyendo así una recta creciente que representa el valor del agua incontrolada.

La curva de costes totales, será suma de los costes de reparaciones y mantenimiento y del coste del agua. Esta curva de costes totales muestra un punto mínimo, que será el punto óptimo de operación, donde la suma de los costes totales de mantenimiento más los costes de agua fugada es mínima.

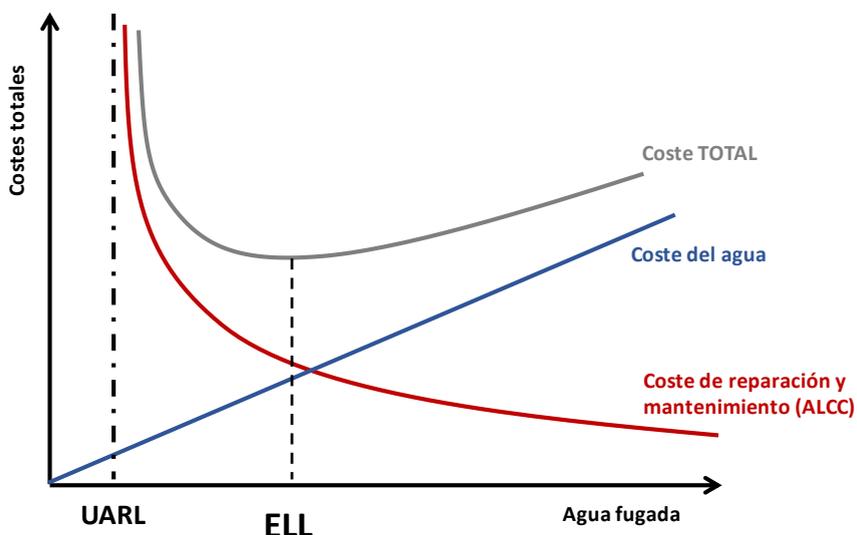


Figura 3-10: Gráfico explicativo del nivel económico de fugas (ELL)

También existen otros indicadores alternativos al ELL que podrían servir para estimar un valor referencia de fugas, como el Índice de Fugas Estructural (IFE), más conocido por sus siglas en inglés ILI (Infrastructure Leakage Index).

El ILI es un indicador ampliamente utilizado para caracterizar y gestionar las pérdidas reales de agua, relaciona el volumen de agua fugado en la red (nombrado habitualmente como TIRL, de sus siglas en inglés Technical Indicator for Real Losses) con el umbral mínimo de fugas (UARL):

$$ILI = \frac{TIRL}{UARL} \quad (3-16)$$

Es habitual que este indicador se le afecte por el índice de gestión de la presión (PMI Pressure Management Index) que es la relación entre la presión media de funcionamiento existente en la red y una presión de referencia estimada inferior que permita mantener los niveles de servicio deseados (AWWA Technical and Education Council's Water Loss Control Committee, 2019). Además se ha comprobado que el ILI afectado por el PMI caracteriza de manera más fiable las pérdidas reales del sistema (Trachtman, 2019).

Se espera que los sistemas bien gestionados tengan valores bajos de este índice de fugas estructural, cerca de 1, mientras que los sistemas con deficiencias de gestión de infraestructura presentarán valores más altos (Alegre et al., 2016). La AWWA (American Water Works Association) en su libro "*Water Audits and Loss Control Programs*" muestra una tabla que evalúa el valor del ILI obtenido (AWWA, 2016a). Otros autores clasifican la gestión hídrica del abastecimiento en función del valor del ILI (Liemberger and McKenzie, 2005), incluso desde el World Bank Institute se realiza una clasificación de los abastecimientos en función del ILI. De esta manera para ILI entre 1 y 2 el abastecimiento se califica como Clase A, considerando para países desarrollados que el abastecimiento es excelente. Con valores entre 2 y 4 se considera bueno, sin acciones urgentes a realizar. Con valores entre 4 y 8 el abastecimiento se califica como pobre, y con valores por encima de 8 muy malo, con necesidad urgente de aplicar un programa de reducción de fugas en la red.

Aunque el ILI es un indicador que depende de las características de cada sistema, valores entre 2 y 4 son habituales. El valor medio del ILI para los 68 abastecimientos que recogen la base de datos de la AWWA Water Audit Data Initiative (WADI) analizados entre los años 2009 y 2017 es de 2.22, en California es de 1.53 y en Georgia de 2.21. Afectando el ILI por el PMI estos indicadores aumentan respectivamente hasta 3.27, 2.33 y 3.25.

A partir de los valores de ILI y PMI, se pueden establecer y priorizar estrategias para la gestión de fugas como son la detección y reparación más rápida, el control activo de fugas y la gestión de la presión. Teniendo estas acciones en cuenta se recomienda que los abastecimientos con un PMI alto y una ILI relativamente baja deberían considerar operar a una presión del sistema más baja para reducir las pérdidas reales. Si tanto el PMI como el ILI son altos se debería considerar realizar una gestión de la presión para mejorar las pérdidas en el sistema. Mientras que aquellos abastecimientos con un PMI bajo y un ILI alto pueden mejorar el rendimiento hídrico mejorando la velocidad de detección de fugas y las reparaciones mediante la planificación de un control activo de fugas (AWWA Technical and Education Council's Water Loss Control Committee, 2019).

En definitiva, el ILI puede ser un indicador de ayuda para la gestión y la planificación de programas de reducción de fugas, pero acompañado del PMI para que su validez sea mayor.

En el Apéndice V se plantea un ejemplo en el que se realiza el cálculo del nivel de referencia de pérdidas energéticas por fugas ($E_{l,e}$), partiendo de la estimación del ELL y del ILI.

Si no se realizara el cálculo concreto del ELL o el ILI, se puede estimar el valor del volumen de agua fugada objetivo ($Q_{l,o}$) a partir del rendimiento hidráulico esperado en el sistema.

En la guía técnica para la evaluación de la calidad de los servicios de agua prestada a los usuarios publicada por la ERSAR en 2019 (ERSAR, 2019), aparecen una serie de indicadores con unos valores de referencia que permiten calificar la calidad del servicio prestado. En este ámbito, el indicador AA08ab hace referencia al porcentaje de agua no facturada, calificando el servicio prestado como bueno en redes en baja para valores inferiores al 20% de agua no facturada.

Por lo que, de una manera rápida y sencilla, se puede tomar como valor del rendimiento hídrico objetivo valores entorno al 80%. De tal manera que el volumen de pérdidas sea el 20% del volumen total suministrado, sin entrar en cálculos más complejos. Cabe destacar que el rendimiento hídrico tiene en cuenta tanto las pérdidas aparentes como las pérdidas reales, mientras que el ELL y el ILI únicamente cuantifican las pérdidas reales, es decir, las fugas. Dado que el planteamiento de un rendimiento hídrico objetivo es una aproximación que permite simplificar el cálculo, y que las pérdidas aparentes suelen representar un porcentaje muy inferior a las pérdidas reales, no se considera necesario realizar una distinción entre pérdidas aparentes y reales.

Otros indicadores de la ERSAR que se pueden tener en cuenta para obtener el nivel de referencia a alcanzar en fugas, son los indicadores AA12a y AA12b (ERSAR, 2019). Estos indicadores evalúan las pérdidas reales de agua por km de tubería y por acometida respectivamente. Para el suministro en baja, se considera una buena calidad del servicio si las pérdidas reales de agua son inferiores a $3 \text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{día})$, o $100 \text{ l}/(\text{ramal}\cdot\text{día})$.

El valor de las pérdidas energéticas alcanzables, relaciona el volumen de agua fugado objetivo ($Q_{l,o}$), con el volumen de agua real fugado (Q_l) y la energía actual embebida en fugas (E_{lr}):

$$E_{l,e} = \frac{Q_{l,o}}{Q_l} E_{lr} \quad (3-17)$$

Con el objetivo de automatizar el cálculo para la obtención de los diferentes niveles de referencia a alcanzar de las tres pérdidas energéticas operacionales, se ha desarrollado la herramienta "ITA Energy network labelling". En el Apéndice VI se hace una breve descripción de esta herramienta, mostrando como ejemplo el cálculo del nivel económico de fricción ELF, pero esta herramienta también realiza el cálculo del resto de métricas a alcanzar.

Algunos de los datos requeridos por esta herramienta deben introducirse manualmente, mientras que otros datos son obtenidos directamente del modelo, y de la correspondiente auditoría energética realizada. En el caso del nivel de referencia a alcanzar en la energía embebida en fugas $E_{l,e}$, la herramienta realiza el cálculo siguiendo la metodología del ELL, para ello es necesario introducir únicamente los parámetros de la curva de costes de reparación y mantenimiento (ALCC), y definir un coste marginal del agua, y un coste medioambiental por consumo del recurso si existiese.

Del diagnóstico y la auditoría previamente realizados se conoce el volumen total inyectado, el volumen registrado y la energía embebida en fugas. A partir de estos datos, la herramienta calcula el volumen fugado objetivo, y la energía embebida en fugas a alcanzar, graficando las curvas de costes del ELL, tal como puede verse en la siguiente figura.

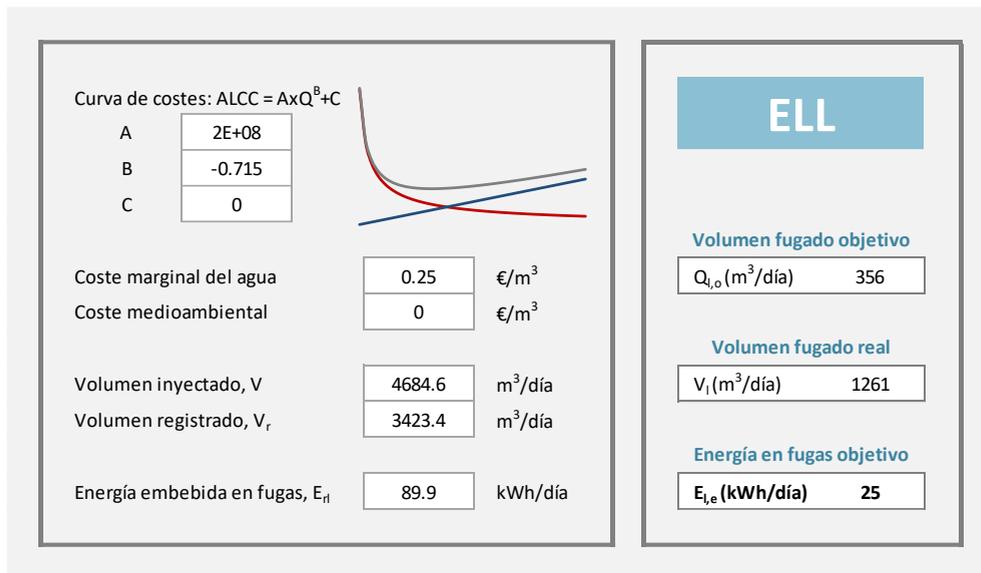


Figura 3-11: Ejemplo de cálculo del nivel de referencia a alcanzar en la energía embebida en fugas con la herramienta “ITA Energy network labelling”

Pérdidas energéticas por fricción

Como nivel de referencia a alcanzar en las pérdidas por fricción, se plantea el llamado nivel económico de fricción, Economic Level of Friction (ELF) (Cabrera et al., 2018). Una métrica, similar al nivel económico de fugas (ELL) visto anteriormente.

El fundamento de este indicador es determinar desde una óptica económica, el nivel medio de fricción óptimo del sistema, J_o , extendido a redes complejas de distribución de agua, ya sean ramificadas, malladas, de riego o urbanas.

Sin realizar un cálculo tan detallado como es el cálculo del ELF, se puede aproximar el valor de la pendiente hidráulica óptima a partir de algunos valores de referencia presentados en distintos estudios. En el Apéndice III se indican valores mínimos y máximos de la pendiente hidráulica derivados de estudios consultados: La AWWA ofrece valores máximos de J en función del diámetro de las tuberías (AWWA, 2012). Mientras que Bouman, 2014 ofrece valores mínimos y máximos de velocidad, a partir de los cuales se puede estimar, en función del diámetro, la pendiente hidráulica máxima y mínima de la instalación. Conocidos los valores máximos y

mínimos asumibles en la instalación, se puede estimar J_o como un valor comprendido entre estos valores.

Otros estudios han analizado la energía perdida por fricción a partir del análisis de múltiples sistemas de distribución. Según Hashemi et al., 2018, más del 90% de las tuberías analizadas en su estudio tienen una pendiente hidráulica inferior a 1 m/km. Con este dato parece razonable tomar como valores de referencia de la pendiente hidráulica media valores en torno a 1-1,5 m/km.

En los ejemplos 1 y 2 del Apéndice III se realiza el cálculo de la pendiente hidráulica óptima J_o según el ELF. Mientras que en el Apéndice V se plantea un ejemplo del cálculo del nivel de referencia de pérdidas energéticas por fricción ($E_{f,e}$) a partir de la estimación de J_o siguiendo la expresión (3-18), la cual relaciona J_o con la pendiente hidráulica media de la red J_a y la energía perdida por fricción E_{rf} :

$$E_{f,e} = \frac{J_o}{J_a} E_{rf} \quad (3-18)$$

Del mismo modo que en el caso del nivel de referencia a alcanzar en la energía embebida en fugas, los cálculos han sido automatizados mediante la herramienta "ITA Energy network labelling". El método establecido por esta herramienta para obtener el nivel de referencia de pérdidas por fricción es el del ELF. En el Apéndice VI se muestra un ejemplo concreto del cálculo de la pendiente hidráulica óptima utilizando la herramienta. Parte de los datos debe definirlos el usuario (factor de instalación, vida útil de las tuberías, exponente de ajuste de la evolución del coste de materiales, coeficiente de precios de las tuberías en función del diámetro, número de horas de funcionamiento y precio medio de la energía), mientras que los datos de rendimiento de las estaciones de bombeo, caudal y fricción, los toma directamente del modelo matemático.

Factor de instalación, F_i	2,3	
Vida útil de las tuberías, n	50	años
Exponente de ajuste del coste de las tuberías según material, c	2	
Coefficiente de ajuste del coste de las tuberías según diámetro, $A_c(p)$	583,39	€/m·m ²
Factor de fricción, f	0,017	
Número de horas de funcionamiento, h	8760	horas/año
Rendimiento global de la estación de bombeo, η_p	0,714	
Precio medio de la energía, p_e	0,13	€/kWh
Energía por fricción, E_{fr}	87,76	kWh/día

ELF	
Pendiente hidráulica óptima	
J_o (m/km)	1,33
Pendiente hidráulica actual	
J_a (m/km)	2,09
Energía por fricción objetivo	
$E_{f,e}$ (kWh/día)	55,85

Figura 3-12: Ejemplo de cálculo del nivel de referencia a alcanzar en las pérdidas energéticas por fricción con la herramienta “ITA Energy network labelling”

Energía perdida en bombas

El nivel de referencia a alcanzar en las pérdidas energéticas producidas en las estaciones de bombeo, depende en gran medida de la selección de los equipos y de la forma de regularlos en función de las condiciones de la instalación. Es de suma importancia para la eficiencia del sistema que la bomba trabaje en un punto de funcionamiento lo más cercano posible a su punto de mayor rendimiento (BEP por sus siglas en inglés Best Efficient Point), y a su vez garantizar que el equipo de bombeo instalado tenga un rendimiento mínimo elevado que garantice la máxima eficiencia posible del equipo incluso cuando trabaje alejado del BEP. Esto se puede lograr definiendo una zona útil de la bomba que trabaje en todos sus puntos de funcionamiento con rendimientos lo más altos posibles.

Por lo tanto, para evaluar la eficiencia energética de la estación de bombeo, es necesario analizar si la bomba seleccionada puede alcanzar un rendimiento mínimo satisfactorio, y si el punto de funcionamiento de la misma está cercano en todo momento al BEP.

Por otro lado, los puntos de funcionamiento de la bomba deben seguir la curva de consigna de la instalación, de manera que pueda impulsar los diferentes caudales demandados a la altura necesaria para garantizar exactamente la presión mínima requerida por el nudo más desfavorable, evitando así la aparición de energía de exceso en el sistema. Cuanto más lejos se encuentre el punto de funcionamiento de la bomba de la curva de consigna, mayores ineficiencias energéticas tendrá la instalación, ya que se estará aportando más energía de la estrictamente necesaria.

Para lograr que la bomba trabaje siguiendo la curva de consigna de la instalación con el mayor rendimiento posible en todo momento, se debe seguir un esquema de regulación que permita cubrir la curva de consigna con la zona útil de la bomba, desde el caudal mínimo demandado hasta el caudal máximo. Trabajando con varias bombas de velocidad variable en paralelo, la curva de consigna deberá estar cubierta por las zonas útiles de las diferentes bombas, para ello deben existir zonas de recubrimiento que permitan trabajar con buenos rendimientos en todo momento, tal como aparece en la Figura 3-13.

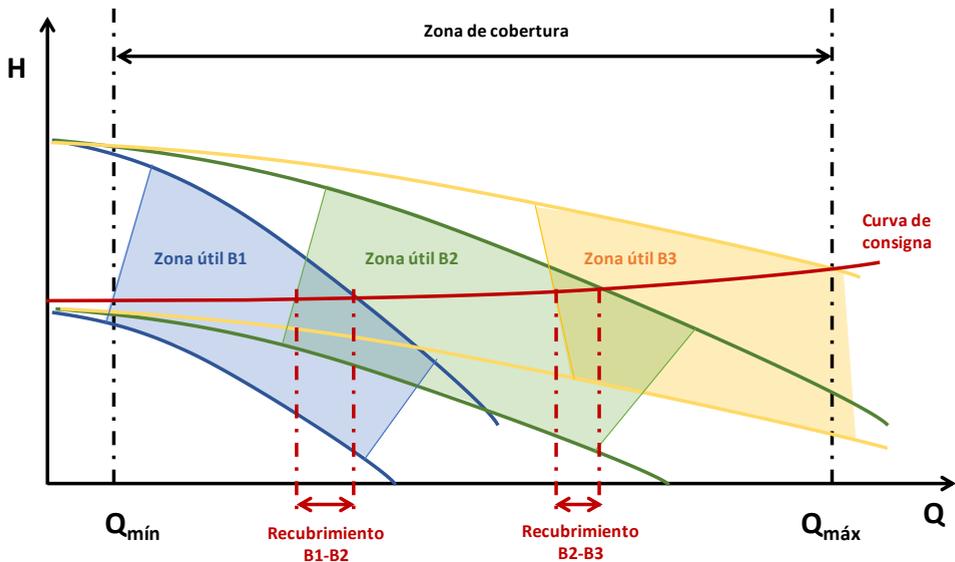


Figura 3-13: Cobertura de una curva de consigna con tres bombas trabajando en paralelo

Además, no hay que tener en cuenta únicamente los rendimientos de la bomba, sino el rendimiento de cada elemento que compone el grupo de presión, como mínimo formado por el motor eléctrico y la bomba, y en muchas ocasiones incluyendo un variador de frecuencia que permita adaptar la velocidad del motor de la bomba a los requerimientos de la instalación.

En esta línea, los fabricantes de bombas europeos Europump proponen un índice de eficiencia energética (EEI de sus siglas Energy Efficiency Index) que contempla el rendimiento del conjunto bomba y motor, dentro del procedimiento denominado Extended Product Approach (EPA) (Europump, 2014). Dicho procedimiento

pretende calificar energéticamente el conjunto global del equipo de bombeo, incluyendo la bomba, el motor y el variador de frecuencia en el caso de existir.

De esta manera, el rendimiento de la estación de bombeo será producto de los rendimientos de cada elemento que compone el equipo. Si bien es cierto que, normalmente, es la bomba la que mayores ineficiencias aporta, teniendo los variadores de frecuencia y los motores eléctricos habitualmente rendimientos por encima del 90% (Burt et al., 2008). En el caso de los motores, la eficiencia dependerá del nivel de eficiencia del motor (IE1, IE2 o IE3), potencia nominal, velocidad de rotación nominal, frecuencia y número de polos (IEC, 2011), así como de la carga del motor.

El Reglamento sobre ecodiseño de motores eléctricos CE 640/2009 (European Commission, 2009) establece una tabla con las exigencias mínimas para el rendimiento de motores eléctricos. Este rendimiento mínimo, será más exigente cuanto mayor potencia nominal tenga el motor, llegando a exigir rendimientos mínimos del 96% para motores IE3 de 4 polos y potencias nominales entre 200 y 375 kW, tal como se puede consultar en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Eficiencia mínima de motores eléctricos IEC 60034-30 (IEC, 2011)

kW	HP	IE-1 - Standard efficiency						IE2 - High efficiency						IE3 - Premium efficiency					
		2 pole		4 pole		6 pole		2 pole		4 pole		6 pole		2 pole		4 pole		6 pole	
0.75	1	72.1	77.0	72.1	78.0	70.0	73.0	77.4	75.5	79.6	82.5	75.9	80.0	80.7	77.0	82.5	85.5	78.9	82.5
1.1	1.5	75.0	78.5	75.0	79.0	72.9	75.0	79.6	82.5	81.4	84.0	78.1	85.5	82.7	84.0	84.1	86.5	81.0	87.5
1.5	2	77.2	81.0	77.2	81.5	75.2	77.0	81.3	84.0	82.8	84.0	79.8	86.5	84.2	85.5	85.3	86.5	82.5	88.5
2.2	3	79.7	81.5	79.7	83.0	77.7	78.5	83.2	85.5	84.3	87.5	81.8	87.5	85.9	86.5	86.7	89.5	84.3	89.5
3	3	81.5	-	81.5	-	79.7	-	84.6	-	85.5	-	83.3	-	87.1	-	87.7	-	85.6	-
3.7	5	-	84.5	-	85.0	-	83.5	-	87.5	-	87.5	-	87.5	-	88.5	-	89.5	-	89.5
4	4	83.1	-	83.1	-	81.4	-	85.8	-	86.6	-	84.6	-	88.1	-	88.6	-	86.8	-
5.5	7.5	84.7	86.0	84.7	87.0	83.1	85.0	87.0	88.5	87.7	89.5	86.0	89.5	89.2	89.5	89.6	91.7	88.0	91.0
7.5	10	86.0	87.5	86.0	87.5	84.7	86.0	88.1	89.5	88.7	89.5	87.2	89.5	90.1	90.2	90.4	91.7	89.1	91.0
11	15	87.6	87.5	87.6	88.5	86.4	89.0	89.4	90.2	89.8	91.0	88.7	90.2	91.2	91.0	91.4	92.4	90.3	91.7
15	20	88.7	88.5	88.7	89.5	87.7	89.5	90.3	90.2	90.6	91.0	89.7	90.2	91.9	91.0	92.1	93.0	91.2	91.7
18.5	25	89.3	89.5	89.3	90.5	88.6	90.2	90.9	91.0	91.2	92.4	90.4	91.7	92.4	91.7	92.6	93.6	91.7	93.0
22	30	89.9	89.5	89.9	91.0	89.2	91.0	91.3	91.0	91.6	92.4	90.9	91.7	92.7	91.7	93.0	93.6	92.2	93.0
30	40	90.7	90.2	90.7	91.7	90.2	91.7	92.0	91.7	92.3	93.0	91.7	93.0	93.3	92.4	93.6	94.1	92.9	94.1
37	50	91.2	91.5	91.2	92.4	90.8	91.7	92.5	92.4	92.7	93.0	92.2	93.0	93.7	93.0	93.9	94.5	93.3	94.1
45	60	91.7	91.7	91.7	93.0	91.4	91.7	92.9	93.0	93.1	93.6	92.7	93.6	94.0	93.6	94.2	95.0	93.7	94.5
55	75	92.1	92.4	92.1	93.0	91.9	92.1	93.2	93.0	93.5	94.1	93.1	93.6	94.3	93.6	94.6	95.4	94.1	94.5
75	100	92.7	93.0	92.7	93.2	92.6	93.0	93.8	93.6	94.0	94.5	93.7	94.1	94.7	94.1	95.0	95.4	94.6	95.0
90	125	93.0	93.0	93.0	93.2	92.9	93.0	94.1	94.5	94.2	94.5	94.0	94.1	95.0	95.0	95.2	95.4	94.9	95.0
110	150	93.3	93.0	93.3	93.5	93.3	94.1	94.3	94.5	94.5	95.0	94.3	95.0	95.2	95.0	95.4	95.8	95.1	95.8
132	-	93.5	-	93.5	-	93.5	-	94.6	-	94.7	-	94.6	-	95.4	-	95.6	-	95.4	-
150	200	-	94.1	-	94.5	-	94.1	-	95.0	-	95.0	-	95.0	-	95.4	-	96.2	-	95.8
160	-	93.8	-	93.8	-	93.8	-	94.8	-	94.9	-	94.8	-	95.6	-	95.8	-	95.6	-
185	250	-	94.1	-	94.5	-	94.1	-	95.4	-	95.4	-	95.0	-	95.8	-	96.2	-	95.8
200	-	94.0	-	94.0	-	94.0	-	95.0	-	95.1	-	95.0	-	95.8	-	96.0	-	95.8	-
220	300	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
250	350	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
300	400	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
330	450	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
375	500	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8

El funcionamiento del motor a cargas sustancialmente diferentes de la carga nominal puede dar lugar a un gran cambio en su eficiencia. En la Figura 3-14 se muestra la relación entre la eficiencia de un motor de inducción de jaula de ardilla de 60 Hz y 1800 rpm y su carga, no obstante, estos valores varían según el tipo de motor y el fabricante, por lo que en cada situación será diferente.

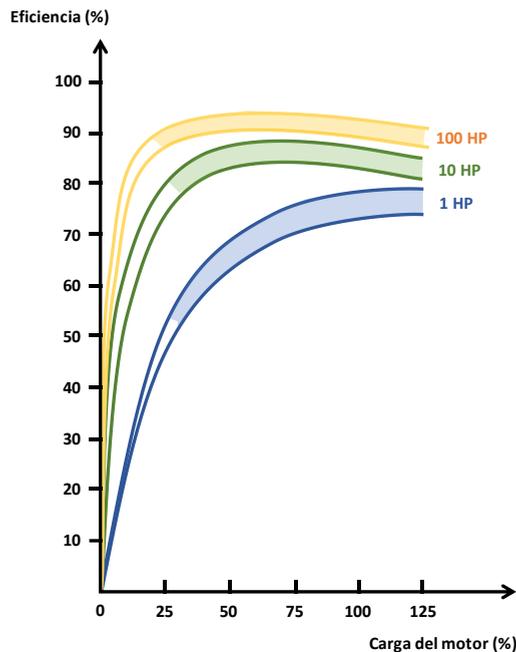


Figura 3-14: Eficiencia de un motor de inducción de jaula de ardilla de 60 Hz y 1800 rpm en función de su potencia nominal (HP) y de su carga (%) (National Electrical Manufacturers Association, 2007)

En los variadores de frecuencia, el rendimiento cambia en función de la potencia y del porcentaje de carga, siendo habitual tomar valores del rendimiento superiores al 95%.

En la Tabla 3-2 se ofrecen valores de la eficiencia a carga parcial del variador de frecuencia, en función del porcentaje de la potencia nominal de salida del variador y de la potencia del mismo. Donde se puede ver que, a mayor potencia, los rendimientos son mayores, comportándose con valores por encima del 95% incluso con una carga del 50%. No obstante, la eficiencia disminuye con la disminución de

la carga del variador, especialmente con cargas inferiores al 20%, siendo la disminución de la eficiencia más pronunciada con motores de menor potencia.

Tabla 3-2: Eficiencia de los variadores de frecuencia en función de su carga (%) y su potencia (hp) (U.S. Department of Energy, 2012)

Potencia nominal de salida del variador de frecuencia (hp)	Eficiencia del variador (%)						
	Carga (% de la potencia nominal de salida)						
	1,6	12,5	25	42	50	75	100
5	35	80	88	91	92	94	95
10	41	83	90	93	94	95	96
20	47	86	93	94	95	96	97
30	50	88	93	95	95	96	97
50	46	86	92	95	95	96	97
60	51	87	92	95	95	96	97
75	47	86	93	95	96	97	97
100	55	89	94	95	96	97	97
200	61	81	95	96	96	97	97

En el sector del agua, se puede programar el variador con funciones de control inteligentes para sistemas con una única bomba o varias bombas en paralelo. Con una correcta programación de los variadores se puede optimizar el sistema de regulación de la bomba, trabajando en puntos más cercanos al BEP y a la curva de consigna, reduciendo así la energía consumida. Con la correcta regulación del variador de frecuencia, se pueden lograr ahorros energéticos considerables en la bomba (ZVEI-German Electrical and Electronic Manufacturers' Association, 2015).

No siempre se cuantifica el rendimiento de cada elemento que compone la estación de bombeo, ya que para conocer específicamente el rendimiento del variador de frecuencia y del motor eléctrico es necesario medir la potencia absorbida a la entrada de cada uno de estos elementos mediante un analizador de redes instalado (Giner et al., 2015), siendo esta una práctica que no suele llevarse a cabo. De ahí que diversas investigaciones propongan diferentes métodos que permiten modelar y conocer la eficiencia de las bombas de velocidad variable teniendo en cuenta el conjunto del equipo motor-variador-bomba (Wu et al., 2009; Marchi et al., 2012), o la posibilidad de utilizar Modelos Semi Analíticos (SAM) para su estimación (Europump, 2014).

Del mismo modo que se establece un rendimiento mínimo para los motores, desde la Unión Europea se lanzó en 2012 el “Reglamento 547/2012 relativo a los requisitos de diseño ecológico para las bombas hidráulicas” (European Commission, 2012). Esta normativa se aplica a partir de la Directiva 2009/125/CE que exige un diseño ecológico para los productos relacionados con la energía, como en este caso son las bombas. Este reglamento exige la fabricación de bombas con un rendimiento mínimo, y vaticina que existe un potencial ahorro del rendimiento energético en los equipos de bombeo de entre el 20 y el 30%.

Según esta normativa de 2012, las bombas deberán cumplir un rendimiento mínimo a carga parcial (PL), en su punto de máximo rendimiento (BEP), y en estado de sobrecarga (OL). Se considera carga parcial el punto de funcionamiento de la bomba al 75% del caudal en el BEP, y se deberá cumplir en este punto un rendimiento mínimo igual al 0,947 del rendimiento mínimo en el BEP. Se considera sobrecarga el punto de funcionamiento de la bomba al 110% del caudal en el BEP. En este caso se deberá cumplir es ese punto un rendimiento igual al 0,985 del rendimiento mínimo en el BEP.

El rendimiento mínimo en el BEP, según la normativa de 2012, se calcula como:

$$\eta_{BEP} = 88.59 \ln(n_s) + 13.46 \ln(Q_{BEP}) - 11.48(\ln(n_s))^2 - 0.85(\ln(Q_{BEP}))^2 - 0.38 \ln(n_s) \ln(Q_{BEP}) - C \quad (3-19)$$

Con el caudal en m³/h y siendo n_s la velocidad específica de la bomba en min⁻¹ calculada como:

$$n_s = n \frac{\sqrt{Q_{BEP}}}{\left(\frac{H_{BEP}}{i}\right)^{3/4}} \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (3-20)$$

Donde n es la velocidad de rotación nominal de la bomba (rpm), e i el número de rodetes en serie de los que dispone la bomba.

El parámetro C es una constante que depende del tipo de bomba, de su velocidad de rotación y del valor del índice de eficiencia mínima (MEI). La eficiencia de las bombas depende en gran medida de su tamaño y diseño, de tal forma que las bombas más grandes suelen tener un mayor potencial para alcanzar eficiencias más

altas. El indicador MEI tiene en cuenta el tamaño de la bomba, su velocidad específica, y su velocidad de rotación nominal, permitiendo establecer un umbral de eficiencia comparable entre los diferentes tipos de bombas existentes en el mercado (Stoffel, 2015).

Según esta normativa, los requisitos de ecodiseño que deben cumplir los fabricantes de bombas a partir del 1 de enero de 2015, es cumplir un rendimiento mínimo a carga parcial, sobrecarga y en el punto de máxima eficiencia de la bomba, calculado con el correspondiente valor de C para MEI = 0,4. Los valores de C se encuentran en el cuadro 1 del Anexo III del reglamento (European Commission, 2012). Dicho cuadro recoge los valores de C únicamente para MEI = 0,1 y MEI = 0,4, que son los umbrales a cumplir a partir de 2013 y 2015 respectivamente. En cambio, con la tecnología actual, existen bombas con MEI > 0,70, tal como se especifica en el Anejo V de la normativa. Teniendo en cuenta que la directiva sobre diseño de bombas entró en vigor en 2012, cualquier bomba en el mercado actual debe cumplir con los requisitos descritos, incluso en el caso de bombas con un número muy bajo de horas de trabajo por año.

Cuanto mayor es el MEI, menor es el valor de C, y por tanto más exigente será el rendimiento mínimo exigido en el BEP. En la Tabla 3-3 se recogen los valores de C para diferentes MEI y tipos de válvulas (Europump, 2013). Según esta tabla, el valor mínimo de C se da para bombas tipo MSS (bomba sumergible multietapa de agotamiento) de velocidad de rotación 2900 rpm con MEI = 0,70, siendo en tal caso el valor de C=123,84.

Tabla 3-3: Valores de la constante C para diferentes valores de MEI y tipos de bombas (Europump, 2013)

	MEI						
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
C (ESOB, 1450)	132,58	130,68	129,35	128,07	126,97	126,10	124,85
C (ESOB, 2900)	135,60	133,43	131,61	130,27	129,18	128,12	127,06
C (ESCC, 1450)	132,74	131,20	129,77	128,46	127,38	126,57	125,46
C (ESCC, 2900)	135,93	133,82	132,23	130,77	129,86	128,80	127,75
C (ESCCI, 1450)	136,67	134,60	133,44	132,30	131,00	130,32	128,98
C (ESCCI, 2900)	139,45	136,53	134,91	133,69	132,65	131,34	129,83
C (MS-V, 2900)	138,19	135,41	134,89	133,95	133,43	131,87	130,37
C (MSS, 1450)	134,31	132,43	130,94	128,79	127,27	125,22	123,84

A partir del caudal en el BEP de la bomba instalada, se calculará el rendimiento mínimo en el BEP según indica la normativa. Para ello se considerará un MEI = 0,7 y a partir de aquí se seleccionará el valor de C en función del tipo de bomba instalada. Se calculará el rendimiento a carga parcial y a sobrecarga según específica la normativa, siendo la curva de rendimiento objetivo de la bomba, aquella curva de rendimiento que pase por los 3 puntos: carga parcial (PL), BEP y sobrecarga (OL), tal como se muestra en la Figura 3-15 y en la figura 8 del ejemplo del Apéndice V.

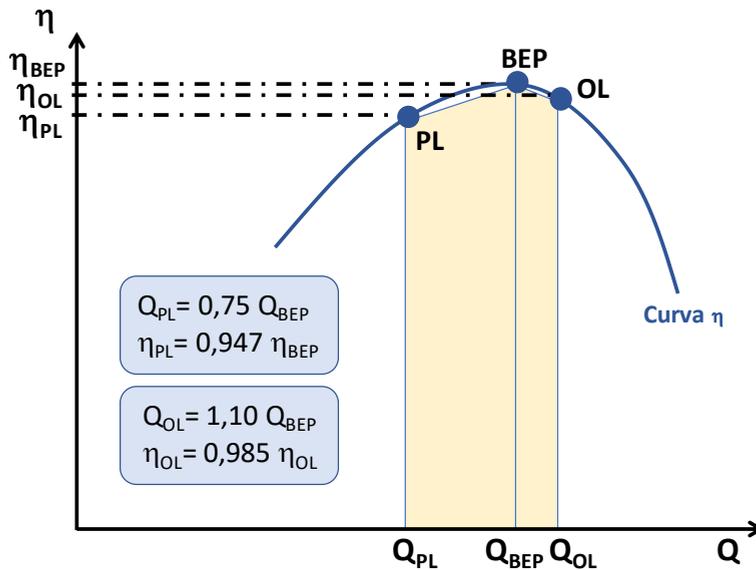


Figura 3-15: Curva de rendimiento mínimo según European Commission, 2012.

Para tener en cuenta todos los elementos de la estación de bombeo, tal como indica el proceso Extended Product Approach, estos rendimientos de la bomba se afectarán por el rendimiento del correspondiente motor IE3 que aparece en la normativa de 2009 vista anteriormente en la Tabla 3-1, el cual se selecciona en función de la potencia nominal, la frecuencia, y el número de polos (IEC, 2011). Aunque realmente el rendimiento del motor cambia con la variación de caudal, se puede considerar constante e igual al de la tabla. En el caso de existir variador de frecuencia, también se deberá contemplar su rendimiento, siendo valores habituales rendimientos del 95% o superiores. En cualquier caso, se puede utilizar

la Tabla 3-2 para seleccionar el rendimiento del variador en función de su potencia nominal.

Por lo tanto, la energía objetivo perdida en bombas ($E_{p,e}$) será aquella que proporcione la nueva curva de rendimiento objetivo para las condiciones de demanda de caudal de la instalación. La bomba a instalar deberá tener como mínimo esta curva de rendimiento, y éste será el objetivo a alcanzar. En el mercado existe una gran oferta de equipos, existiendo la posibilidad de instalar equipos con mayores rendimientos, que serán más beneficiosos energéticamente.

La elección final de la bomba puede realizarse siguiendo un proceso de análisis del coste de ciclo de vida del equipo (LCC de sus siglas en inglés Life Cycle Cost). Este análisis contempla los costes iniciales (compra de equipo e instalación de la bomba), así como los costes futuros (consumo de energía, mantenimiento y operación de la bomba, coste ambiental y tiempo de inactividad). El análisis de LCC a la hora de adquirir el equipo de bombeo permitirá maximizar la eficiencia energética de la estación de bombeo a lo largo de su vida útil, reduciendo los costes energéticos y operacionales (Hydraulic Institute and Europump, 2001).

En el Apéndice V se presenta un caso práctico en el que se aplican los pasos a seguir para obtener los niveles de referencia de pérdidas por bombeo, y se puntualiza que para bombas con pocas horas de funcionamiento al año (por ejemplo inferiores a 500 h/año), los cálculos anteriores se pueden hacer considerando un MEI = 0,4.

Siguiendo el procedimiento descrito, la herramienta “ITA Energy network labelling” permite obtener la curva de rendimiento objetivo de la bomba. Para ello se deben definir los parámetros de altura y caudal en el BEP, así como la velocidad de rotación nominal de la bomba y el número de rodets. El rendimiento del motor y del variador los definirá el usuario, pudiendo apoyarse en las tablas antes presentadas, las cuales pueden consultarse directamente desde la herramienta (Figura 27). Del mismo modo, se definirá el parámetro C en función del MEI. Con estos datos se calcula automáticamente los parámetros de la curva de rendimiento objetivo, graficando la misma como puede verse a continuación.

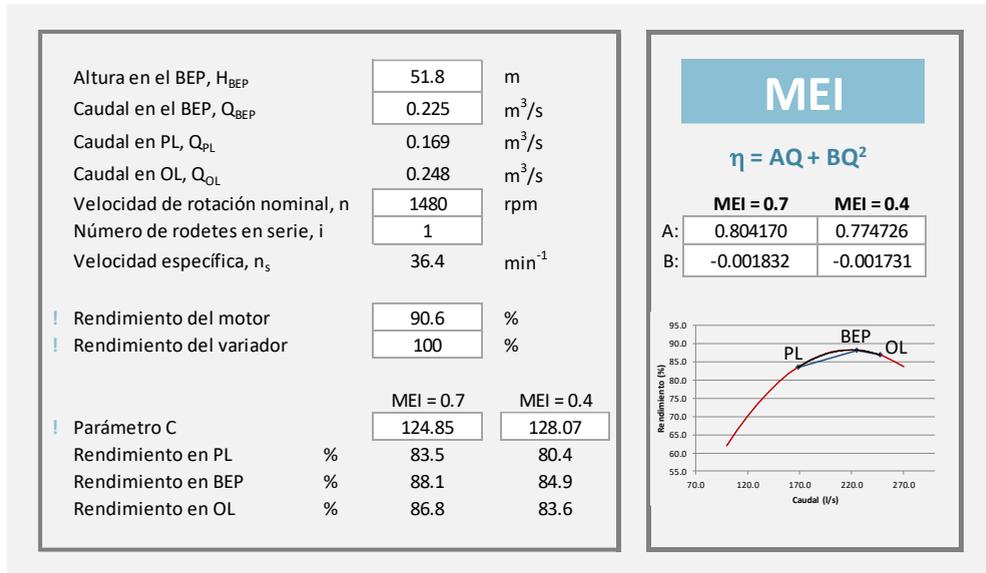


Figura 3-16: Ejemplo de obtención de la curva de rendimiento objetivo con la herramienta “ITA Energy network labelling”

3-3. PÉRDIDAS ENERGÉTICAS ESTRUCTURALES

La componente topográfica puede influir en gran medida en la demanda energética de un sistema, por ello es importante diseñar las redes teniendo este aspecto en cuenta. No obstante, en aquellas redes ya diseñadas y puestas en funcionamiento, es necesario analizar las pérdidas estructurales, para conocer cuál es su contribución en la demanda energética total del sistema, y para plantear medidas que permitan reducir este gasto energético derivado de la topografía de la red.

El análisis detallado de las pérdidas energéticas estructurales se presenta en el artículo del Apéndice IV dedicado a la gestión de la energía topográfica. La principal novedad de este artículo radica en la desagregación de la energía topográfica en tres partes. Esto permite conocer la cantidad de energía topográfica que podría eliminarse sin afectar al correcto funcionamiento del sistema. Pese a que se detalla en el Apéndice IV, a continuación, se resume cada una de las partes en las que se puede descomponer la energía topográfica:

- Energía topográfica inevitable (E_{tr}^u): una componente energética que se considera inevitable debido a que incluso en el caso ideal donde no existan pérdidas operacionales, esta energía se seguiría teniendo que suministrar para cumplir los estándares de calidad estipulados. Depende de las irregularidades del terreno, puesto que, para abastecer a los nudos más altos, todos los nudos situados aguas arriba de éstos que tengan una cota más pequeña deben contar con una energía mínima que permita llegar al resto de nudos más elevados con la presión de servicio, incluso en el caso de no existir pérdidas operacionales.
- Energía topográfica inevitable debida al flujo (E_{tr}^f): esta energía topográfica depende de la pendiente hidráulica, es decir, depende de las pérdidas por fricción existentes. Es necesario suministrarla para que en todos los nudos se cumpla la presión de servicio. Si al tratar de reducir la energía topográfica, se reduce esta energía, en algún punto de la instalación no se cumplirán los estándares de calidad.
- Energía topográfica gestionable (E_{tr}^m): esta parte de la energía topográfica es la única prescindible para cumplir la presión de servicio en todos los nudos. Por lo tanto, se puede recuperar (con turbinas o PATs) o disipar (con PRVs). Si no se realizan cambios en el layout del sistema, el margen de mejora existente en la componente estructural de una red, viene determinado por la cantidad de energía topográfica gestionable que exista en la misma. Por tanto, es importante realizar un análisis detallado de esta componente.

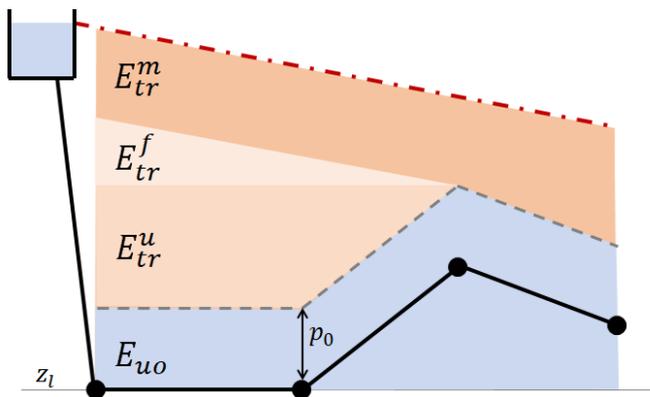


Figura 3-17: Desglose de la energía topográfica en sus tres componentes

Mediante la auditoría energética realizada con el modelo matemático del sistema, se puede conocer de manera concreta la cantidad de energía empleada en vencer la topografía del terreno, y cuál es su división (E_{tr}^u , E_{tr}^f y E_{tr}^m).

Las medidas a llevar a cabo para gestionar las pérdidas energéticas estructurales, dependerán de la cantidad de energía topográfica existente en la red, y de la parte gestionable de la misma. La relación de estas dos componentes, ofrecerá una calificación energética desde el punto de vista estructural, y permitirá decidir si es pertinente incorporar acciones de mejora, tal como muestra el diagrama de flujo de la Figura 3-18. En el punto 3-4.1 de este documento se detalla dicha calificación.

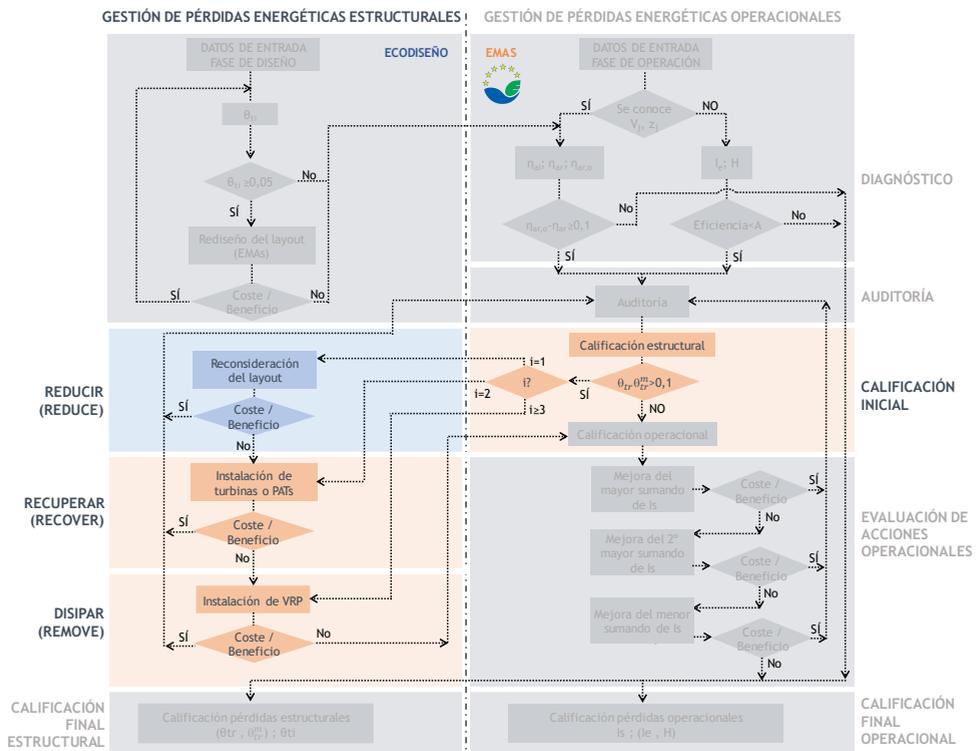


Figura 3-18: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Pérdidas estructurales en fase de funcionamiento

Si la calificación energética estructural indica la necesidad de llevar a cabo acciones de mejora, se deben plantear medidas que permitan reducir, recuperar o disipar esta energía, en este orden.

En primer lugar, debe tratarse de reducir la energía topográfica replanteando la configuración del sistema. Nuevos trazados, o un cambio en la fuente de suministro, puede permitir reducir considerablemente las pérdidas estructurales del sistema. Para ello, se deben plantear medidas de ecodiseño como las que se han visto en el punto 3-1 “Ecodiseño de las redes de distribución de agua a presión”. Esta será la primera iteración del proceso de gestión de las pérdidas energéticas estructurales ($i=1$), coincidiendo con la primera de las tres erres: Reduce, tal como aparece en el diagrama de flujo.

En caso de que el análisis coste-beneficio de las actuaciones de reconfiguración del diseño sea negativo, se plantearán medidas para recuperar parte de la energía topográfica con la instalación de turbinas y/o PATs. Este segundo paso del proceso ($i=2$) coincide con la segunda de las tres erres: Recover.

Si el correspondiente estudio económico niega la viabilidad de instalación de elementos recuperadores de energía, como última medida se planteará la disipación de la energía topográfica gestionable con válvulas reductoras de presión (PRVs). Esta medida será la tercera de las tres erres: Remove, y la tercera iteración del proceso de gestión de las pérdidas energéticas estructurales ($i=3$). Se debe tener en cuenta que, al disipar el excedente de energía con PRVs, se contribuye a disminuir la presión en el sistema, y por tanto a reducir las fugas en la red y su correspondiente energía. No obstante, la energía que se disipa ha sido introducida previamente en la red, y por tanto es la última medida que debe plantearse, pues no supondrá un ahorro energético tan considerable como las dos opciones anteriores.

Que la energía topográfica se clasifique de una u otra manera depende en gran medida del perfil del sistema. Es la dependencia a priori más evidente, y conviene puntualizar cómo se comporta la energía topográfica en función del perfil. En la Figura 3-19 se pueden observar tres perfiles diferentes con consumos uniformes a lo largo de la red.

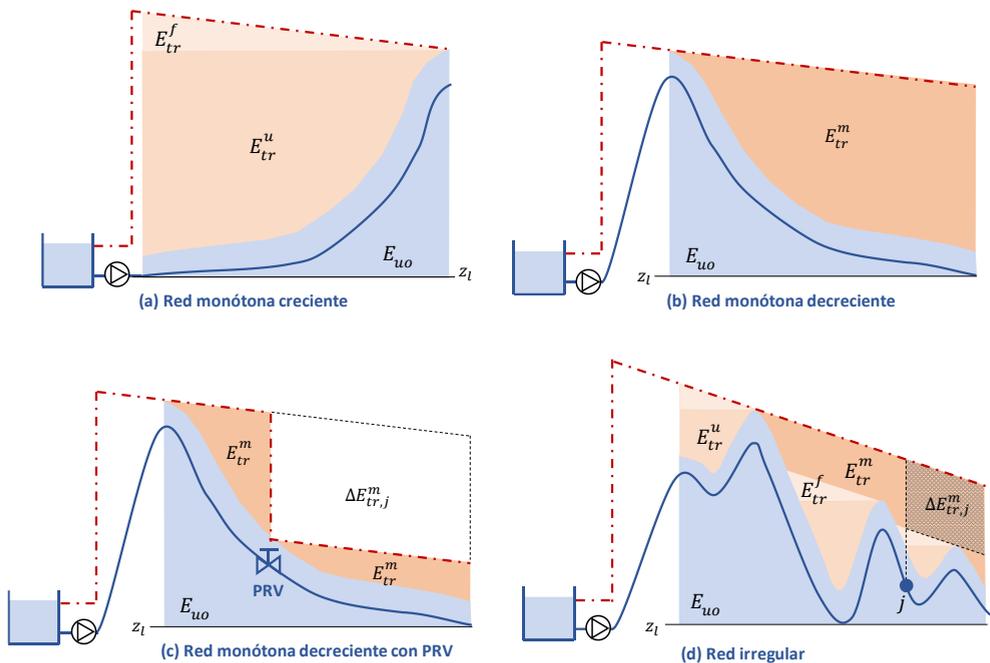


Figura 3-19: Descomposición de la energía topográfica en redes de diferente perfil (a: creciente, b: decrecientes, c: decreciente con PRV, d: irregular)

El primer sistema tiene un perfil monótono creciente (Figura 3-19a), en estos casos la energía topográfica es inevitable (E_{tr}^u), pues para llegar a abastecer al último punto de mayor cota, los nudos aguas arriba deben contar como mínimo con esta energía. También se cuenta con energía topográfica de flujo (E_{tr}^f), necesaria para vencer las pérdidas por fricción y llegar con la presión de servicio al nudo más desfavorable. En cambio, en perfiles decrecientes (Figura 3-19b) la energía será principalmente gestionable (E_{tr}^m), puesto que el nudo más desfavorable es el más cercano a la fuente de suministro, y por lo tanto los nudos situados aguas abajo cuentan con un excedente de energía innecesario derivado de suministrar la energía mínima requerida en el punto alto próximo a la fuente. Se podrían colocar tantos elementos como fuese necesarios para eliminar toda esta energía topográfica. El lugar óptimo para la instalación de cualquier elemento, desde el punto de vista energético, será aquel que mayor energía topográfica gestionable acumulada ($\Delta E_{tr,j}^m$) tenga.

Este es un concepto de suma importancia, ya que cuantifica la cantidad de energía topográfica que podría gestionarse desde un nudo concreto de estudio hacia aguas abajo del mismo, sin comprometer los estándares de calidad estipulados, es decir, cumpliendo en todo momento la presión de servicio. Los nudos del sistema que mayor energía topográfica gestionable acumulan, son el lugar óptimo para la instalación de turbinas, PATs o PRVs. Este concepto está detallado en el Apéndice IV, y para su mejor comprensión se muestra en la Figura 3-19c una red idéntica a la mostrada en (b) pero con la instalación de una PRV en un nudo j cualquiera. La cantidad de energía disipada por la válvula, será el equivalente a la energía topográfica gestionable acumulada ($\Delta E_{tr,j}^m$) en ese nudo.

Por último, en sistemas de perfil irregular (Figura 3-19d), se tendrán los tres tipos de energía topográfica. Predominará una u otra en función del perfil, y de las necesidades de cada punto. En dicho sistema se identifica la cantidad de energía topográfica gestionable acumulada que tendría un nudo j cualquiera.

Como se ha visto en el punto 3-1.2 del presente capítulo, las fuentes de suministro pueden jugar un papel fundamental en la energía final que se introduce en el sistema. En redes de perfil similar, en función del tipo de fuente de suministro, se podrá realizar un tratamiento u otro de la energía topográfica. En la Figura 3-20 se detalla un sistema completamente plano con consumos distribuidos de manera uniforme con dos tipos de fuente de suministro diferentes, rígido en la izquierda y variable en la derecha. Se comparan tres estados de carga diferentes, plena carga o máxima demanda (a), carga parcial donde E_{uo} es menor que en el caso anterior (b), y plena carga supuesto el sistema ideal sin pérdidas por fricción (c).

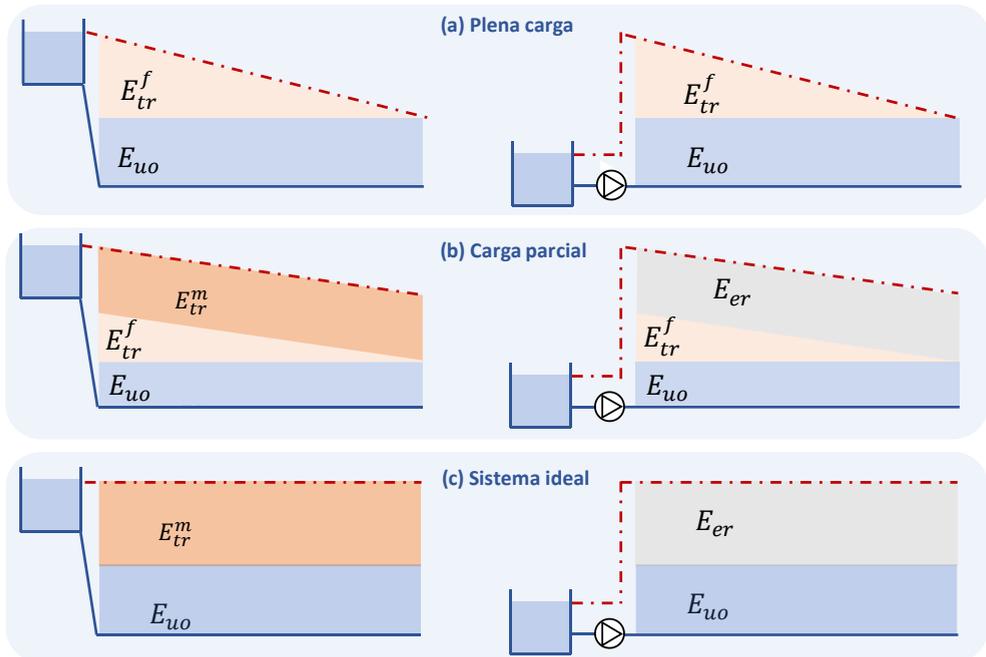


Figura 3-20: Red plana con fuentes de suministro rígidas (izquierda) y variables (derecha). Comparación de escenarios (a: plena carga, b: carga parcial, c: plena carga en sistema ideal).

De la figura anterior se concluye las siguientes afirmaciones, que refuerzan la importancia de seleccionar en fase de diseño el tipo de fuente de suministro, y como afecta a la caracterización energética de los sistemas:

- Cuando la fuente de alimentación es rígida, la energía de exceso E_{er} es nula, y su equivalente pasa a ser energía topográfica gestionable E_{tr}^m .
- En un sistema plano diseñado para satisfacer exactamente sus necesidades a plena carga (a), la energía topográfica está intrínsecamente ligada a la fricción, con independencia del tipo de fuente de suministro.
- En la situación de carga parcial sucede lo mismo, pero la consideración de la energía sobrante es diferente. Si la fuente es rígida, es una pérdida estructural que se puede gestionar, E_{tr}^m . Esta componente de energía topográfica viene provocada por la altura del depósito. Si la fuente es variable, la pérdida es un exceso operacional E_{er} que puede eliminarse regulando la fuente. A diferencia del caso con fuente rígida, esta

componente no tiene por qué darse, la gestión del equipo de bombeo determinará la aparición de este exceso.

- En el caso ideal sin fricción, con fuente de suministro rígida toda la energía topográfica es gestionable E_{tr}^m . Con fuente variable todo es energía en exceso E_{er} , es decir, una pérdida evitable regulando adecuadamente la estación de bombeo.

3-3.1. La herramienta ITA Topographic Energy Assessment

Tal como se explica en el punto 2.4 del Apéndice VI, se ha desarrollado la herramienta llamada “ITA Topographic Energy Assessment”, donde a partir de los caminos que lleva el agua evaluados con el modelo matemático del sistema, se calculan las variables que intervienen en el desglose de la energía topográfica. Esto permite conocer en cada nudo la cantidad de energía topográfica gestionable acumulada aguas abajo ($\Delta E_{tr,j}^m$), de manera que aquel nudo con mayor energía topográfica gestionable acumulada será el punto óptimo para colocar una válvula reductora de presión desde el punto de vista energético. La herramienta ofrece la presión de tarado necesaria en la válvula para que en el nudo más desfavorable exista en todo momento la presión de servicio.

Además del desglose de la energía topográfica, esta herramienta ofrece una auditoría energética sencilla de las pérdidas operacionales del sistema. Partiendo de los resultados del modelo matemático, se ofrece el desglose de las pérdidas energéticas operacionales, sin incluir las pérdidas en las fuentes de suministro, ya que se parte directamente desde la altura de suministro introducida en la red. Como particularidad de la auditoría realizada, se diferencia la cantidad de energía perdida en fugas debida al exceso de presión en cada nudo, y debido a la presión mínima de servicio. De esta manera se conoce detalladamente el fin de la energía suministrada en el sistema: que cantidad se invierte en la energía mínima requerida por los usuarios y que cantidad se invierte en las pérdidas energéticas estructurales y operacionales de la red.

Esta herramienta, desarrollada a partir de una hoja de cálculo, tiene diferentes fases de automatización:

- a) En la primera fase se obtienen los caminos que recorre el agua desde la fuente de suministro hasta los nudos de consumo. Para ello, la herramienta ejecuta el modelo matemático realizado en EPANET y ofrece todos los caminos que lleva el agua, tanto si la red es ramificada como si es mallada. Junto a todos los caminos, esta primera fase de cálculo identifica si la fuente de suministro es rígida o variable, la altura de suministro, el número de caminos totales y el número de nudos que incluye el camino más largo.
- b) En la segunda fase, se obtiene del modelo los valores necesarios para realizar el cálculo de la auditoría energética, y el desglose de las energías topográficas. Para ello es necesario definir la presión de servicio requerida en los nudos de consumo, y el número de horas en que se desea realizar el análisis. Los valores que se obtienen en esta fase de cálculo son: el identificativo de los nudos, la cota de cada uno de ellos, el volumen total saliente por cada nudo desglosado en volumen consumido y volumen fugado, y la presión de cada nudo. Además, para cada nudo, se obtiene la cota más elevada entre el nudo que se evalúa y los últimos nudos de cada camino al que pertenece el nudo de estudio. Del mismo modo, se obtiene la presión mínima entre el nudo de estudio y los últimos nudos de cada camino al que pertenece el nudo de estudio. Por último, se calcula el sumatorio de volúmenes aguas abajo del nudo de estudio, que permitirá, junto al resto de valores, obtener la energía topográfica acumulada aguas abajo de cada nudo del modelo, tal como se explica en el Apéndice IV.
- c) En la tercera y última fase del cálculo se realiza la auditoría energética, obteniendo las energías para cada nudo de manera particular, y los valores de la energía total del modelo para el período de tiempo estudiado. En esta última fase, la herramienta indica el nudo óptimo donde colocar la PRV y la presión de consigna necesaria para que en el nudo más desfavorable se cumpla la presión de servicio. Como datos complementarios al balance energético realizado se ofrece una serie de indicadores que permiten evaluar la eficiencia de las pérdidas energéticas estructurales, de esto se hablará más adelante, en el punto 3-4.1 de este capítulo.

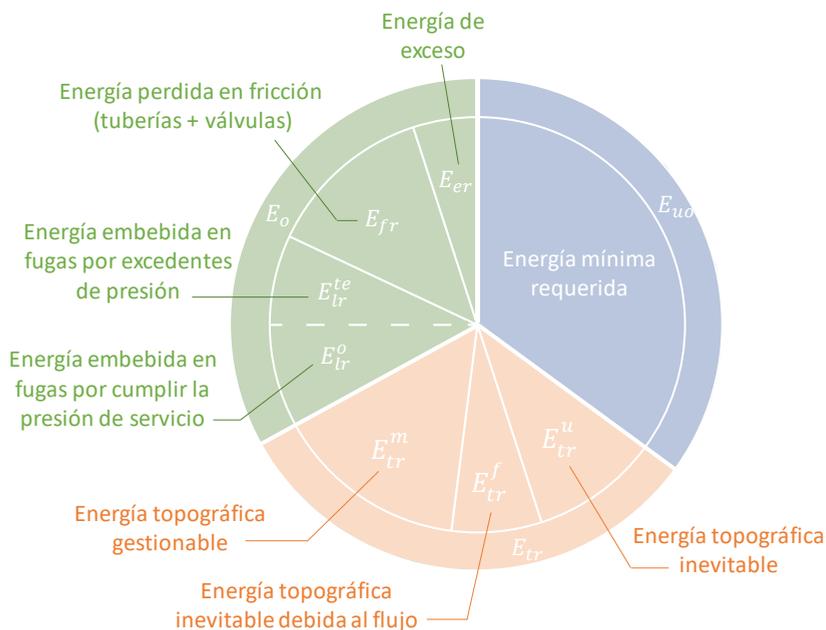


Figura 3-21: Auditoría energética de la herramienta “ITA Topographic Energy Assessment”

Aunque la herramienta realiza el cálculo tanto para el caso de redes ramificadas como para el caso de redes malladas. Hay que estudiar con detenimiento el resultado de la energía topográfica acumulada en las redes malladas, puesto que la instalación de PRVs puede alterar y modificar el recorrido del agua. En tal caso, existe la posibilidad de que el nudo que en un principio era el óptimo para la instalación de la PRV, pase a no serlo al cambiar los caminos del agua y por tanto cambiar la energía topográfica gestionable acumulada en cada nudo. Si esto sucede, el caudal que circula por la válvula será diferente al que se esperaba en un principio, cambiando la cantidad de energía disipada por la misma.

En el Apéndice IV se plantean dos casos prácticos en los que se realiza la auditoría energética de una red ramificada y de una red mallada, realizando el desglose energético de la energía topográfica y de las pérdidas operacionales en cada una de ellas. Una vez analizado el desglose energético, se instalan PRVs en los lugares óptimos con el objetivo de reducir la energía topográfica, y se analiza de nuevo el sistema comparando el escenario energético con PRVs y sin PRVs.

Las conclusiones tras la comparación de ambos escenarios, tanto en la red ramificada como en la red mallada, son las esperadas: la energía topográfica se reduce drásticamente al instalar las válvulas, pero no es una energía que deje de suministrarse al sistema, pues se convierte en energía disipada por fricción en válvulas. En el balance final, la energía suministrada total es ligeramente inferior tras la instalación de PRVs, ya que al disminuir la presión se reducen las fugas y por tanto el caudal suministrado total también se ve reducido. De ahí que esta medida para gestionar las pérdidas estructurales sea la última a estudiar en el diagrama de flujo, siendo más conveniente replantear la configuración de la red, o estudiar la instalación de elementos recuperadores de energía.

3-4. CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE DE AGUA A PRESIÓN

Tal como se ha visto en el punto 1.3, podemos diferenciar dos tipos de sistemas. Por un lado, los sistemas simples donde únicamente se transporta agua de un punto a otro, sin consumos intermedios. Por otro lado, sistemas complejos, que se corresponden con sistemas de distribución de agua urbana o riego, donde se debe cumplir unos estándares de presión y caudal en los diferentes puntos de consumo existentes.

En este apartado se proponen diferentes métodos para calificar los sistemas de transporte de agua a presión, en función de si son sistemas complejos con modelo matemático, o sistemas simples, ya sean por gravedad o por bombeo. Los sistemas complejos sin modelo matemático, se califican a partir del gráfico de la Figura 3-7 que se explica en el apartado “Diagnóstico rápido a partir del indicador Intensidad energética” del punto 3-2.1. Con este gráfico se ofrecerá una calificación de la A hasta la D, en base a las pérdidas energéticas estimadas. Para conocer en detalle cada una de las pérdidas, es necesario contar con el modelo matemático, a partir del cual se puede realizar la auditoría energética del sistema, y con sus resultados ofrecer una calificación como la que se explica en los siguientes apartados.

3-4.1. Calificación de sistemas complejos con modelo matemático

Una vez conocido el desglose completo y detallado de la energía consumida por el sistema mediante la auditoría energética, se debe analizar en profundidad cada uno de sus términos para decidir qué acciones de mejora llevar a cabo.

Para evaluar de manera completa un sistema de distribución de agua a presión, es necesario evaluar y calificar tanto las pérdidas energéticas operacionales como las estructurales. Tal como puede verse en el diagrama de flujo de la Figura 3-22, la primera calificación a realizar tras la auditoría energética será la correspondiente a las pérdidas energéticas estructurales. En función de su resultado, se plantearán diferentes medidas, estudiando en primer lugar el rediseño del sistema para reducir la energía topográfica, y posteriormente la recuperación y disipación de la energía, como se ha visto en el apartado anterior.

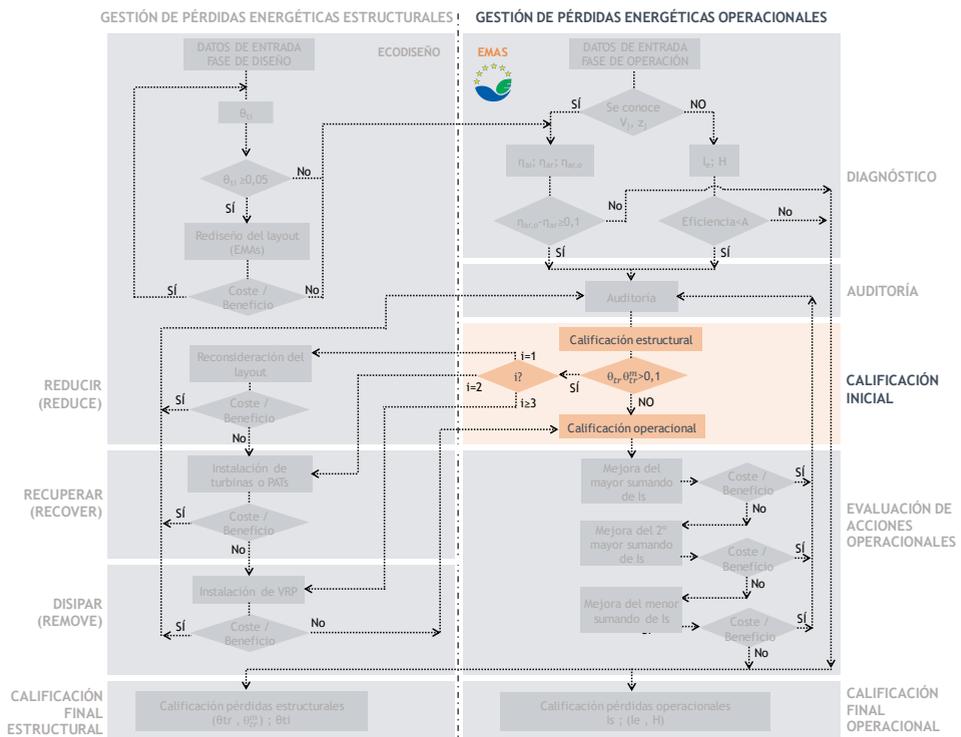


Figura 3-22: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Calificación inicial de pérdidas.

Una vez estudiadas, y en su caso implementadas, las medidas estructurales, se realizará la evaluación de las pérdidas energéticas operacionales, para decidir las acciones de mejora a llevar a cabo.

Aunque se diferencia la calificación de los dos tipos de pérdidas, estructurales y operacionales, unas están relacionadas con las otras. Cualquier medida estructural que afecte al caudal total inyectado, afectará al valor final de las pérdidas operacionales. Del mismo modo, los cambios realizados con las medidas operacionales, afectarán a las variables de caudal y presión en el sistema, lo que afectará a la energía topográfica final. Por esta razón, no se plantea la calificación energética operacional y estructural en paralelo, sino que se prioriza el estudio de las acciones estructurales a llevar a cabo, antes de acometer la calificación operacional y evaluar sus medidas.

En este apartado, se plantea un sistema de indicadores que permiten evaluar energéticamente los sistemas de transporte de agua a presión desde el punto de vista estructural y operacional. Para ello se parte de los resultados obtenidos en la auditoría energética, siendo necesario contar con el modelo matemático del sistema.

En el caso de las pérdidas estructurales, el análisis de la cantidad de energía topográfica gestionable es clave. En el caso de las pérdidas operacionales, el margen de mejora de cada una de las pérdidas operacionales, será esencial en la calificación de la red desde el punto de vista operacional, así como en la priorización de medidas a llevar a cabo.

Calificación de las pérdidas estructurales: θ_{tr} y θ_{tr}^m .

En el Apéndice III y en el Apéndice IV se proponen tres indicadores que recogen las principales variables que afectan a la energía topográfica. Se resumen a continuación:

- El indicador de procedencia de la energía (C_1), evalúa el peso de la energía natural respecto al total de energía suministrada, ofreciendo información de la contribución energética de las fuentes de suministro en función de si tiene una mayor relevancia la energía por bombeo o la energía natural. Es un indicador informativo que permite conocer el tipo de energía suministrado desde las fuentes.

- El indicador de energía topográfica (θ_{tr}) representa la cantidad de energía topográfica respecto al total de energía suministrada en el sistema. Este indicador ofrece información relevante sobre la importancia de la energía topográfica en la red, ya que, cuanto mayor sea este indicador, mayor representación tendrá la energía topográfica en el sistema.
- La información del anterior indicador debe ser completada con el indicador de energía topográfica gestionable (θ_{tr}^m). Este indicador representa la cantidad de energía topográfica que puede ser gestionada respecto del total de energía topográfica existente.

Si el valor del indicador θ_{tr} es elevado y θ_{tr}^m se aproxima a cero, no se podrán realizar mejoras considerables en las pérdidas energéticas estructurales sin actuar sobre el trazado del sistema, puesto que, a pesar de que existe una gran cantidad de energía topográfica, la parte de esta energía topográfica que se puede gestionar será irrelevante. Basado en esto, se propone el gráfico de la Figura 3-23 que permite calificar las pérdidas energéticas estructurales a partir de analizar cada uno de estos dos indicadores, θ_{tr} y θ_{tr}^m .

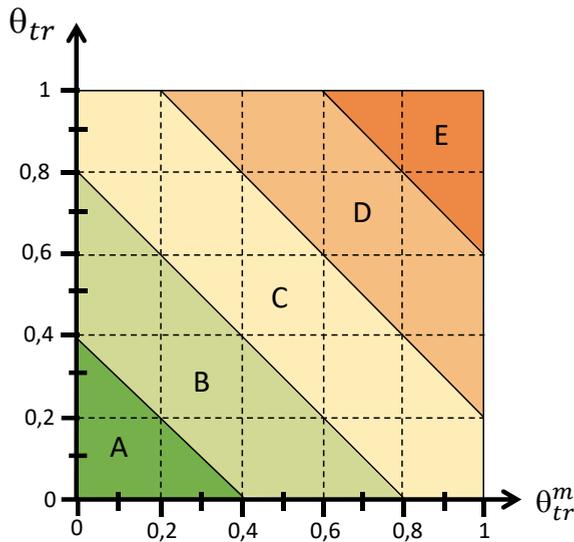


Figura 3-23: Calificación de las pérdidas energéticas estructurales

En la calificación propuesta se plantean 5 niveles energéticos, de la A (excelente) a la E (inaceptable). Se penaliza aquella componente de la energía topográfica que sea gestionable, tanto más cuanto mayor sea el peso de la energía topográfica sobre el total suministrada. De esta manera, cuando θ_{tr} y θ_{tr}^m tengan un valor elevado, la calificación de las pérdidas energéticas estructurales será peor (cercana a E). En el lado opuesto, cuando ambos indicadores sean pequeños, la calificación será excelente (cercana a la zona A).

La zona A está reservada a sistemas con una componente topográfica pequeñas, cuya parte gestionable es poco importante. En este límite será habitual encontrar redes predominantemente planas, donde la parte estructural pierde importancia frente a la operacional. Conforme aumenta el peso de la energía topográfica y el peso de su parte gestionable, la calificación empeora, llegando a la zona E, donde la energía topográfica representará porcentajes por encima del 60% del total de energía suministrada, siendo de este 60% prácticamente la totalidad gestionable. En esta parte del gráfico se podrán encontrar redes con mucho desnivel que provoca grandes sobrepresiones en las zonas bajas.

Cuando el valor de multiplicar ambos indicadores, θ_{tr} y θ_{tr}^m , sea inferior a 0,1, las pérdidas estructurales se corresponderán con niveles de calificación A y B. En tal caso, las pérdidas estructurales tendrán una calificación aceptable, y no serán objeto de revisión en el proceso de mejora energética, pasando a calificarse las pérdidas energéticas operacionales, tal como aparece en el diagrama de flujo de la Figura 3-22.

En el caso de estudio 1 propuesto en el Apéndice IV, la calificación de las pérdidas estructurales recae en la zona C, con un valor de $\theta_{tr}=0,2$ y $\theta_{tr}^m=0,86$. En este ejemplo de red ramificada, aunque la energía topográfica únicamente representa el 20% de la energía total suministrada, de ese 20% se puede gestionar el 86%, por lo que la calificación no es aceptable, siendo la multiplicación de ambos indicadores de 0,172, superior al 0,1 estipulado como aceptable.

La primera acción de mejora a evaluar es el rediseño del sistema, cuyo análisis coste/beneficio es desfavorable, pasando a la segunda acción a evaluar: la implementación de elementos recuperadores de energía. Esta acción también es desfavorable, por lo que se estudió la última medida para la mejora de las pérdidas

estructurales, la instalación de válvulas reductoras de presión PRVs, cuyo estudio de viabilidad sí que es positivo.

Tras la implementación de PRVs en la red, la calificación pasa a ser de B, representando la energía topográfica un 7% sobre el total de energía suministrada, de la cual se puede gestionar el 58%. En este escenario final, al multiplicar ambos indicadores, el valor es de 0,04, recayendo en una zona calificada como B. En la Figura 3-24 (izquierda) se puede ver como el punto que permite calificar las pérdidas energéticas estructurales de este ejemplo, pasa de una zona C antes de instalar las válvulas, a una zona B después de su instalación.

Siguiendo un proceso similar, en el caso de estudio 2 del Apéndice IV, el escenario inicial califica las pérdidas estructurales con una C, siendo el valor de $\theta_{tr}=0,33$ y $\theta_{tr}^m=0,73$, lo que supone una multiplicación de 0,24, bastante lejano del 0,1 considerado como válido. Tras el análisis de acciones de mejora, en este caso la única opción viable también fue la instalación de PRVs. Tras su implementación, la calificación de las pérdidas energéticas estructurales pasó a ser de B, con un valor de $\theta_{tr}=0,19$ y $\theta_{tr}^m=0,49$, lo que supone una multiplicación de 0,09, inferior al 0,1 estipulado como aceptable, Figura 3-24 (derecha), por lo tanto no es necesario volver a repetir el proceso de evaluación de acciones de mejora.

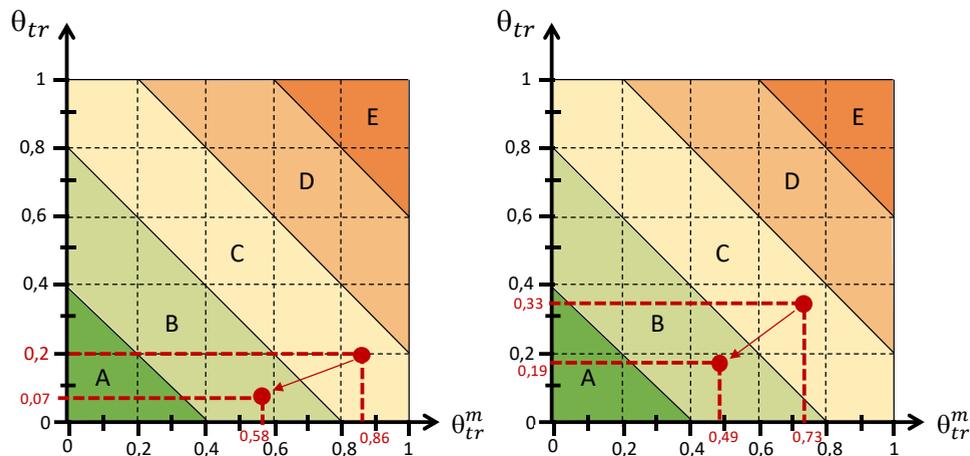


Figura 3-24: Calificación de las pérdidas energéticas estructurales del caso de estudio 1 (izquierda) y 2 (derecha) del Apéndice IV

Calificación de las pérdidas operacionales: Índice energético global (I_S)

Tras realizar la calificación estructural inicial y el estudio de sus correspondientes mejoras a aplicar, se planteará una primera calificación de las pérdidas energéticas operacionales. El escenario de estudio contemplará ya las medidas de gestión estructurales llevadas a cabo, y en función del resultado de la calificación de pérdidas operacionales se plantearán sus respectivas acciones de mejora.

Para calificar las pérdidas energéticas operacionales, se propone en el artículo presentado en el Apéndice V el índice energético global (I_S) que relaciona cada pérdida energética operacional con su correspondiente nivel de referencia a alcanzar, ponderando esta relación en función del peso que tiene cada pérdida energética a alcanzar respecto al total de pérdidas energéticas alcanzables ($E_{o,e}$), tal como aparece en la siguiente ecuación:

$$I_S = \frac{E_{rl}}{E_{l,e}} \frac{E_{l,e}}{E_{o,e}} + \frac{E_{rf}}{E_{f,e}} \frac{E_{f,e}}{E_{o,e}} + \frac{E_{rp}}{E_{p,e}} \frac{E_{p,e}}{E_{o,e}} = \frac{E_{rl}}{E_{l,e}} \gamma_l + \frac{E_{rf}}{E_{f,e}} \gamma_f + \frac{E_{rp}}{E_{p,e}} \gamma_p \quad (3-21)$$

Siendo γ_l , γ_f y γ_p el factor ponderador de las pérdidas por fugas, fricción y en bombas respectivamente. El valor óptimo de este indicador es la unidad, ya que con $I_S = 1$ cada una de las pérdidas energéticas operacionales será igual a su valor de referencia alcanzable. En el lado opuesto, cuanto mayor sea este indicador, peor será la calificación de la eficiencia energética operacional del sistema, ya que se tendrán pérdidas energéticas lejanas a los valores de referencia a lograr.

Una vez realizada la auditoría energética, se realizará una calificación inicial energética de las pérdidas operacionales mediante el índice energético global (I_S), tal como aparece en el bloque "calificación inicial" del diagrama de flujo (Figura 3-25).

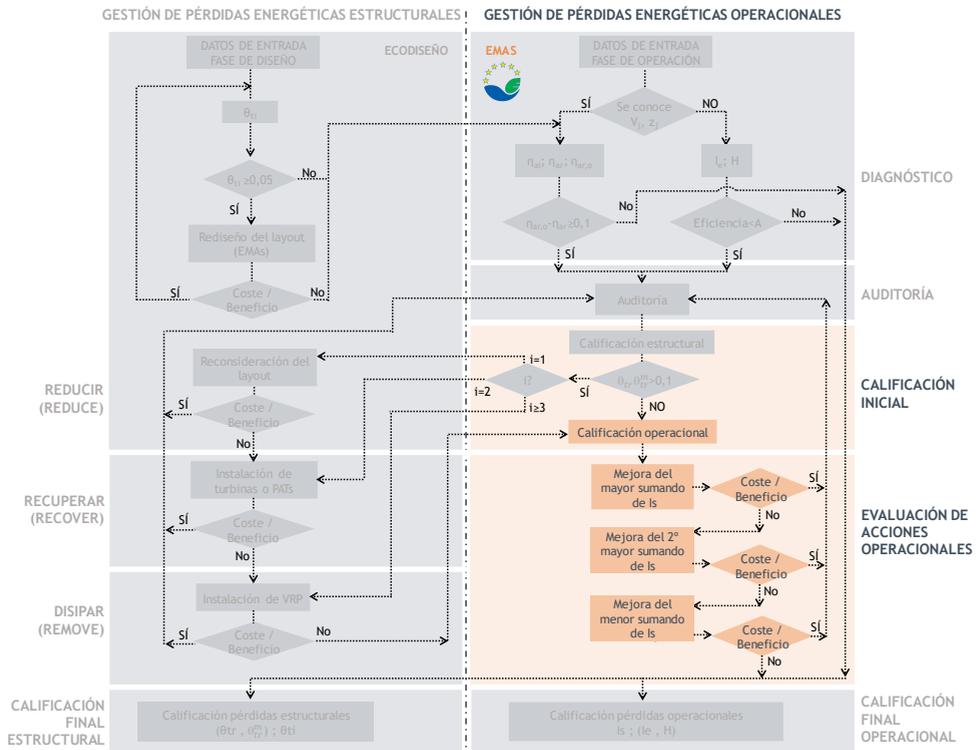


Figura 3-25: Diagrama de flujo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión. Fase de evaluación energética (calificación inicial)

Como puede verse en la ecuación (3-21), el indicador I_S es suma de tres componentes diferentes, las cuales se corresponden con cada una de las pérdidas energéticas operacionales. De entre los tres sumandos, aquel que tenga un mayor valor, y que por tanto contribuya en mayor medida al valor final del índice, representará la pérdida energética operacional que en primer lugar debe evaluarse a la hora de plantear acciones de mejora. Este sumando indica que la mejora de esta pérdida será la que mayor efecto tendrá en la mejora de la eficiencia de las pérdidas operacionales, ya sea por tener un mayor margen de mejora, por representar un mayor peso sobre el total de pérdidas energéticas operacionales a alcanzar, o por ambos motivos.

El índice I_S se volverá a calcular una vez finalizado el proceso de mejora energética, con la intención de comparar la calificación inicial, con la calificación final y así conocer la mejora energética del sistema a través de este índice.

Tal como se aprecia en la Figura 3-26, con la herramienta “ITA Energy network labelling” se automatiza la obtención del índice energético global. Este apartado de la herramienta, recoge los datos de la auditoría energética, y de los niveles de referencia previamente calculados con la propia herramienta. Con esta información se calcula el índice I_S y se muestra el desglose de cada uno de los términos, lo que permitirá priorizar las alternativas de mejora a llevar a cabo.

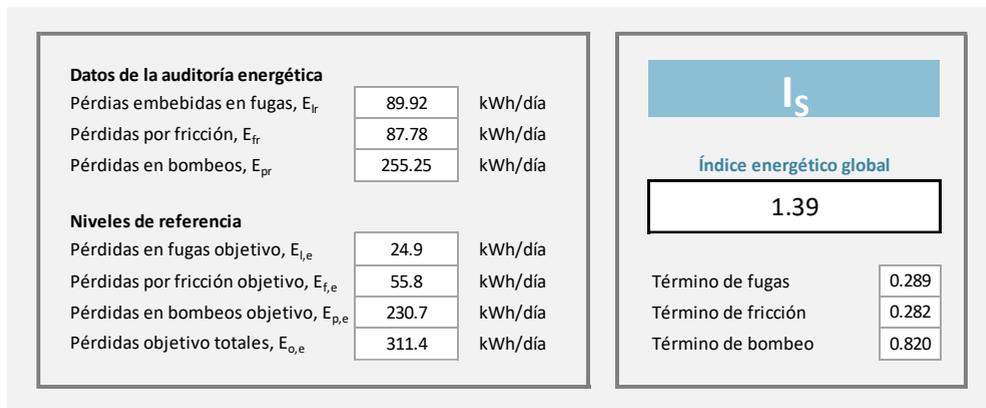


Figura 3-26: Cálculo del índice energético global con la herramienta “ITA Energy network labelling”

En el punto 4 del Apéndice V se plantea un caso práctico en el que se evalúa la eficiencia energética del sistema mediante el indicador I_S . En este ejemplo, se puede ver como la energía embebida en fugas tiene un gran margen de mejora, triplicando el valor de referencia alcanzable. En cambio, esta pérdida representa únicamente un 8% respecto al total de pérdidas energéticas operacionales alcanzables, contribuyendo con un valor de 0,289 al índice energético global I_S . En cambio, la energía perdida en bombas, pese a tener un margen de mejora mucho más reducido, únicamente del 11%, al representar el 74% de las pérdidas energéticas operacionales alcanzables, contribuye al índice energético global con un valor de 0,821. Esto indica que una mejora en la estación de bombeo tendrá mayor repercusión en la mejora de la eficiencia energética del sistema, frente a una mejora de similar entidad en el resto de pérdidas.

Para comprobar esto, se han estudiado tres escenarios diferentes sobre el caso práctico del Apéndice V. En cada escenario se ha reducido un 10% una de las pérdidas energéticas operacionales, manteniendo el resto de pérdidas energéticas con el mismo valor que al inicio. El índice energético global sufre una mejora mayor en el escenario donde se reduce un 10% las pérdidas energéticas en el bombeo, mientras que la mejora energética es inferior en los otros dos escenarios, donde se ha reducido un 10% las pérdidas energéticas por fricción y fugas. En conclusión, en este caso, las pérdidas en la estación de bombeo es el sumando que más contribuye al índice I_S , y por tanto la primera actuación que se debería estudiar.

Calificación final del sistema

Tras cada acción de mejora operacional planteada, y siendo favorable su correspondiente análisis coste/beneficio, se procederá a realizar de nuevo la auditoría energética, y los pasos posteriores en el diagrama de flujo. Se realizará tantas iteraciones como sean necesarias hasta que el estudio económico de las posibles acciones de mejora planteadas sea negativo, es decir, que ya no resulte rentable acometer cambios en el sistema. Este será el punto en el que mejorar energéticamente el sistema, no será rentable desde un punto de vista económico, puesto que el coste de las medidas a implementar será más elevado que asumir el peaje energético a pagar por contar con estas ineficiencias. Llegados aquí, se propondrá una calificación final de pérdidas energéticas operacionales y estructurales (Figura 3-27), siendo esta la última fase del protocolo de actuación de mejora energética.

energéticas en el sistema. En tal caso, se planteará una calificación final de las pérdidas operacionales, en función de la relación entre la intensidad energética y la altura de suministro. Mientras que las pérdidas estructurales se calificarán mediante el valor del indicador estimado de energía topográfica ideal θ_{ti} .

3-4.2. Calificación de sistemas simples

Como se ha visto en el punto 3-1.3, se consideran sistemas simples aquellos cuyo abastecimiento se realiza mediante una tubería que parte de un punto de suministro y llega a un punto de abastecimiento, ambos sin requisitos de presión a satisfacer. Estos sistemas simples se clasifican en función de la fuente de suministro como sistemas por bombeo o por gravedad, tal como se ha visto en la Figura 3-3.

Son sistemas con un elevado rendimiento hídrico, sin apenas fugas, por lo que la pendiente hidráulica tiene un papel fundamental en las ineficiencias energéticas del sistema, más aún en sistemas por gravedad cuya ineficiencia energética únicamente es la de fricción al considerar las fugas inexistentes.

Sistemas simples por bombeo

En sistemas simples por bombeo, interviene el rendimiento de la estación de bombeo como ineficiencia energética, junto a las pérdidas energéticas por fricción. En tal caso, se puede evaluar la eficiencia del sistema a partir de la relación existente entre el indicador intensidad energética y la altura de suministro vista en la Figura 3-7, pero considerando que no existen fugas, siendo el rendimiento hidráulico igual a 1. De esta manera, los límites de eficiencia únicamente dependerán del rendimiento de la bomba, siendo una propuesta la que aparece en la siguiente imagen:

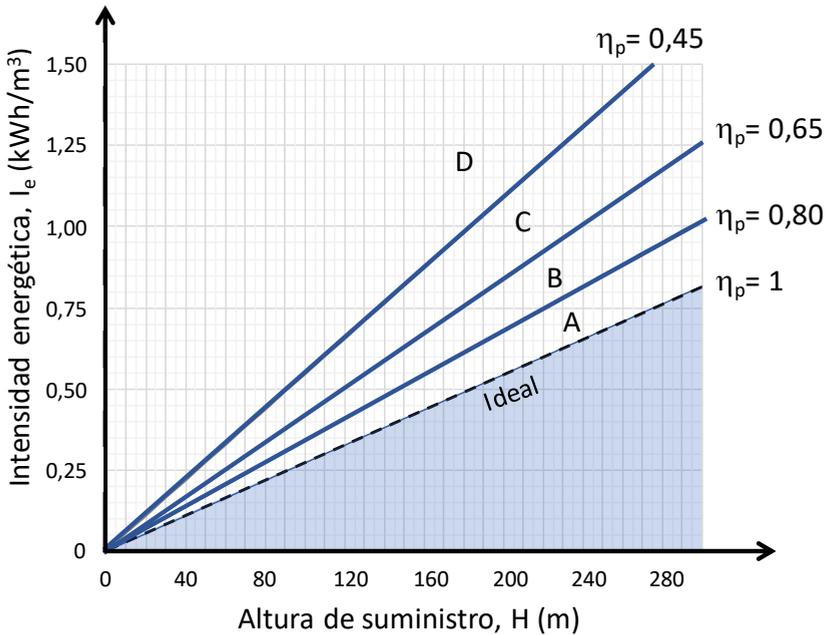


Figura 3-28: Calificación de la eficiencia energética del transporte de agua a presión en sistemas simples por bombeo

Para evaluar las pérdidas energéticas por fricción en sistemas simples por bombeo, se presenta en el punto 2 del Apéndice III el indicador de pérdidas por fricción w_f que relaciona las pérdidas por fricción existentes en el sistema, con las pérdidas de fricción objetivo calculadas a partir de la pendiente hidráulica media óptima J_o y de la longitud de la red:

$$w_f = \frac{h_f}{J_o(L + L_e)} \quad (3-22)$$

Valores de este indicador por encima de 1 reflejan un infradimensionado en las tuberías, con diámetros demasiado pequeños que contribuyen a una gran pérdida de carga por fricción en el sistema. Por el contrario, valores de este indicador cercanos a 0, indican un sobredimensionado de los tubos, con pérdidas de carga por debajo de las óptimas debido a diámetros elevados. Si el diseño de los tubos se

realiza siguiendo el criterio de la pendiente hidráulica óptima, el valor de este indicador deberá ser próximo a 1.

En el ejemplo 6.1 del Apéndice III se evalúa las pérdidas por fricción de un sistema por bombeo simple, aunque este indicador es extrapolable a cualquier tipo de sistema.

Sistemas simples por gravedad

Los sistemas simples por gravedad se clasifican en tres tipologías diferentes en función de si la instalación contempla o no algún elemento recuperador o disipador de energía, tal como se vio en el punto 3-1.3, y como se aprecia en la siguiente imagen:

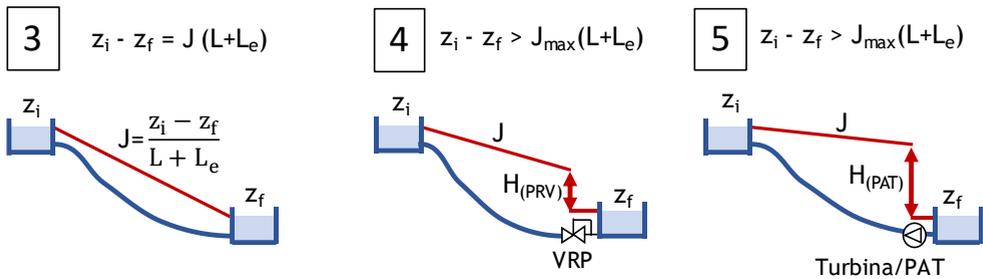


Figura 3-29: Clasificación de sistemas simples por gravedad en fase de explotación

En los casos 4 y 5 de esta clasificación, la pendiente hidráulica de diseño definida dará lugar a una determinada caída de presión de diseño provocada en el caso 4 por la PRV ($H_{d(PR\ V)}$), y a una altura de recuperación de energía en el caso 5 realizada a través de turbinas o PATs ($H_{d(PAT)}$).

Para evaluar este tipo de sistemas simples por gravedad, en el artículo del Apéndice III, se desarrolla el indicador de eficiencia global del sistema (η_{GL}), el cual evalúa la eficiencia del sistema comparando la altura de diseño que debería existir en la PRV, o en la turbina, con la altura realmente existente en estos elementos en su fase de explotación.

$$\eta_{GL} = 1 - \frac{|H_{d(PRV)} - H_{(PRV)}|}{H_{d(PRV)}} ; \eta_{GL} = 1 - \frac{|H_{d(PAT)} - H_{(PAT)}|}{H_{d(PAT)}} \quad (3-23)$$

En el caso 3 de la clasificación anterior, donde una tubería une la fuente de suministro con el punto de llegada, la pendiente hidráulica no puede sufrir variaciones, pues será la correspondiente a unir las dos láminas de agua. En tal caso, la pendiente hidráulica de diseño corresponderá con la pendiente en fase de funcionamiento, siendo la eficiencia global del sistema (η_{GL}) igual a 1.

En el Apéndice III se proponen cuatro niveles de clasificación de la eficiencia energética de los sistemas simples por gravedad. Desde A cuya eficiencia sería excelente y se correspondería a $\eta_{GL} \geq 0,80$, hasta D cuya eficiencia sería inaceptable con valores $\eta_{GL} < 0,40$, tal como puede verse en la tabla siguiente:

Tabla 3-4: Niveles de eficiencia de sistemas simples por gravedad

Eficiencia global del sistema	Nivel de eficiencia
$\eta_{GL} \geq 0,80$	A (excelente)
$0,80 > \eta_{GL} \geq 0,60$	B (razonable)
$0,60 > \eta_{GL} \geq 0,40$	C (insatisfactorio)
$\eta_{GL} < 0,40$	D (inaceptable)

Capítulo 4

Conclusiones y desarrollos futuros

En este trabajo se ha desarrollado un protocolo para minimizar los requerimientos energéticos en redes de agua a presión y las consideraciones a tener en cuenta en las diferentes etapas de éste. El protocolo contempla la mejora energética de las redes, tanto en su fase de diseño como de operación, minimizando las pérdidas energéticas operacionales y estructurales, y calificando los sistemas en función de éstas. En el presente capítulo se subrayan las principales conclusiones de la tesis y la evolución futura del análisis energético de las redes de agua a presión.

4-1. CONCLUSIONES

Los sistemas de distribución de agua a presión son grandes demandantes de energía, razón suficiente para establecer una ruta a seguir que permita reducir de

manera general el consumo de energía de la instalación, garantizando en todo momento el suministro bajo los estándares de calidad establecidos.

El trabajo presentado en esta tesis sigue de forma natural una línea de investigación desarrollada en los últimos años, dando continuidad a trabajos previos realizados que han servido de base para poder completar el protocolo de actuación presentado. Algunos de los conceptos expuestos ya habían sido publicados antes del inicio de la tesis, y no se han detallado, sólo referenciado, tal como sucede con el diagnóstico del sistema, la auditoría energética o la definición de cada una de las pérdidas que intervienen en el transporte de agua a presión.

Las aportaciones nuevas se han concretado a lo largo del capítulo 3, y se han publicado durante el desarrollo de la tesis. Aspectos como la división de las pérdidas energéticas en estructurales y operacionales; la relevancia de tener en cuenta las pérdidas estructurales en la fase de diseño; el desarrollo de un diagnóstico con el que poder hacer un primer análisis energético del sistema si no se tienen apenas datos; los indicadores que permiten calificar el comportamiento energético del sistema desde el punto de vista estructural y operacional; el desglose de las diferentes pérdidas energéticas estructurales y, cómo no, la creación del protocolo de actuación que permite ordenar y establecer los pasos a seguir para minimizar el gasto energético de los sistemas de agua a presión. Por otro lado, algunas herramientas desarrolladas con anterioridad han sido utilizadas y mejoradas, como no podía ser de otra forma, ya que forman parte del protocolo propuesto. Otras se han desarrollado a lo largo de este trabajo, tales como “ITA topographic energy assessment” e “ITA energy network labelling”.

En este apartado se incluyen las ideas principales de la tesis y de cada una de las fases del protocolo de actuación descrito en el capítulo anterior. Se comentan aspectos como la visión global del estado energético de las redes de agua a presión que se ha presentado, la importancia del diseño, el análisis energético realizado a través del diagnóstico y auditoría, la relevancia de estudiar las pérdidas energéticas estructurales y operacionales, y la calificación energética de los sistemas.

Análisis energético global del transporte de agua a presión

Las fases del protocolo establecido en este trabajo tratan de reducir al mínimo posible los requisitos energéticos del transporte de agua a presión, desde una

perspectiva global del estado energético del sistema, y no centrándose únicamente en el análisis específico de un tipo de pérdida concreta. Muchos de los manuales de mejora energética en el transporte de agua a presión, focalizan sus esfuerzos en la mejora de la estación de bombeo (Inter-American Development Bank, 2011; AWWA, 2016b). De esta manera, algunas de las prácticas más habituales para la mejora de la eficiencia energética, se centran en estudiar en profundidad los bombeos: análisis de las curvas características y de rendimiento, regulación de la estación de bombeo siguiendo la curva de consigna, optimización de contratos eléctricos...

No obstante, aunque es común que las bombas representen una importante cantidad de las pérdidas energéticas, es importante tener una visión global del sistema, una visión de conjunto que permita conocer la importancia de cada una de las pérdidas energéticas, y su repercusión en el sistema. El objetivo es maximizar la eficiencia energética, igualando tanto como sea posible la energía mínima requerida con la energía suministrada. Para ello, es necesario conocer la repercusión del diseño de la instalación en las ineficiencias energéticas del sistema, es decir, contabilizar las pérdidas energéticas estructurales. Del mismo modo que es necesario conocer cada una de las pérdidas operacionales, y no centrarse únicamente en el estudio y análisis de pérdidas puntuales como las que se producen en la estación de bombeo, o en cualquier otro elemento particular de la red.

Los diseños tradicionales, donde es común bombear el agua desde una cota baja hasta un depósito de almacenamiento situado a cota elevada para posteriormente abastecer por gravedad, potencian que gran parte de la energía inyectada en la red no sea necesaria, siendo habitual tener que disipar parte del excedente energético con PRVs.

Una visión global del sistema permite detectar y valorar diseños ineficientes, sin centrarse en el análisis único de la estación de bombeo, o de una pérdida en particular. Un análisis exhaustivo de una pérdida concreta, como se suele realizar con las estaciones de bombeo, puede llevar a reducir considerablemente dicha pérdida. No obstante, si el diseño es ineficiente, o existen pérdidas de mayor repercusión, el conjunto de la red puede que no mejore sustancialmente su eficiencia. Un análisis de conjunto permite evitar esto.

El diagrama de flujo propuesto analiza el sistema con una visión general de conjunto. Esto permite actuar directamente en aquellas pérdidas energéticas de mayor relevancia en el sistema, siendo esta una concepción nueva en la gestión y análisis del transporte de agua a presión desde el punto de vista energético.

El diseño de las redes de agua

En las diferentes etapas que se han visto, se prioriza con criterios económicos y de gestión el evitar tanto como sea posible aquella energía que no sea estrictamente necesaria. Se comienza por la concepción de la red, con un diseño que minimice el efecto de la topografía, decidiendo el tipo de fuente de suministro y los posibles sectores a establecer en el sistema siguiendo criterios energéticos. La sectorización permitirá gestionar mejor la presión de la red, las fugas y pérdidas aparentes, así como minimizar el gasto energético.

El objetivo es que, desde los puntos de suministro, se abastezca de manera que se adecue el suministro realizado a las condiciones de consumo de cada zona, ajustando la energía consumida a la energía mínima requerida. Estos son los objetivos principales de las áreas de gestión energéticas (EMAs). El estudio de estas posibilidades en la fase de diseño de la red, permitirá minimizar la energía consumida por el sistema en su fase de funcionamiento, principalmente debido a la disminución de las pérdidas estructurales, la primera de las tres erres: Reduce.

Diagnóstico y auditoría

El primer paso para mejorar energéticamente una red en funcionamiento debe ser el análisis de la misma. Un diagnóstico inicial permitirá conocer el estado del sistema, y determinará si existe la necesidad de realizar un análisis más específico que permita conocer en detalle la energía consumida por la red, es decir, la necesidad de acometer una auditoría energética.

En función de la información disponible de la instalación, el procedimiento a seguir para realizar el análisis energético será diferente. En este trabajo se han propuesto diferentes métodos para realizar un primer análisis energético que permita diagnosticar la situación del sistema, en función de la cantidad y la calidad de los datos de los que se disponga. Este primer diagnóstico, realizado en la fase de funcionamiento, establecerá si energéticamente la red tiene un margen de mejora

considerable. En tal caso, se llevará a cabo la auditoría energética, que requiere del modelo matemático de la red, para conocer de manera detallada el destino de la energía entrante al sistema.

Pérdidas energéticas estructurales y operacionales

Conocidas las ineficiencias existentes en la fase de funcionamiento de la instalación, se buscará gestionar la red de la manera más eficiente posible, buscando una gestión que disminuya tanto la energía suministrada al sistema, como el recurso perdido a través de las fugas. Para ello, juega un papel importante las pérdidas estructurales de la red, por lo que en primer lugar se evaluará la posibilidad de modificar el layout del sistema. En caso de no ser viable esta alternativa, se estudiará la posibilidad de recuperar la energía topográfica gestionable mediante turbinas o PATs. Como última opción se evaluará la conveniencia de instalar válvulas reductoras de presión que disipen el exceso de presión del sistema. El punto con mayor energía topográfica gestionable acumulada será en el que se recupere o disipe el máximo de energía posible, cumpliendo los estándares de calidad del servicio.

La instalación de PRVs conllevará una reducción del volumen fugado de agua, pero no tendrá una gran repercusión en la reducción de la energía consumida por la instalación, puesto que la energía topográfica pasará a ser energía perdida en las válvulas. No obstante, al reducirse el volumen de agua fugado se reducirá la energía embebida en fugas. La reducción de las fugas se traduce en una reducción del volumen total de agua que circula por la instalación, por lo que las pérdidas por fricción en tuberías también cambiarán, al igual que lo hará el punto de funcionamiento de las bombas al tener que impulsar un menor caudal, afectando este cambio al rendimiento de la bomba, y por tanto a la energía perdida en la estación de bombeo. Todas las energías están interconectadas a través de las variables de altura y caudal.

Tras el estudio de mejora de las pérdidas energéticas estructurales, se evalúan las pérdidas energéticas operacionales y sus correspondientes acciones de mejora: pérdidas embebidas en fugas, pérdidas por fricción y pérdidas en la estación de bombeo.

Calificación de las redes

Las acciones de mejora a llevar a cabo, vendrán definidas a partir de una serie de indicadores que se han desarrollado a lo largo del trabajo. Si el diagnóstico de la red ofrece como resultado que no existe un margen de mejora energético suficiente como para realizar la auditoría energética y estudiar acciones para aumentar la eficiencia, se ofrecerá directamente una calificación final estructural y operacional de la red. La calificación estructural vendrá dada por el valor del indicador de energía topográfica ideal θ_{ti} , mientras que la calificación operacional dependerá de la relación entre la intensidad energética I_e y la altura de suministro H .

Si por el contrario, el diagnóstico da como resultado un margen de mejora considerable, se realizará la auditoría energética, y tras ésta, los indicadores de energía topográfica θ_{tr} y energía topográfica gestionable θ_{tr}^m ofrecerán una primera calificación energética de las pérdidas estructurales. En función de su resultado, se evaluarán diferentes acciones de mejora estructurales o se pasará a evaluar las pérdidas operacionales.

De manera similar, para comenzar con el análisis de las pérdidas operacionales, se realiza una primera calificación de éstas a partir del índice energético global I_G . El análisis de los tres sumandos de este indicador permitirá conocer que pérdida operacional debería ser la primera a evaluar.

Una vez analizadas y evaluadas las pérdidas energéticas estructurales y operacionales, y sus acciones de mejora correspondientes, se realizará una calificación final del sistema desde el punto de vista estructural y operacional. Comparando esta calificación final, con la calificación inicial de cada una de las pérdidas, se conocerá la mejora energética conseguida.

4-2. DESARROLLOS FUTUROS

El diagrama presentado en este trabajo para mejorar la eficiencia energética de las redes de agua a presión, establece las bases de los pasos a seguir para minimizar la energía en los sistemas. No obstante, este campo de trabajo está en constante

evolución, los trabajos futuros permitirán mejorar, adaptar y facilitar el proceso desarrollado.

En este apartado se incluyen desarrollos futuros a tener en cuenta para continuar con la mejora energética de las redes de distribución de agua a presión. Algunas de estas ideas ya se han comenzado a desarrollar, y otras requieren la implicación de varios agentes y un lapso de tiempo considerable para su implementación.

Indicadores energéticos estandarizados

La intensidad energética es un indicador extensamente utilizado para caracterizar las exigencias en el sector del agua desde el punto de vista de la energía. Existe mucha información sobre este indicador en sistemas urbanos y de riego, pero la información energética que arroja al relacionar la energía con el volumen de agua, debe ir acompañada de otros datos que permitan caracterizar las circunstancias de cada red, en caso contrario, su información no será completa.

Por ello, este indicador debe ir acompañado de otros indicadores de contexto para completar la caracterización energética del sistema, ya que hay dos características que por sí mismo no contempla: la energía topográfica y la procedencia de la energía. Con estos dos indicadores de contexto, el valor de la intensidad energética se contextualiza conociendo los desniveles del terreno y el tipo de aporte, es decir, el aporte energético que se realiza de manera natural, y el aporte por bombeo. Se ha desarrollado un artículo que define el marco físico de aplicación del indicador intensidad energética, de manera que este indicador permita reproducir la realidad física del transporte y distribución de agua y pueda ser utilizado en procesos comparativos y de benchmarking. De este modo se pretende estandarizar el cálculo de la intensidad energética, que, junto a los dos indicadores de contexto, permitirá comparar la eficiencia energética entre distintos sistemas de distribución de agua. Esto puede ser especialmente útil para la implementación de este indicador por reguladores de servicios de agua.

Estos indicadores podrían ser de uso universal para caracterizar energéticamente los sistemas ya que incluyen todos los factores de los que depende el gasto energético. En total se han identificado ocho factores: tres dependientes de las características físicas del sistema, dos dependientes de las características del servicio y tres factores dependientes de las ineficiencias operacionales

Aplicación a diferentes tipos de redes

Cada fase del protocolo presentado se ha aplicado a redes con diferentes características: sistemas complejos de riego y urbanos, sistemas simples, redes ramificadas y redes malladas, sistemas con pocos datos, otros con información muy precisa... Aplicar el protocolo completo, y no a fases concretas del mismo, en diferentes tipos de redes permitirá completar y mejorar cada uno de los pasos.

Sería idóneo poder aplicar de manera completa el protocolo en múltiples redes, para ello es necesario contar con abastecimientos que estén dispuestos a mejorar su eficiencia energética. La variabilidad de abastecimiento permitirá aplicar el protocolo a redes con diferentes características, y diferentes registros de datos. De manera que se puedan seguir los diferentes caminos que contempla el protocolo en cada uno de los sistemas.

Desarrollo de una herramienta informática global

El seguimiento del protocolo de actuación se apoya en diferentes herramientas que facilitan los cálculos a realizar en cada una de las fases, así como las conclusiones a obtener en cada paso. Para que el protocolo pueda ser seguido de manera sencilla, sería de gran interés contar con una única herramienta informática que permita acometer cada una de las fases del análisis energético. Paso por paso, la herramienta irá analizando cada una de las fases hasta ofrecer una calificación final del sistema.

Sería interesante incluir en la herramienta una componente económica que permita realizar un análisis profundo del estudio coste/beneficio de manera que se pueda conocer de una manera sencilla, a partir del presupuesto disponible, la viabilidad económica de las actuaciones a llevar a cabo.

Matriz de impacto energética

Las acciones de mejora encaminadas a disminuir las ineficiencias en una energía concreta, afectarán al resto de energías, puesto que cualquier cambio de las variables altura y caudal del sistema afectarán a todas las energías involucradas en la red.

Como desarrollo futuro se pretende realizar una matriz de impacto energética que permita conocer cómo afecta al resto de pérdidas energéticas la mejora de una ineficiencia concreta. Esto puede llevar a optimizar la fase de análisis de pérdidas energéticas operacionales y estructurales.

La idea es poder conocer que repercusión tendrá la mejora o cambio en una pérdida sobre el resto de ineficiencias y por tanto cual será el cambio energético global, de manera que se prioricen aquellas actuaciones que mayor beneficio tengan sobre el sistema.

Etiquetado energético de las redes de transporte de agua a presión

En 2010 se lanzó desde la Unión Europea la *“Directiva 2010/31/EU relativa a la eficiencia energética de los edificios”* (Parlamento Europeo, 2010a), con el objetivo de fomentar su eficiencia energética y de establecer unas pautas y requisitos para el realizar el cálculo y certificación de la eficiencia energética de los mismos. En esta normativa, se define la eficiencia energética de un edificio como la *“cantidad de energía que se necesita para satisfacer la demanda de energía asociada a un uso normal del edificio”*. Mientras que el certificado de eficiencia energética se define como *“el certificado reconocido en el que se indica la eficiencia energía de un edificio calculado con arreglo a una metodología adoptada”*. Es en esta normativa donde se especifica la metodología de cálculo y donde se indican algunas instrucciones sobre la certificación de eficiencia energética en edificios. Cabe destacar que esta normativa especifica *“aplicar un enfoque común en la certificación energética de edificios”*.

En paralelo a esta normativa se lanzó la *“Directiva 2010/30/EU relativa a la indicación del consumo de energía y otros recursos por parte de los productos relacionados con la energía, mediante el etiquetado y una información normalizada”* (Parlamento Europeo, 2010b). Esta normativa especifica que *“es preciso introducir una etiqueta uniforme para todos los productos de un mismo tipo”*. En 2017 se publicó el *“Reglamento (UE) 2017/1369 por el que se establece un marco para el etiquetado energético y se deroga la Directiva 2010/30/UE”* (Parlamento Europeo, 2017), considerando que *“la eficiencia energética es un elemento crucial del marco de actuación de la Unión Europea en materia de clima y energía has el año 2030 y es decisiva para moderar la demanda energética”*.

La edificación supone el 40% del gasto energético total en la Unión Europea (Parlamento Europeo, 2010a), pero en términos unitarios, es decir, por vivienda o edificio, es mucho menor. Si se compara en términos unitarios el gasto energético en redes de transporte de agua a presión con el gasto energético en viviendas, es decir, una vivienda frente a una red de transporte de agua a presión, el gasto energético del sistema de transporte es muchísimo más elevado, por lo que parece coherente que si las viviendas están obligadas por ley a disponer de un certificado y etiquetado energético, también lo estén las redes de transporte de agua a presión, las cuales representan alrededor del 5% del gasto energético mundial, cifra nada desdeñable.

En este sentido, se apuesta por incluir en un futuro un certificado energético en las redes de distribución de agua a presión, que califique y etiquete el nivel energético de cada instalación. De manera similar a la calificación energética de viviendas. Un punto de partida podría ser la metodología y calificación propuesta en este trabajo, de momento desacoplada en dos calificaciones diferenciadas: una calificación de pérdidas operacionales y una calificación de pérdidas estructurales. Relacionando estas dos calificaciones se pretende en un futuro ofrecer un único indicador que califique de manera general la red, y con el que se pueda ofrecer un certificado energético similar al de las viviendas.

Con esto se pretende conseguir los objetivos nombrados en las anteriores normativas, pero trasladado de manera particular a las redes de transporte de agua a presión. Y para ello, tomar como ejemplo estas directivas parece coherente, de manera que se fomente la eficiencia energética de las redes de transporte de agua a presión, a partir de una etiqueta uniforme.

Un escenario multidisciplinar en el que diferentes actores deben involucrarse para llevar a cabo tanto las normativas como guías que orienten en la certificación y el etiquetado, y en las buenas prácticas a llevar a cabo, similar a las guías propuestas para el etiquetado y certificación de edificios (ILETE, 2010; IEA and IPEEC, 2015). El camino a seguir debe ser paralelo al de los edificios, pero salvando las diferencias entre ambos campos de aplicación.

Para fomentar este etiquetado energético, un primer paso puede ser ofrecer un etiquetado a aquellos abastecimientos que hayan seguido el protocolo, con la intención de darles visibilidad por haber tratado de mejorar su huella energética.

De manera similar al EMAS, las organizaciones encargadas de gestionar la red de agua, al seguir el protocolo, tendrán un plan de acción definido para ser más eficientes energéticamente. Este compromiso se podría ver recompensando con un etiquetado de distinción.

Capítulo 5

Referencias y glosario

5-1. GLOSARIO

Con la intención de uniformizar la nomenclatura utilizada para las diferentes variables empleadas en cada uno de los artículos y estudios publicados, a continuación, se desarrolla un glosario que recoge cada una de estas variables y su correspondiente abreviación.

Con el paso del tiempo, la aparición de nuevos conceptos en las diferentes publicaciones realizadas, ha hecho que algunos términos se hayan renombrado, o hayan modificado su abreviación de unas publicaciones a otras. En este apartado, se muestra una tabla que recoge en una primera columna las diferentes abreviaciones utilizadas para cada término. Cada término es descrito en una segunda columna, y tras la descripción, entre paréntesis, se propone la abreviación definitiva en aquellos casos que existan variantes o inconsistencias entre las

abreviaciones utilizadas hasta el momento para dicho término. El objetivo es tratar de evitar diferentes nomenclaturas para una misma variable en los futuros trabajos y desarrollos a realizar.

Cabe puntualizar, que, aquellos términos cuya denominación con diferentes terminologías es ampliamente aceptada en el mundo científico, se consideran consistentes y no se propone alternativa. Tal es el ejemplo de denominar al caudal con mayúscula (Q) o minúscula (q).

Tabla 5-1: Abreviaturas y descripción de cada término utilizado en la tesis y en sus correspondientes publicaciones

Alturas y cotas	
H_d	Altura de diseño de la bomba
$H_{d(PRV)}$	Altura de diseño disipada por la PRV
$H_{(PRV)}$	Altura disipada por la PRV en fase de explotación
$H_{d(PAT)}$	Altura de diseño recuperada por el PAT o turbina
$H_{(PAT)}$	Altura recuperada por el PAT o turbina en fase de explotación
H_i, H_j	Altura piezométrica de un nudo genérico (H_j)
H_l	Altura piezométrica del nudo más bajo
H_h	Altura piezométrica del nudo más alto
H_{hi}	Altura de suministro en el caso ideal
$H_{hi,S}$	Altura piezométrica de una fuente de suministro genérica
H, H_s	Altura de suministro
H_p, h_p	Altura de bombeo (H_p)
H_n, h_n	Altura natural (H_n)
H_c	Altura piezométrica del nudo crítico
H_{BEP}	Altura de la bomba en su BEP
Z_j, Z_i	Cota de un nudo genérico (Z_j)
Z_i	Cota del punto inicial de suministro en sistemas simples (Z_s)
Z_f	Cota del punto final de suministro en sistemas simples
Z_c, Z_f	Cota del nudo energéticamente más exigente (nudo crítico) (Z_c)
Z_s, Z_i, Z_R	Cota de la fuente de suministro (Z_s)
Z_l	Cota del nudo de consumo más bajo

z_h	Cota del nudo de consumo más alto
$z_{h, j \rightarrow k}$	Cota más alta entre el nudo de estudio j y el nudo k
\bar{z}	Cota media del sistema (ponderada o geométrica)
Caudal y volumen	
Q, q	Caudal
q_i	Caudal circulante por una tubería genérica
Q_p	Caudal bombeado
Q_{BEP}	Caudal impulsado por la bomba en su BEP
Q_{PL}	Caudal de la bomba a carga parcial (75% del Q_{BEP})
Q_{OL}	Caudal de la bomba en sobrecarga (110% del Q_{BEP})
Q_f	Caudal fugado
v_i	Volumen circulante por una tubería genérica
V_e	Volumen estimado de demanda
$v_j, v_{c,j}$	Volumen de agua consumido por un nudo genérico
V_U	Volumen total consumido
$v_{l,j}$	Volumen de agua perdido en un nudo genérico j
$v_{g,j}$	Volumen total de agua en un nudo genérico ($v_{c,j} + v_{l,j}$)
V, V_t	Volumen total de agua inyectado (V)
V_r	Volumen total registrado por los contadores
V_p	Volumen de agua bombeado
$Q_{l,o}$	Volumen de agua fugado objetivo ($V_{l,o}$)
Q_l	Volumen de agua real fugado (V_l)
Presión	
$p_o/\gamma, h_o$	Presión de servicio (p_o/γ)
$p_{o,j}/\gamma, h_{o,j}$	Presión de servicio en un nudo genérico ($p_{o,j}/\gamma$)
$p_{o,h}/\gamma, h_{o,h}$	Presión de servicio en el nudo más alto ($p_{o,h}/\gamma$)
p_i/γ	Presión en un nudo genérico (p_j/γ)
p_{ji}/γ	Presión en un nudo genérico en el sistema ideal
p_i/γ	Presión en la aspiración de la fuente de suministro
p_{min}/γ	Presión mínima
\bar{p}	Presión media del sistema
p	Presión de trabajo de una tubería

Pendiente hidráulica y fricción	
J, j	Pendiente hidráulica (J)
J_a	Pendiente hidráulica media
J_o	Pendiente hidráulica óptima
J_o^*	Pendiente hidráulica óptima con turbinas o PATs
J_{min}	Pendiente hidráulica mínima
J_{max}	Pendiente hidráulica máxima
Δh_i	Pérdidas por fricción en una tubería genérica
f	Factor de fricción
h_f	Pérdidas por fricción
h_{fe}	Pérdidas estimadas por fricción
$h_{fe(s \rightarrow i)}$	Pérdida por fricción estimada entre la fuente de suministro y un nudo genérico ($h_{fe(s \rightarrow j)}$)
$h_{f(s \rightarrow i)}$	Pérdida por fricción existente entre la fuente de suministro y un nudo genérico ($h_{f(s \rightarrow j)}$)
Energías	
E_{lr}, E_{rl}	Energía embebida en fugas ($E_{lr} = E_{lr}^{te} + E_{lr}^o$)
E_{lr}^{te}	Energía embebida en fugas causada por la sobrepresión derivada de la topografía y del exceso de presión suministrado por las bombas
E_{lr}^o	Energía embebida en fugas causada por la altura de suministro estrictamente necesaria para cumplir con la presión de servicio
E_{pr}, E_{rp}	Pérdidas energéticas en la estación de bombeo (E_{pr})
E_{fr}, E_{rf}	Energía disipada por fricción (E_{fr})
E_{rv}	Energía disipada en válvulas
E_u	Energía entregada a los usuarios ($E_{uo} + E_{lr} + E_{er}$)
E_{er}	Energía de exceso
E_{or}, E_{ro}	Otros tipos de pérdidas energéticas operacionales (E_{or})
E_o	Pérdidas energéticas operacionales totales
$E_{o,e}$	Nivel de referencia a alcanzar en las pérdidas energéticas operacionales
E_{tr}	Energía topográfica o pérdidas energéticas estructurales
E_{tr}^u	Energía topográfica inevitable
E_{tr}^f	Energía topográfica inevitable debida al flujo
E_{tr}^m	Energía topográfica gestionable

$\Delta E_{tr,j}^m$	Energía topográfica gestionable acumulada en un nudo genérico j
E_{ti}	Energía topográfica ideal
E_{sr}	Energía suministrada real
E_{si}	Energía suministrada ideal
E_{se}	Energía total suministrada estimada
E_{so}	Energía suministrada objetivo
E_{uo}	Energía mínima requerida por los usuarios
E_p	Energía consumida por las bombas
E_n	Energía natural suministrada
$E_{l,e}$	Nivel de referencia alcanzable de pérdidas por fugas
$E_{f,e}$	Nivel de referencia alcanzable de pérdidas por fricción
$E_{p,e}$	Nivel de referencia alcanzable de pérdidas en el bombeo
ΔE	Energía de exceso natural en sistemas simples
E_{ra}	Pérdidas de energía evitables
E_I	Energía inyectada en sistemas simples (E_{sr})
γ_l	Factor ponderador de las pérdidas por fugas ($E_{l,e}/E_{o,e}$)
γ_f	Factor ponderador de las pérdidas por fricción ($E_{f,e}/E_{o,e}$)
γ_p	Factor ponderador de las pérdidas en bombas ($E_{p,e}/E_{o,e}$)
Rendimientos	
η_{BEP}	Rendimiento mínimo de la bomba en el BEP
η_{PL}	Rendimiento de la bomba a carga parcial
η_{OL}	Rendimiento de la bomba en sobrecarga
η_p	Rendimiento de la estación de bombeo
η_{pe}	Rendimiento estimado de la estación de bombeo
η_t	Rendimiento de la máquina hidráulica (turbina o PAT)
η_m	Rendimiento del motor eléctrico
η_l, η_v	Rendimiento hidráulico de la red (η_l)
η_{le}	Rendimiento hidráulico estimado de la red
$\eta_{ai}, \eta_{ai,g}$	Rendimiento ideal del sistema (η_{ai})
η_{ar}	Rendimiento real del sistema
$\eta_{ar,o}$	Rendimiento objetivo a alcanzar en el sistema
$\Pi \eta_i$	Límites de los rangos de eficiencia ($\eta_p \cdot \eta_l$)

Longitud	
L, L_t	Longitud total de las tuberías (L_t)
L_p	Longitud total de acometidas
L_e	Longitud equivalente de pérdidas existentes en los accesorios de la tubería
L_{ei}	Longitud equivalente de una tubería genérica
L_c	Longitud desde el suministro hasta el nudo crítico
l_i, L_{ij}	Longitud de una tubería genérica
Indicadores	
I_e, I	Intensidad energética real (I_e)
I_{ee}	Intensidad energética estimada
C_1	Indicador de procedencia de la energía
$\theta_{tr}, \theta_t, \theta$	Indicador de energía topográfica (θ_{tr})
θ_{ti}	Indicador de energía topográfica ideal
$\theta_{tr}^m, \theta_{tm}$	Indicador de energía topográfica gestionable (θ_{tr}^m)
θ_{tr}^u	Indicador de energía topográfica inevitable
I_S	Índice energético global de pérdidas operacionales
w_f	Indicador de pérdidas por fricción en sistemas simples por bombeo
η_{GL}	Indicador de eficiencia global de sistemas simples por gravedad
Otras nomenclaturas utilizadas	
c	Ajuste de la variación de precios de las tuberías según su material
F_i	Factor de instalación
$a_o(p)$	Coeficiente de ajuste de los precios de la tubería en función del diámetro
γ	Peso específico
γ	Coeficiente del emisor
n	Vida útil media de las tuberías en años
n, N	Velocidad de rotación nominal de la bomba (N)
m	Número de tuberías
n_s	Velocidad específica de la bomba
C	Constante para estimar el η_{BEP} (función del tipo de bomba, velocidad de rotación y MEI)
C_{HW}	Coeficiente de Hazen Williams
C_T	Costes totales
h, h_w	Número anual de horas de funcionamiento de la bomba

i	Número de rodetes en serie de los que dispone la bomba
$\overline{p_e}$	Precio medio de la energía para un periodo de tiempo concreto
$\overline{p_e^*}$	Precio medio de venta de la energía para un periodo de tiempo concreto
N_c	Nudo crítico
N_c, n	Número de acometidas
Δt	Intervalo de tiempo
C_u	Coste unitario de las tuberías
C_p	Costes capitales del bombeo
P	Potencia hidráulica
D	Diámetro
σ	Tensión admisible de trabajo de las tuberías
k	Constante del coste del material de la tubería
$\alpha_{s,j}$	Porcentaje de agua que llega al nudo genérico j desde una fuente s
K	Coficiente del emisor

ACRÓNIMOS

EMAs	Áreas de gestión energética (Energy Management Areas)
EMAS	Esquema de ecogestión y auditoría medioambiental (Eco-Management and Audit Scheme)
DMAs	Distritos hidrométricos (District Metered Areas)
PMAs	Áreas de gestión de la presión (Pressure Management Areas)
RES	Fuentes de energía rígidas (Rigid Energy Sources)
VES	Fuentes de energía variables (Variable Energy Sources)
ACV/LCA	Análisis de Ciclo de Vida/ Life Cycle Assessment
PRVs	Válvulas Reductoras de Presión (Pressure Reducing Valves)
PATs	Bombas trabajando como turbinas (Pumps as Turbines)
ELL	Nivel económico de fugas (Economic Level of Leakage)
UMF/UARL	Umbral Mínimo de Fugas/ Unavoidable Average Real Losses
ALCC	Curva de costes de mantenimiento y reparaciones (Active Leakage Control Curve)
IFE/ILI	Índice de Fugas Estructural/ Infrastructure Leakage Index
TIRL	Technical Indicator for Real Losses
PMI	Índice de gestión de la presión (Pressure Management Index)
ELF	Nivel económico de fricción (Economic Level of Friction)

Capítulo 5

BEP	Punto de funcionamiento de mayor rendimiento de la bomba (Best Efficient Point)
EEl	Índice de eficiencia energética (Energy Efficiency Index)
EPA	Extended Product Approach
SAM	Modelos Semi Analíticos
OL	Carga parcial de la bomba (punto de funcionamiento al 75% del Q en el BEP)
PL	Sobrecarga de la bomba (punto de funcionamiento al 110% del Q en el BEP)
MEI	Índice de eficiencia mínima de la bomba (Minimum Efficiency Index)
LCC	Coste de ciclo de vida (Life Cycle Cost)
WDN	Redes de distribución de agua (Water Distribution Networks)
PWTS	Transporte de agua en sistemas a presión (Pressurized Water Transport Systems)
PVIS	Sistemas de Riego Fotovoltaico (Photovoltaic Irrigation Systems)
GEI/GHG	Gases de Efecto Invernadero/ Greenhouse Gas
BVV/ VSP	Bomba de Velocidad Variable/ Variable Speed Pump
BVF/ CSP	Bomba de Velocidad Fija/ Constant Speed Pump

En la medida de lo posible, se propone seguir las siguientes directrices para la nomenclatura utilizada en las diferentes variables que permiten caracterizar energéticamente un sistema de agua a presión:

- Para el caso ideal sin pérdidas operacionales se utiliza el subíndice *i*
- Para el caso real con pérdidas operacionales se utiliza el subíndice *r*
- Para hacer referencia a nudos y tuberías genéricas se utiliza el subíndice *j*
- Para hacer referencia a fuentes de suministro genérica se utiliza el subíndice *s*
- Para los niveles de referencia y la estimación de variables se utiliza el subíndice *e*

5-2. REFERENCIAS

Las referencias bibliográficas indicadas a continuación corresponden con las citas que aparecen en los capítulos previos. Los trabajos que aparecen en los apéndices tienen sus propias referencias y se pueden consultar en el final de cada apéndice:

- Abu-Aligah, M. 2011. Design of photovoltaic water pumping system and compare it with diesel powered pump. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* 5(3): 273–280.
- Acharya, S., George, B., Aye, L.U., Nair, S., Nawarathna, B. and Malano, H. 2015. Life Cycle Energy and Greenhouse Gas Emission Analysis of Groundwater-Based Irrigation Systems. *Irrigation and Drainage* 64: 408–418, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ird.1896>.
- AEAS and AGA. 2018. XV Estudio Nacional de Suministro de agua potable y saneamiento en España.
- Alegre, H., Baptista, J.M., Cabrera, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W. and Parena, R. 2016. *Performance Indicators for Water Supply Services: Third Edition*. Third. Water Intelligence Online15. IWA Publishing, <https://doi.org/10.2166/9781780406336>.
- Almeida, R.H., Carrêlo, I.B., Narvarte, L. and Carrasco, L.M. 2018. Main final results of MASLOWATEN – The H2020 project for the market uptake of large power PV irrigation systems. In European Commission (Ed), *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, p. 640771. Brussels: European Commission, <https://ec.europa.eu/jrc/en/event/conference/35th-eu-pvsec-2018>.
- AWWA. 2012. Computer Modeling of Water Distribution Systems. Manual of water supply practices M32. Third Edition. Denver, Colorado. USA.
- AWWA. 2016a. *Water Audits and Loss Control Programs (Manual of Water Supply Practices M36)*, 4th Edition. Denver, Colorado: American Water Works Association.
- AWWA. 2016b. *Energy Management for Water Utilities*. Denver, Colorado: American Water Works Association.
- AWWA Technical and Education Council's Water Loss Control Committee. 2019. Assessment of Performance Indicators for Non-Revenue Water Target Setting

- and Progress Tracking. American Water Works Association September. Denver, Colorado.
- Bakhsipour, A.E., Bakhsizadeh, M., Dittmer, U., Nowak, W. and Haghighi, A. 2018. A Graph-Theory Based Algorithm to Generate Decentralized Urban Drainage Layouts. In *UDM 2018: New Trends in Urban Drainage Modelling*, Springer, Cham, https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-99867-1_109.
- Ballard, S., Porro, J. and Trommsdorff, C. 2018. *The Roadmap to a Low-Carbon Urban Water Utility. An international guide to the WaCCliM approach*, <https://doi.org/10.2166/9781780409924>.
- Berbel, J., Expósito, A., Gutiérrez-Martín, C. and Mateos, L. 2019. Effects of the Irrigation Modernization in Spain 2002–2015. *Water Resources Management* 33(5): 1835–1849, <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02215-w>.
- Bouman, D. 2014. Hydraulic design for gravity based water schemes. Aqua for All. Den Haag, Netherlands.
- Burt, C.M., Piao, X., Gaudi, F., Busch, B. and Taufik, N.N. 2008. Electric motor efficiency under variable frequencies and loads. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134(2): 129–136, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:2\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(129)).
- Cabrera, E., Gómez, E., Cabrera, E. and Soriano, J. 2018. Calculating the economic level of friction in pressurized water systems. *Water (Switzerland)* 10(6), <https://doi.org/10.3390/w10060763>.
- Cabrera, E., Gómez, E., Cabrera Jr., E., Soriano, J. and Espert, V. 2015. Energy assessment of pressurized water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141(8): 1–12, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000494](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000494).
- Cabrera, E., Pardo, M.A., Cobacho, R. and Cabrera, E. 2010. Energy Audit of Water Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(6): 669–677, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000077](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000077).
- Calvo Buendía, E., Tanabe, K., Kranjk, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. 2019. *2019 Refinement To the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC2. Switzerland, <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2019-2-05-13>.

- Camacho, E.,Rodríguez, J.A. and Montesinos, P. 2017. Ahorro de agua y consumo de energía en la modernización de regadíos. In Berbel, J. and Gutiérrez-Martín, C. (Eds), Efectos de la modernización de regadíos en España, Cajamar Caja Rural.
- CEDA-Committee for Economic Development of Australia. 2012. Australia 's Energy Options : Policy choice not economic inevitability. November.
- Chen, X.,Thorp, K.R.,Ouyang, Z.,Hou, Y.,Zhou, B. and Li, Y. 2019. Energy consumption due to groundwater pumping for irrigation in the North China Plain. *Science of the Total Environment* 669(17): 1033–1042, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.179>.
- Chomkham Sri, K. and Pelletier, N. 2011. Analysis of Existing Environmental Footprint Methodologies for Products and Organizations: Recommendations, Rationale, and Alignment.
- Corominas, J. 2010. Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. *Ingeniería del agua* 17(3), <https://doi.org/10.4995/ia.2010.2977>.
- Durán, X. 2018. Desalinización y eficiencia energética: dos conceptos condenados a entenderse. *Iagua*. <https://www.iagua.es/blogs/xavi-duran-ramirez/desalinizacion-y-eficiencia-energetica-dos-conceptos-condenados-entenderse>.
- EASME European Commission. 2019. Project MASLOWATEN delivers zero energy , low water consumption irrigation for agriculture. *EASME European Commission*. <https://ec.europa.eu/easme/en/news/project-maslowaten-delivers-zero-energy-low-water-consumption-irrigation-agriculture> (accessed 7 May 2020)
- EPA. 2020. Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. *United States Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator> (accessed 26 April 2020)
- ERSAR. 2019. Guia de Avaliação da qualidade dos serviços se Águas E Resíduos prestados aos utilizadores.
- Espinosa-Tasón, J.,Berbel, J. and Gutiérrez-Martín, C. 2020. Energized water: Evolution of water-energy nexus in the Spanish irrigated agriculture, 1950–2017. *Agricultural Water Management* 233(September 2019): 106073, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106073>.

European Commission. 2009. Commission Regulation (EC) No 640/2009 of 22 July 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for electric motors (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union, 2009.

European Commission. 2012. *Commission Regulation (EU) No 547/2012 of 25 June 2012 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for water pumps (Text with EEA relevance)*. Official Journal of the European Union.

European Commission. 2018. A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. European Commission, https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_en.pdfhttps://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_en.pdf?utm_campaign=AktuellHållbarhet-Direkten_181129_Username&utm_medium=email&utm_source=Eloqua&elqTrackId.

European Parliament. 2009. Regulation (EC) No 1221/2009 on the voluntary participation by organisations in a Community eco-management and audit scheme (EMAS). Official Journal of the European Union 1221 342, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1221&qid=1417544679944&from=EN>.

Europump. 2013. How to apply European Commission Regulation 547/2012/EC implementing Directive 2009/125/EC with regard to ecodesign requirements for water pumps. In *WORKSHOP Water Pumps*.

Europump. 2014. Extended Product Approach for Pumps. *European Association of Pump Manufacturers Association*.

Eurostat. 2018. Electricity price statistics. *Eurostat* (November 2019): 1–12, <https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/>https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics/es<https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/>

FAO Food and Agriculture Organization. 2016. Annual freshwater withdrawals,

- agriculture (% of total freshwater withdrawal). *The World Bank*. <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWAG.ZS>.
- Ferrer Polo, J., Aguado García, D., Barat Baviera, R., Serralta Sevilla, J. and Lapuente Ojeda, E. 2017. Huella energética en el ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid. *Fundación Canal de Isabel II* 187.
- Fremeth, A. 2018. A Historical and Comparative Perspective on Ontario's Electricity Rates. *Energy Regulation Quarterly* 6(4), <http://www.energyregulationquarterly.ca/articles/a-historical-and-comparative-perspective-on-ontarios-electricity-rates#sthash.U9VpePk9.dpbs>.
- Giner, C., Gómez, P., Sanz, F., García-serra, J. and Soriano, J. 2015. Auditoría Energética de estaciones de bombeo . Caso de Estudio. *IV Jornadas de Ingeniería del Agua*.
- Gobierno de España: Ministerio para la Transición Ecológica. 2019. Informe de inventario nacional gases de efecto invernadero. Gobierno de España, <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/Inventario-GEI.aspx>.
- Gobierno de España. 2011. Real Decreto 187/2011, de 18 de febrero, relativo al establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía. *Boletín Oficial del Estado*, 3 de marzo de 2011, núm. 53, pp. 24169-24187 (1).
- Gómez, E. 2016. Caracterización y mejora de la eficiencia energética del transporte de agua a presión. *Universitat Politècnica de València*. Universitat Politècnica de València.
- Greenhouse Gas Protocol. 2017. GHG Protocol tools enable companies and cities to develop comprehensive and reliable inventories of their GHG emissions, and help countries and cities track progress toward their climate goals. *Greenhouse Gas Protocol*. <https://ghgprotocol.org/calculation-tools> (accessed 26 April 2020)
- Hashemi, S., Filion, Y.R. and Speight, V.L. 2018. Examining the Energy Performance Associated With Typical Pipe Unit Head Loss Thresholds. *Journal - American Water Works Association* 110(9): 15–27, <https://doi.org/10.1002/awwa.1089>.
- Howells, M. 2018. Seeking sustainable CLEWs -Climate, Land, Energy and Water

- Strategies: An integrated systems approach to meet sustainable development challenges. *SETIS Magazine (European Commission)* 18(The relevance of the water-energy nexus for EU policies): 26–31.
- Hydraulic Institute and Europump. 2001. *Pump Life Cycle Costs. A guide to LCC analysis for pumping systems.*
- IDAE. 2005. *Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío.* Madrid.
- IDAE. 2010. Estudio de Prospectiva: Consumo Energético en el sector del agua. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Madrid.
- IDAE. 2019. Informe Sintético de Indicadores de Eficiencia Energética en España. Año 2017. Madrid.
- IEA. 2017. *Water-Energy Nexus.* Paris.
- IEA. 2019. *World Energy Outlook 2019. Executive summary.* International Energy Agency, <https://doi.org/10.6027/9789289329996-1-en>.
- IEA. 2020. *Energy and water. Exploring the interdependence of two critical resources.* International Energy Agency, <https://www.iea.org/topics/energy-and-water>.
- IEA and IPEEC. 2015. *Building Energy Performance Metrics.* France, <https://www.iea.org/reports/building-energy-performance-metrics>.
- IEA,IRENA,UNSD,WB and WHO. 2019. *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2019.* The World Bank. Washington, DC.
- IEC. 2011. IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors, www.abb.com/motors&generators.
- ILETE. 2010. *Labelling and Certification Guide.* Trento, <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/ilete>.
- Inter-American Development Bank. 2011. *Evaluation of water pumping systems. Energy Efficiency Assessment Manual.* Washington, DC, idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=36539671.
- IRENA. 2020. *Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050.* Abu Dhabi.
- Klein, G.,Krebs, M.,Hall, V.,O'Brien, T. and Blevins, B. 2005. *California's Water – Energy Relationship.* *California Energy Commission.*

- Liemberger, R. and McKenzie, R. 2005. Accuracy Limitations of the ILI - Is it an Appropriate Indicator for Developing Countries? *Proceedings of the IWA Specialised Conference "Leakage 2005"* (m): 1–8.
- Linares, P. and Khan, Z. 2018. About modelling the energy, water and food nexus. *SETIS Magazine (European Commission)* 18(The relevance of the water-energy nexus for EU policies): 19–20.
- Magagna, D.,González, I.,Bidoglio, G. and Peteves, S. 2019. *Water Energy Nexus in Europe*, <https://doi.org/10.2760/968197>.
- Marchi, A.,Simpson, A.R. and Ertugrul, N. 2012. Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems. *Drinking Water Engineering and Science* 5(1): 15–21, <https://doi.org/10.5194/dwes-5-15-2012>.
- Marsh-Patrick, A. 2010. Company GHG Emissions Reporting – a Study on Methods and Initiatives. (ENV.G.2/ETU/2009/0073). Brussels.
- Mérida, A.,Gallagher, J.,McNabola, A.,Camacho, E.,Montesinos, P. and Rodríguez, J.A. 2019. Comparing the environmental and economic impacts of on- or off-grid solar photovoltaics with traditional energy sources for rural irrigation systems. *Renewable Energy* 140(April): 895–904, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.122>.
- Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. 2019. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos. Informe sobre Regadíos en España.
- MITECO. 2019. Cambio climático. Mitigación, políticas y medidas: Calculadoras. *Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico*. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/calculadoras.aspx> (accessed 24 April 2020)
- MITECO. 2020. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. Gobierno de España. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Madrid, <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>.
- MITECO y OECC. 2019. Instrucciones de uso de la calculadora de Huella de Carbono de alcance 1+2 para una explotación agrícola.
- Mukherjee, P. and Sengupta, T.K. 2020. *Design and fabrication of solar-powered water pumping unit for irrigation system*. Lecture Notes in Electrical Engineering575. Springer Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-13-8687-9_9.

- Murgui, M.,Cabrera, E.,Pardo, M.A. and Cabrera Jr., E. 2009. Estimación del consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de Valencia. In *Ingeniería del agua*, Madrid, <https://doi.org/10.4995/ia.2010.2980>.
- Naciones Unidas. 2014. Agua y energía. *Naciones Unidas*. https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/water_and_energy.shtml (accessed 25 April 2020)
- Naciones Unidas. 2019a. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html>.
- Naciones Unidas. 2019b. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html> (accessed 4 December 2019)
- National Electrical Manufacturers Association. 2007. Energy Management Guide For Selection and Use of Fixed Frequency Medium AC Squirrel-Cage Polyphase Induction Motors 26.
- Parlamento Europeo. 2010a. Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Parlamento Europeo. 2010b. Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la indicación del consumo de energía y otros recursos por parte de los productos relacionados con la energía, mediante el etiquetado y una información normalizada. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Parlamento Europeo. 2017. *Reglamento UE 2017/1369 del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de julio de 2017 por el que se establece un marco para el etiquetado energético y se deroga la Directiva 2010/30/UE*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Rajan, A.,Ghosh, K. and Shah, A. 2020. Carbon footprint of India's groundwater irrigation. *Carbon Management* 11(3): 265–280, <https://doi.org/10.1080/17583004.2020.1750265>.
- Rodríguez-Díaz, J.A.,Pérez-Urrestarazu, L.,Camacho-Poyato, E. and Montesinos, P.

2011. The paradox of irrigation scheme modernization: more efficient water use linked to higher energy demand. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9(4): 1000–1008, <https://doi.org/10.5424/sjar/20110904-492-10>.
- Salguero, F.J., Cobacho, R. and Pardo, M.A. 2017. Sectorización de redes de distribución de agua según criterios de eficiencia energética. In *Sectorización de redes de distribución de agua según criterios de eficiencia energética*, p. 212. V Jornadas de Ingeniería del Agua.
- Sánchez de Vera, A. 2017. Auditorías energéticas en comunidades de regantes. *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)*. <https://www.idae.es/articulos/auditorias-energeticas-en-comunidades-de-regantes>.
- Sánchez, P. 2019. La Comunidad de Regantes de Orbiso reduce los costes en un 75% gracias al sistema de bombeo solar. *Pv magazine*, <https://www.pv-magazine.es/2019/09/17/la-comunidad-de-regantes-de-orbiso-reduce-los-costes-en-un-75-gracias-al-sistema-de-bombeo-solar/>.
- Smidt, S.J., Haacker, E.M.K., Kendall, A.D., Deines, J.M., Pei, L., Cotterman, K.A., Li, H., Liu, X., Basso, B. and Hyndman, D.W. 2016. Complex water management in modern agriculture: Trends in the water-energy-food nexus over the High Plains Aquifer. *Science of the Total Environment* 566–567: 988–1001, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.127>.
- Stoffel, B. 2015. *Assessing the Energy Efficiency of Pumps and Pump Units*. Elsevier. Amsterdam.
- The World Bank. 2019. World Development Indicators: Carbon dioxide. 2017. <http://wdi.worldbank.org/table/3.10>.
- Trachtman, G. 2019. Guidance on Implementing an Effective Water Loss Control Plan. *The Water Research Foundation (Project 4695)*.
- U.S. Department of Energy. 2012. Adjustable Speed Drive Part-Load Efficiency. Washington, DC, https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/motor_tip_sheet11.pdf.
- Uche, J. 2013. *La energía en el agua*. Universidad de Zaragoza.
- UNEP. 2014. Eficiencia en el uso del agua y la energía. In *Conferencia Anual de ONU Agua en Zaragoza. Preparando el Día Mundial del Agua 2014. Alianzas para*

- mejorar el acceso, la eficiencia y la sostenibilidad del agua y la energía.*, pp. 1–7. Zaragoza.
- United Nations, D. of E. and S.A. 2019. *World Population Prospects 2019*. United Nat. United Nations. New York.
- United States Environmental Protection Agency. 2019. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2017. United States, <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>.
- Villamayor-Tomas, S. 2017. The Water–Energy Nexus in Europe and Spain. In Ziolkowska, J. and Peterson, J. (Eds), *Competition for Water Resources*, pp. 105–122. Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803237-4.00006-9>.
- del Villar, A. 2014. El coste energético de la desalinización en el Programa A.G.U.A. *Investigaciones Geográficas* (62), <https://doi.org/10.14198/ingeo2014.62.07>.
- Voutchkov, N. 2016. Desalination-Past, Present and Future. *IWA Network*. <https://iwa-network.org/desalination-past-present-future/> (accessed 22 April 2020)
- WaCCliM. 2018. ECAM 2.2 Methodology. Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool, www.wacclim.org.
- WBCSD and WRI. 2012. *The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised edition*. Greenhouse Gas Protocol.
- World Economic Forum. Committed to improving the state of the world. 2019. *The Global Risks Report 2019 (14th Edition)*. Geneva, http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2019.pdf.
- World Meteorological Organization. 2019. WMO provisional Statement on the Status of the Global Climate in 2019. 1961 September.
- World Water Assessment Programme. 2009. *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. Paris, https://doi.org/10.1142/9781848160682_0002.
- Wu, Z.Y., Tryby, M., Todini, E. and Walski, T. 2009. Modeling variable-speed pump operations for target hydraulic characteristics. *Journal / American Water Works Association* 101(1): 54–64, <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2009.tb09823.x>.

- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). 2019. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. UNESCO. París, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>.
- WWF. 2015. Modernización de Regadíos: Un mal negocio para la naturaleza y la sociedad 53.
- Yadav, K.,Kumar, A.,Sastry, O.S. and Wandhare, R. 2019. Solar photovoltaics pumps operating head selection for the optimum efficiency. *Renewable Energy* 134: 169–177, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.013>.
- Zhang, Y.,Gao, Z. and Jia, Y. lei. 2018. A Bibliometric Analysis of Publications on Solar Pumping Irrigation. *Sustainable Development of Water Resources and Hydraulic Engineering in China. Proceedings for the 2016 International Conference on Water Resource and Hydraulic Engineering* 195–207, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-61630-8>.
- ZVEI-German Electrical and Electronic Manufacturers' Association. 2015. Energy Efficiency with Electric Drive Systems. Frankfurt.

Apéndices

Apéndice I

Eco-Layouts in Water Distribution Systems

Cabrera, E.; Gómez, E.; Soriano, J.; del Teso, R.

Journal of Water Resources Planning and Management, ISSN 0733-9496

Impact Factor 2018: 3,404. Rank: 13/91 (Q1). Water Resources.

Estado: publicado en 2018.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001024)

This material may be downloaded for personal use only. Any other use requires prior permission of the American Society of Civil Engineers. This material may be found at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0001024>

A continuación, con permiso de ASCE, se expone la versión de autor de este artículo adaptada al formato de la tesis

ABSTRACT

To achieve maximum efficiency in water pressurized transport, it is necessary to perform a global analysis, whenever possible starting from the system's conception. The first stage of the process is the network layout, the main topic of this paper. The optimum topology from an energy point of view (or eco-layout) is the one that, insofar as is feasible, allows equalizing the network's pressure to the set pressure standards. Eco-layouts can be easily designed in new systems but are difficult to implement, mainly in the short term, in operating networks. Nevertheless, because no system is eternal, the required actions can be gradually implemented. Therefore, the main goal of this paper is to identify and discuss these guidelines and actions, some of which are apparently contradictory to current design criteria, whereas others endorse modern management trends. These strategies can be summarized in two points: (1) providing lower pressure to consumers saves energy, and (2) setting up smaller pressure zones in terms of the elevation steps between zones will enable water companies to supply water at lower pressure in hilly areas. In the end, networks with more-efficient layouts can achieve important energy savings.

1. INTRODUCTION

In developed countries, water pressurized transport is now responsible for up to 6% (WW, 2013) of the electricity used. And because there is a growing need to transport water from where it is to where it is required, strong economic and environmental reasons advise reducing these energy requirements as much as possible. To achieve this, more efficient systems are needed, a broad concept that includes a wide array of measures. From demand management actions (reducing leaks and consumption) to more efficient pumping stations. Nevertheless, reaching maximum efficiency values is only possible through a global analysis, starting with the network layout, the main objective of this paper. The optimum topology from an energetic point of view (or eco-layout) is the one that, insofar as is feasible, allows equalizing the network's pressure to the pressure the standards set. This is an ambitious approach summarized in a word, "ecodesign". Indeed, according to ISO 14006 *"Ecodesign can be understood as a process integrated within the design and development that aims to reduce environmental impacts and continually to improve the environmental performance of the products, throughout their life cycle"*

from raw material extraction to end of life". It is worth noting that *"in this International Standard, the term product is understood to cover both goods and services"* (ISO, 2011). An alternative ecodesign definition is *"a preventive approach, designed to optimize the environmental performance of products, while maintaining their functional qualities, and providing genuine new opportunities for manufacturers, consumers and society as a whole"* (EP, 2009).

The first stage of a water network ecodesign process, i.e. defining its topology, has not received the attention it deserves. In the layout conception, three goals have prevailed to date: complying with quality standards, maximizing reliability and minimizing investment. Nevertheless the energy aspects, although dealt with in depth once the layout has been defined, have largely been ignored in the initial design stage. In operating systems, diagnostics (Cabrera et al., 2014), audits (Cabrera et al., 2010), metrics (Pelli and Hitz, 2010; Dziejczak and Karney, 2015), pumping operation (Walski, 1993) optimization (Price and Ostfeld, 2014), demand management impacts (Ghimire and Barkdoll, 2010) and even energy recovery (Fontana et al., 2011) are matters that have been thoroughly tackled. Nevertheless, only on very few occasions (Gómez et al., 2015) has the permanent energy impact of the layout, the objective of this article, been analyzed.

Finally, it is important to underline the difference between optimal layout and ecolayout. In the first case the objective is to minimize the economic cost of the network, and mainly applies to irrigation uses, tree networks, in which reliability is not a priority (Bhave and Lam, 1983; Lejano, 2006). However, the objective of the ecolayout is to minimize the energy requirements.

To highlight the importance of this first step of the ecodesign, and to outline the path towards eco-layouts, this paper is organized as follows:

- Discussion of the basic principle of the eco-layout ecodesign, i.e., to equalize (as far as possible) the network's pressure to the pressure the standards set.
- Analysis of the topographic energy concept and its role as a layout energy efficiency metric.
- Discussion of the accumulated topographic energy distribution as a tool to assess the viability of different strategies to reduce layout inefficiencies.

- Analysis of eco-layout strategies and their comparison with current water network management actions.
- Protocol to minimize energy requirements in water networks.

2. ENERGY MANAGEMENT AREAS, THE ECO-LAYOUT BASE

Energy losses in water distribution systems can be classified in two groups. Operational losses, widely discussed in the literature (Cabrera et al. 2010), are inherent to the system's operation. Energy lost in leaks, inefficient pumping, friction in pipes, avoidable excesses of delivered energy to users, and other types of losses, such as break pressure in private storage tanks, are all operational losses. These losses are often high in practice and thus need careful attention by management (in an ideal system these losses should be zero). On the other hand, structural losses (independent of management) are those that are related to the topology of the system. They can only be reduced by modifying the topology of the network. This paper explores ways to reduce these losses, because supplying water at higher pressure than needed is a waste of energy. The topographic energy inherent to irregular profiles (Fig. 1) cannot be minimized easily. However, this is not the case in many fairly common systems such as the one depicted in Fig. 2.

To focus the analysis on the topographic energy (i.e., structural losses), the system is assumed to be ideal (no operational losses), a hypothesis that, for the sake of clarity, is assumed in the whole paper because in real systems the conclusions are the same. The next section is the only exception, because it is necessary to include friction losses in order to prove the strong correlation between the different sources of energy and the structural losses.

Therefore, determine the energy baseline for both systems (the standard pressure is 20 m). Following the established terminology (Cabrera et al., 2014), the minimum useful energy to deliver to users, E_{uo} , is:

$$\begin{aligned} E_{uo} &= \gamma \sum v_j [(z_j - z_l) + h_{o,j}] \\ &= \gamma[(0.02\Delta t[(70 - 0) + 20]) + (0.08\Delta t[(20 - 0) + 20])] = \gamma 5\Delta t J \end{aligned} \quad (1)$$

Where γ = specific weight; v_j = volume delivered at the generic node j (at height z_j); z_l = lowest point in the system (with positive or negative consumption) and $h_{o,j}$ = standard pressure in node j . In Eq. (1), the two header nodes represent the areas to be supplied. On the other hand, the ideal topographic energy, i.e., the structural losses, E_{ti} , is the difference between the total energy supplied and the minimum energy required by users:

$$\begin{aligned} E_{ti} &= \gamma \sum v_j ((z_h + h_{o,h}) - (z_j + h_{o,j})) \\ &= \gamma[(0.02\Delta t((100 + 0) - (70 + 20)) \\ &\quad + 0.08\Delta t((100 + 0) - (20 + 20))] = \gamma 5\Delta t J \end{aligned} \quad (2)$$

Where z_h = highest point (in this case the elevated tank); $h_{o,h}$ = standard pressure at this point (zero, in this case); and $h_{o,j}$ = standard pressure in node j (20 m). Therefore, the supplied energy, E_{si} , is:

$$\begin{aligned} E_{si} &= \gamma V H_{hi} = \gamma(0.08 + 0.02)\Delta t 100 = \gamma \sum v_j [(z_j - z_l) + h_j] \\ &= E_{uo} + E_{ti} = \gamma 10\Delta t J = \gamma(5 + 5)\Delta t J \end{aligned} \quad (3)$$

Where V = total volume injected into the system during interval Δt ; and H_{hi} = specific energy required without any inefficiencies. The ideal performance of the system, η_{ai} , is the relation between the useful, E_{uo} , and the supplied, E_{si} , energies (Cabrera et al., 2014)

$$\eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} = 1 - \frac{E_{ti}}{E_{si}} = 1 - \theta_{ti} \quad (4)$$

Therefore, in the energy balance θ_{ti} is the relative weight of the structural losses, i.e., the layout efficiency metric. In fact, only when $\theta_{ti} = 0$ can the ideal performance of a system be 1. Eq. (4) proves that, even without operational losses, the efficiency of the system is limited by the structural losses, which carry inherent problems such as excesses of pressure. In the present case

$$\theta_{ti} = \frac{E_{ti}}{E_{si}} = \frac{\gamma 5 \Delta t}{\gamma 10 \Delta t} = 0.5 \quad (5)$$

The ideal performance is the quotient between the supplied and the required energy

$$\eta_{ai} = 1 - \theta_{ti} = 0.5 \quad (6)$$

In real systems this value will inevitably be reduced by the operational losses. Only by carrying out structural refurbishment (Fig. 3), i.e., decoupling the system in two subsystems, can this theoretical efficiency be improved.

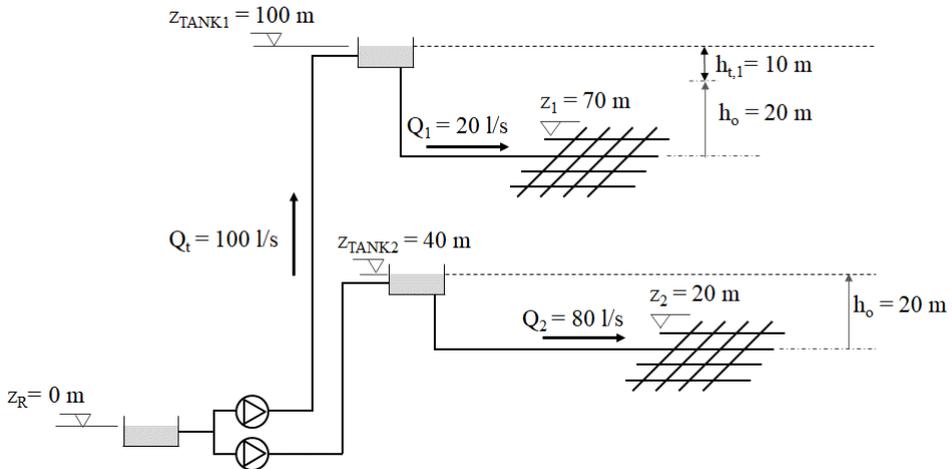


Figure 3. Ideal decoupled system (two subsystems).

The new energy balance is summarized subsequently. The higher subsystem (Fig. 3) conserves the topographic energy, whereas in the second subsystem it is zero.

The final result evidences the improvement: the ideal overall performance, $\eta_{ai,g}$, increases up to 96% as a result of the decrease in topographic energy (from 50% to 4%), a reduction directly transferred to the injected energy, resulting in an energy saving equal to $\gamma 4.8\Delta t$ ($= \gamma 10\Delta t - \gamma 5.2\Delta t$). To reach 100%, the height of the upper tank would have to be lowered to 90 m.

The energy balance of the ideal decoupled system (Fig. 3) is

Subsystem 1:

$$E_{uo,1} = \gamma[(20[(70 - 0) + 20])]\Delta t = \gamma 1800\Delta t \text{ kWh}$$

$$E_{ti,1} = \gamma \sum v_j \left(\left(z_h + \frac{p_{0,h}}{\gamma} \right) - \left(z_j + \frac{p_{0,j}}{\gamma} \right) \right) = \gamma[(20(100 - 90)]\Delta t \\ = \gamma 200\Delta t \text{ kWh}$$

$$E_{si,1} = \gamma V H_{hi1} = E_{uo1} + E_{ti1} = \gamma 20\ 100\Delta t = \gamma 2000\Delta t \text{ kWh}$$

Subsystem 2:

$$E_{uo,2} = \gamma[(80[(20 - 0) + 20])]\Delta t = \gamma 3200\Delta t \text{ kWh}$$

$$E_{ti,2} = \gamma \sum v_j \left(\left(z_h + \frac{p_{0,h}}{\gamma} \right) - \left(z_j + \frac{p_{0,j}}{\gamma} \right) \right) = \gamma[(20(40 - 40)]\Delta t \\ = 0 \text{ kWh}$$

$$E_{si,2} = \gamma V H_{hi2} = E_{uo2} + E_{ti2} = \gamma 80\ 40\Delta t = \gamma 3200\Delta t \text{ kWh}$$

Subsystem 3:

$$E_{uo,g} = E_{uo1} + E_{uo2} = \gamma 5000\Delta t \text{ kWh} = E_{uo}$$

$$E_{ti,g} = E_{ti1} + E_{ti2} = \gamma 200\Delta t \text{ kWh} < E_{ti}$$

$$E_{si,g} = E_{si1} + E_{si2} = \gamma 2000\Delta t + \gamma 3200\Delta t = \gamma 5200\Delta t < E_{si}$$

This example proves that to avoid structural losses, it is necessary to design systems that only deliver the required energy. This is a utopian objective which, depending on the system's energy source, can be achieved to a greater or lesser extent.

3. TOPOGRAPHIC ENERGY MANAGEMENT AND SOURCES OF ENERGY.

Topographic energy can only be reduced by modifying the design of the system. Until now any surplus has been removed by dissipating any excess through pressure relief valves (PRVs) or, better still, substituting them for pumps as turbines (PATs) to, whenever possible, recover that energy (Fontana et al. 2012). Much attention is given to this relatively new strategy, driven by the growing climate change concern. Nevertheless, it is likely better in many contexts to reduce topographic energy through the layout of the system itself. Figs. 2 and 3 illustrate an overview of the three actions. Fitting a PRV in the lower network is a fairly commonly used solution, or, where viable, resorting to the improved solution (PAT). However, the optimum solution is changing the layout of the system (Fig. 3). Hence, from an energy point of view, the logical order of actions is reduce, recover, and remove (Fig. 10): three actions, three Rs, which are reminiscent of the hierarchy of the Rs inherent to waste water management (reduce, reuse, recycle).

A more in-depth discussion of topographic energy management and its relationship to the different sources of energy requires friction losses in the system to be included (this is the only exception in this conceptual paper, because it mainly considers systems as ideal). Indeed, in real systems supplied by tanks, a rigid energy source (RES) cannot meet the exact needs because demands vary over time, and, consequently, so do head losses.

If the height is established to meet the service standard during peak consumption hours, there will be an excess of energy in the off-peak hours, an excess that is currently dissipated using pressure relief valves. The energy rigidity of the tanks can only be slightly mitigated with variations in the surface water level.

In real systems, equalizing supplied and required energy with variable energy sources (VES) (i.e., parallel pumps fitted with variable speed drivers) is easier. Therefore, this is the only way to minimize the structural losses. For a 10-km distance between the potable water treatment plant and the network, Fig. 4 shows the heights H_i needed depending on the source (variable, p_i , rigid, p_{iD}), the flow rate, and the pressures at the entrance to the network. VES permit equalizing pressure, whereas RES do not. This simple principle of the eco-layout design is impossible to fully achieve in irregular topographic areas, although approaching it would be more feasible with VES.

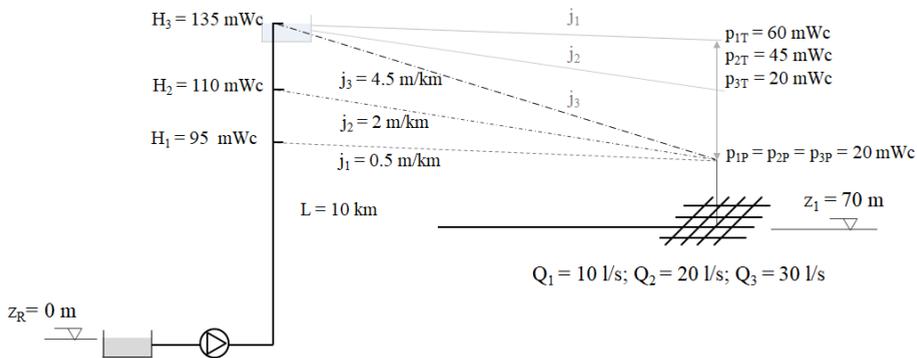


Figure 4. Supply with VES, equaling the required pressure and the supplied pressure.

In any case, the fundamental action to balance injected and required pressures is to decouple, which is a strategy that, although there may be different objectives, has become more frequent with time, in particular the use of district metered areas (DMAs) for better leakage management and pressure management areas (PMAs) to minimize and reduce pressure oscillations. However, the process actually follows a bottom-up approach. Operating networks are sectorized in DMAs with a clear objective, to reduce leaks while maintaining hydraulic performance (Laucelli et al., 2017). If sectorization is tackled in a top-down approach (from the design stage), in addition to the undeniable benefits this entails (less breakages, reduced leakage, and so on), the energy savings is a remarkable added benefit.

4. OPTIMUM NETWORK LAYOUT CASE STUDY

The following example shows how to minimize the topographic energy in an irrigation network. Fig. 5 shows the dimensions, consumption nodes (10 L/s constant in time and 20 m pressure), and elevations. The grids are equal (1 km on all sides). The water to be distributed is stored in a large reservoir (elevation 20 m) located in the center of the network. The system is ideal and operates 1,500 h/year. The simplified branched network layout permits synthesizing the results. The analysis relates topographic energy, annual capital, and the operational costs of three different layouts (Figs. 5 and 6). Pump P1 supplies the energy required at the highest nodes, and therefore an unavoidable surplus will be delivered to the others.

With a suction level of 20 m (natural energy contribution), the height of the pump is $H_p = 40$ m. The flow rate, the result of multiplying the number of nodes (80) by the unitary demand, is $Q_p=800$ L/s.

The ideal energy supplied, E_{si} , which is the sum of natural energy E_n , and pumped energy E_p , and efficiencies (equations 1- 4) corresponding to structural losses are

$$\begin{aligned}
 E_{uo} &= \gamma \sum v_j [(z_j - z_l) + h_o] = 470880 \text{ kWh/year} \\
 E_n &= \gamma V_t H_n = 235440 \text{ kWh/year} \\
 E_p &= \gamma V_p H_p = 470880 \text{ kWh/year} \\
 E_{si} &= E_n + E_p = 706320 \text{ kWh/year} \\
 \eta_{ai} &= \frac{E_{uo}}{E_{si}} = 0.67; \quad \theta_{ti} = 1 - \eta_{ai} = 0.33
 \end{aligned} \tag{7}$$

The radial design of Fig. 5 is common in irrigation networks (less flow per pipe and lower cost). The main energy problem is the shared energy source, which supplies a considerable surplus of pressure at the lower part of the network (40 m in the last row at zero elevation). To reduce θ_{ti} moving toward an eco-layout, the system needs to be decoupled, dividing it into sectors. The two new scenarios (2 and 3) are shown in Fig. 6. In the second, with an identical network, the system is subdivided into two sectors, with two different pumps, one per sector. In the last scenario, all network rows are independent; each has its own pump, except for the last row, which can be supplied by gravity.

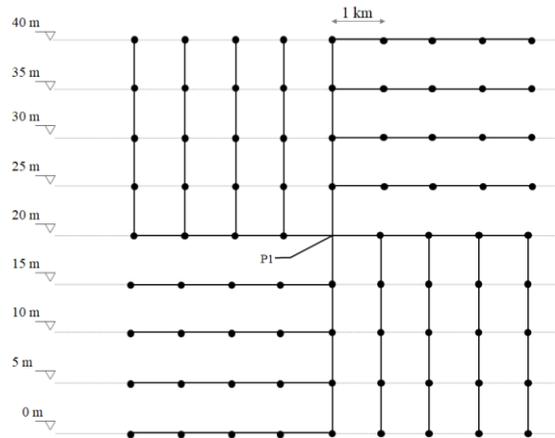


Figure 5. Radial branched irrigation network. First scenario.

The pump characteristics in the second scenario are $H_{p1} = 40$ m; $Q_{p1}=400$ L/s, $H_{p2} = 20$ m; and $Q_{p2}=400$ L/s, with the network being exactly the same (80 km). In the third case the network is divided into nine EMAs supplied by eight different pumps ($H_{p1}= 40$ m; $H_{p2}= 35$ m; $H_{p3}= 30$ m; $H_{p4}= 25$ m; $H_{p5}= 20$ m; $H_{p6}= 15$ m; $H_{p7}= 10$ m and $H_{p8}= 5$ m; seven have equal flow rates $Q_p=90$ L/s, whereas the flow rate of the fifth pump is 80 L/s), because the supply to the final row does not require any pumping. The network is longer (92 km).

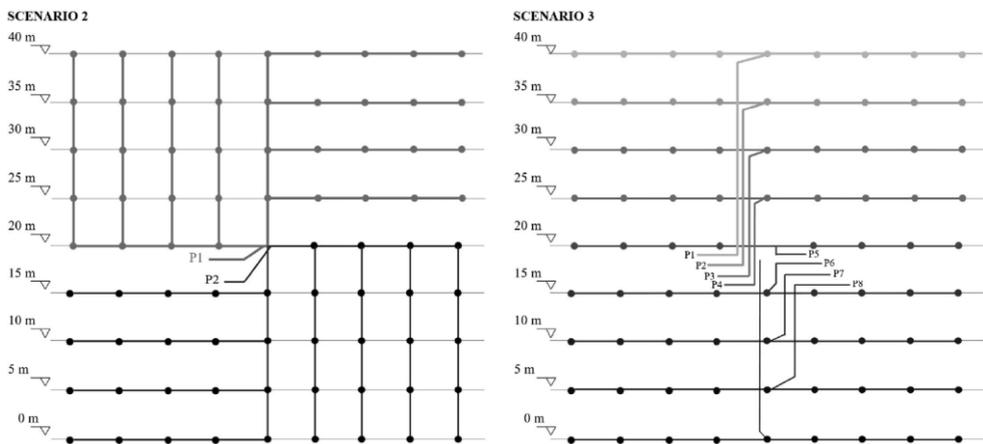


Figure 6. Radial branched irrigation network. Scenarios 2 and 3

Reproducing the calculations in Eq. (7), the topographic energy percentage is 0.2 in Scenario 2 and 0 in Scenario 3 (all the nodes are supplied with the required amount of energy). At this point, it seems that because the economy of scale is lost, the topographic energy reduction, and therefore the energy consumption, do not compensate for the extra costs of the installation. The following analysis deals with this question.

For the sake of clarity over accuracy, additional hypotheses are formulated:

- Pipe life is 50 years; pump life 15 years.
- Costs remain constant over time.
- To size the network and assess its cost, a unitary loss j is set (m/km), irrelevant in the rest of the analysis (ideal system).
- All the pipes (PVC) share a nominal working pressure (PN = 6 bar).
- The network cost is proportional to the square of the diameter, which is valid for PVC pipes, although any other formula (Swamee and Sharma, 2008) is acceptable.
- Installation cost can be included using a multiplying factor, F_i . In irrigation networks, 1.5 is a usual value.
- The friction factor f (needed to calculate pipe capital costs) is constant.
- The cost of pumps varies greatly and is therefore the most difficult element to assess. As a matter of fact, in identical conditions (performances, materials, and manufacturer), a single pump can be more expensive than two equivalent pumps (with the same head but half the flow in each). In fact, too many factors influence the final cost of the pumps, the main factor being installation. If, as in this case study, pumps share the pumping station house, capital and operating and maintenance (O&M) costs decrease dramatically. To calculate the cost, a powerdependent variation (Swamee and Sharma 2008) is assumed, although similar expressions (but with different flow and head dependence) were given by Walski et al. (1987).
- Motor and other component costs are the same as that of the pump, whereas O&M accounts for 15% of the total investment. This is a

reasonable amount in water pumps with a shared power house (HI and Europump, 2001).

- The energy cost of the power term is included. The system only operates during off-peak hours (constant kWh value).

With all these hypotheses, the equations used for the economic analysis are now derived.

4.1. Network capital costs

The unit cost, C_u (€/m), of a pipe is:

$$C_u \cong k \cdot \pi \cdot D \cdot e = k \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma} = k' \cdot p \cdot D^2 \quad (8)$$

Where D = diameter (m), e = pipe thickness (m), σ = material working stress (PVC), p = working pressure; and k = constant representing the cost of the material (€/m³).

From the Darcy-Weisbach equation, the diameter depends on the flow rate, in which j (unit head loss, 0.002 m/m) and f (friction factor 0.014) are constant. In SI units (the constant 0.0826 is not dimensionless)

$$D = \left(\frac{0.0826}{j} f q^2 \right)^{1/5} \quad (9)$$

Combining Eq. (8) and (9), the result is:

$$C_u \cong K \cdot p \cdot q^{4/5} = K_p \cdot q^{4/5} \quad (10)$$

From the PVC pipe catalogue (PN = 6 bar), K_p is calculated (0.96), and the final network cost is

$$I_T = F_i \sum l_i \cdot C_u(q_i) = \sum l_i \cdot 0.96 \cdot q_i^{4/5} \quad (11)$$

If lengths and flow rates are known, the investment required for each scenario is known as well.

4.2. Pumping capital costs

Using an equation available in the literature (Swamee and Sharma, 2008) adjusted using real values, and considering the preceding hypotheses

$$C_p (\text{€}) = 1905.13 \cdot P^{0.72} \quad (12)$$

where P = hydraulic power (kW). The annual cost is obtained from a pump life of 15 years.

4.3. Energy cost.

Current energy cost values are assumed, specifically, 0.08 €/kW (monthly power term) and 0.11 €/kWh (energy term).

Table 1, which summarizes the results, proves that Scenario 3 is the best in terms of energy and overall. On the other hand, because there are no operational losses (friction is only needed to size the pipe diameters) the analysis focused on the ideal energy requirements, the subject at hand.

Table 1. Costs of the analyzed scenarios

Scenario	E_{uo} ($\frac{kWh}{year}$)	E_n ($\frac{kWh}{year}$)	E_p ($\frac{kWh}{year}$)	E_{si} ($\frac{kWh}{year}$)	η_{ai}	θ_{ti}	L_t (km)	Investment in pipes (€/year)	Investment in pumping (€/year)	Energy cost (€/year)	Total cost (€/year)
1	156,960	78,480	156,960	235,440	0.67	0.33	80	45,418	18,654	60,963	125,035
2	156,960	78,480	117,720	196,200	0.80	0.20	80	45,418	18,148	45,722	109,288
3	156,960	78,480	78,480	156,960	1	0	92	47,925	19,487	30,482	97,894

Finally, it is worth pointing out that

- On quasi-flat land (in this case the slope is 0.5%), topographic energy also plays a relevant role. It is always important to manage it, not only in areas with steep gradients.
- Structural losses can be reduced by optimizing the topology. The dimensionless parameter θ_{ti} takes account of it.
- In this case study, an irrigation system with 1500 working hours/year, energy costs are smaller than in a similar urban network. Therefore, in similar conditions, the advantages of a topology approaching an eco-layout, should be higher.
- Due to the structural losses reduction, the contribution of natural energy, E_n/E_{si} , with more efficient layouts increases (0.33 in the first scenario; 0.5 in the third).
- Subdividing networks in EMAs from the beginning makes sense because the objectives of the DMAs and PMAs can be simultaneously met.
- And last, but not least, the economic analysis can be refined by applying real costs and including operational losses. But the procedure is identical and the result, will probably be the same. That is, in favor of the more energy efficient layout.

5. ECO-LAYOUT STRATEGIES VERSUS CURRENT WATER NETWORK MANAGEMENT ACTIONS: ANYTOWN EXAMPLE

As mentioned previously, the basic principle of an eco-layout is to minimize the difference between the delivered and the required energy; in practice, this is a time variable value because networks are dynamic [with some exceptions, such as a programmed irrigation network (Fig. 5)]. Demand and friction losses vary with time, thus conditioning the supply pressure, although the standard pressure is constant. This fact clearly shows that a RES is not, from an energy point of view, the most suitable. On the other hand, resilience (Todini 2000), which is basically a surplus of energy (i.e., inefficiency), is only necessary in adverse situations (such as pipe breakage) but is not required on a permanent basis. Therefore, if the final goal is to

reduce the energy requirements as far as possible, these traditional concepts must be revisited.

5.1. Tanks and eco-layout of networks

There are many reasons to install storage tanks, including to improve the reliability of the supply, to guarantee the required pressure at points of consumption (working as a RES), to equalize the quasi-constant input flow (from a drinking water treatment plant) to the variable customers' demand in order to avoid over-sizing pipe systems, and others (Walski 2000). Solid design conditions have been established (Van Zyl et al. 2008) to determine the main parameters (elevation and volume). A great deal of literature on the subject (Batchabani and Fuamba 2012) is available.

These two main parameters have strong energy implications. On the one hand, the elevation represents the supplied energy intensity, while on the other hand, volume also has a significant impact on energy, not so much in terms of work (kWh), but because of the final bill to be paid. A large storage capacity can avoid pumping at peak hours, and consequently the more expensive energy rate is avoided. However, this is not free, because it requires larger investments. Not only does it entail oversizing the storage volume, but the main pipe diameter and pumping station must be generously dimensioned as well. In short, the cost of the energy is reduced (although not consumption) at the expense of increasing the investment and the peak-power requirement. On the other hand, the growing concern for water quality has done away with the idea that the bigger the storage tank, the better (Walski 2000).

As mentioned previously, from an energy point of view, a tank cannot be as efficient as a variable (adaptable) source. Peak hours (which condition elevation) account for 10% of the daily operating time (2 of 24 h). Consequently, a short period is used to decide upon the height of the tank, and consequently, throughout the rest of the day there is a surplus of energy which must be removed via PRVs or recovered using PATs in order to avoid excessive pressures.

Moreover, because the average life of a tank is 75–100 years (SSWD 2011), deciding on its location (which can come into conflict due to aesthetics) is a long-term

decision. More often than not, in order to avoid conflicts and the risk entailed in the passing of time (growth of the city), the elevation is usually overestimated, locating the tank on the highest hill around the city (Fig. 2), thus energy-wise mortgaging the system. These criteria, which were logical decades ago, need to be reviewed. There can be, indeed, a certain volume of backup water (to guarantee supply and to use in case of a fire) in the storage tank. However, it must be placed at the exit of the potable water treatment plant (same elevation), and then energy must be injected by means of a variable source (Fig. 4). In other words, the capacity is given by the base storage tank (with lower energy consumption), whereas the pumping system provides the necessary additional energy, because this varies with time.

Technology permits parallel pumping groups and motors fitted with VSDs that can continuously inject the exact amount of required energy into the system regardless of demand. It is also important to have generators, with several days' autonomy, to supply power in the event of an electricity network failure. On the other hand, because pumps have an average life ranging between 15 and 20 years (SV 2009), it will be easier to adapt them to changing requirements over time. Finally, strictly in terms of energy, the financial savings of avoiding peak hours energy does not set off the advantages of direct injection (Gómez et al. 2015).

5.2. Resilience versus rigid and variable energy sources

Since the concept of resilience spread to water supply and Todini (2000) proposed an index to quantify it, many studies have emphasized their interest, and some have proposed alternatives to this pioneer index (Jeong et al. 2017). It is, as stated previously, a measure of the surplus energy in the network necessary to compensate for decreases in pressure in the event of a critical scenario. However, if the source is rigid, that surplus, which is only necessary occasionally, is permanent, and that means inefficiency.

It is worth remembering the importance of adequate pressure management (PM), bringing it as close as possible to the pressure set by the standards (GIZ 2011). Hence, any PM entails a loss of resilience. Therefore, it seems more logical to design the system to fulfil the steady standard conditions with a VES, a source of energy

able to cater to any critical events (e.g., increasing the pump speed). Obviously, the required response for each incident must be previously foreseen and characterized.

5.3. DMA, PMA and eco-layouts

Whereas tanks and the concept of steady resilience appear to be contradictory to the objective of minimizing the energy requirements, sectorizing the network in DMAs and/or PMAs are actions that are fully in tune with it. Moreover, an EMA has identical objectives to a PMA and, at the same time, can work as a DMA. Additional sectorization

is only advisable in large EMAs.

To summarize this, designing eco-layouts implies a reduction of the range of elevations served by a pressure zone. Instead of covering a range of elevation of say, 40 m, they must cover smaller ranges, adapted to each particular case. This strategy has negative (higher investments are needed) and positive sides (energy and emissions savings). Therefore a cost-benefit analysis is, in the end, required to make a final decision. In any case, in most pump lifecycle cost analyses, energy costs are much higher than capital costs (HI & Europump 2001). The inherent benefits associated with correct PM (GIZ 2011) must also be kept in mind.

5.4. Anytown network subdivided in EMAs

The Anytown system (Walski et al. 1987) is a well-known case study, a network (Fig. 7) that is suitable to illustrate the concepts established here because the consumption nodes are on four different horizontal platforms (20, 50, 80, and 120 ft), with the water source located at the lower node (10 ft). A number of compensation tanks (two or three, depending on the analyst, although this is irrelevant for the question at hand) are at 215 ft. The working pressure is 40 psi (86.25 ft), a value approaching the difference between the tank elevation (215 ft) and the highest node level (120 ft) plus the standard pressure (86.25 ft), an appropriate value to fill the tanks during off-peak hours. With this layout, the topographic energy is notable. As is seen by comparing scenarios, the reason for this is the energy rigidity of the compensation tanks.

The system is assumed to be ideal, although this hypothesis, due to the presence of compensation tanks, is not logical. Indeed, in real operation, these tanks are filled during off-peak hours and are emptied during peak hours. Nevertheless, an ideal case should suppose the opposite. With a pumping height equal to the difference between the highest and lowest heights ($215 - 10 \approx 205$ ft) and a flow rate equal to peak demand, the tanks (at a constant height, regardless of whether the flow is incoming or outgoing) will be filled during off-peak hours, acting as a demand node. Once the tanks are full, the pumps stop and the tanks supply the demand, working as a source. When the tanks are brought down to their normal low level, pumping starts again. That is the cycle. The compensation tanks, which are meaningless in an ideal scenario, are kept to exactly replicate the initial layout, including their elevation in ft (in the rest of the paper, the SI system is used). Operation has a common denominator: the energy source (tank or pump) always supplies 215 ft, a simplification that shows the dependence on the topographic energy of the system layout. In the real system the conditions change every hour, and the energy balance is more complex because in short periods the compensation tanks intervene in the audit (Cabrera et al. 2010), but the concepts are identical.

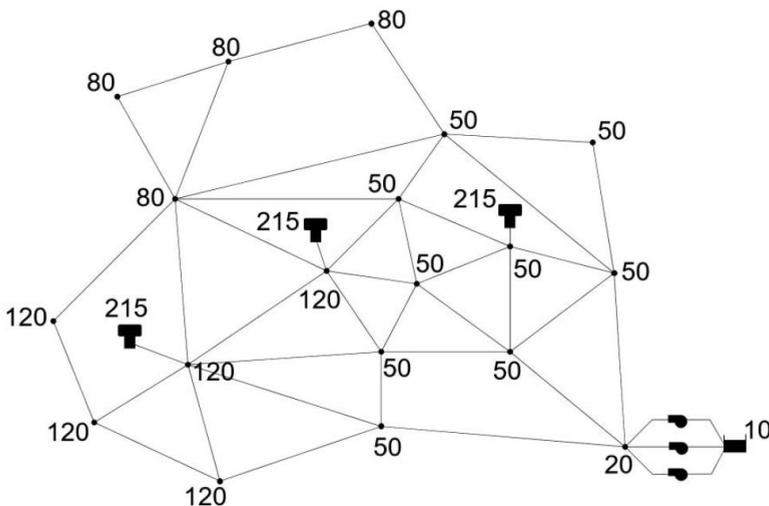


Figure 7. Anytown network (Data from Walski et al., 1987).

The other two scenarios considered, which are more logical with the current hypotheses (Fig. 8), are (1) no compensation tanks [Fig. 8(a)]; and (2) four independent pumps, one for each consumption plane (four EMAs) [Fig. 8(b)].

In the second scenario [Fig. 8(a)], pressure is equalized to the requirements of the highest level (pumping height $\frac{1}{4}$ 120 p 86.24 – 10 $\frac{1}{4}$ 196.24 ft). However, because the reduction in the height of pumping is rather discrete (less than 5%), the improvement is not relevant. Nevertheless, sectorizing the system into four EMAs [Fig. 8(b)], in line with the previous discussion (Fig. 6, Scenario 3), and supplying the required energy to each node (heights equal to 196.24, 156.24, 126.24, and 96.24 ft), the topographic energy is zero and the achieved savings are considerable. Finally, Fig. 9 compares the basic hydraulic functioning of the three scenarios, which permits a better understanding of the savings and the role of the standard pressure ho.

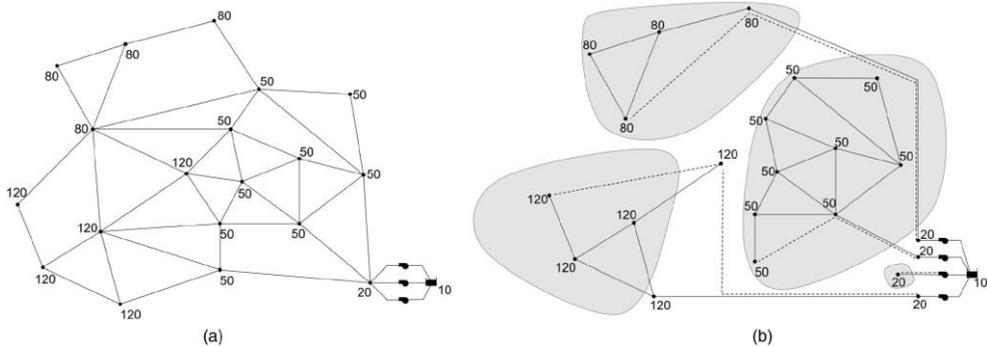


Figure 8. (a) Anytown, direct pumping; and (b) Anytown, decoupled, direct pumping.

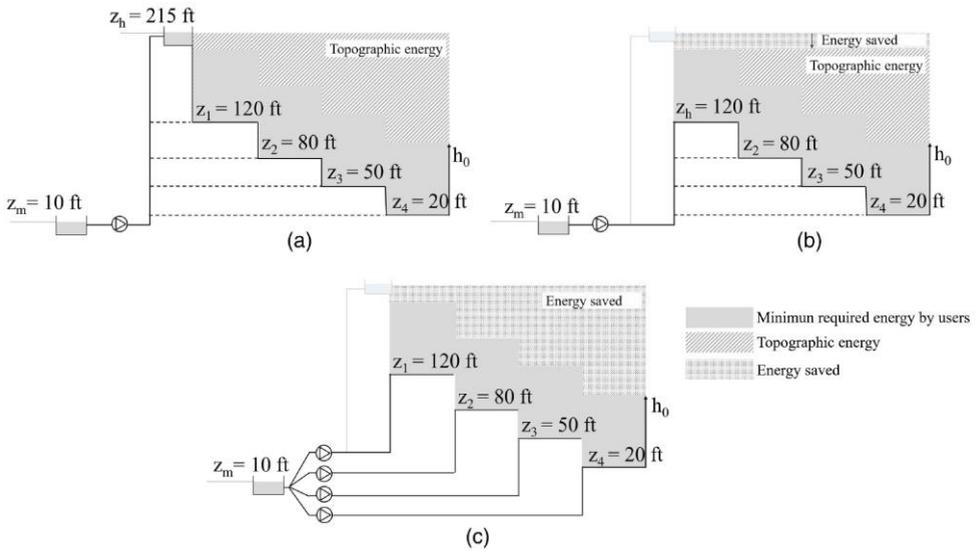


Figure 9. Hydraulic diagrams (a) Scenario 1; (b) Scenario 2; and (c) Scenario 3

Table 2 lists the daily energy balance. The energy cost for the third scenario is 30% lower than that of the initial scenario, with important savings, around US\$100,000=year, assuming a cost of US\$0.12=kWh, respecting the original data (Walski et al. 1987).

Table 2. Comparative energy balance of the three analyzed scenarios

Parameter	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
E_{uo} (kWh/day)	6,855	6,826	6,826
E_{ti} (kWh/day)	2,247	2,134	0
E_{si} (kWh/day)	9,102	8,960	6,826
η_{ai}	0.75	0.76	1.00
θ_{ti}	0.25	0.24	0.00
Cost (€/day)	1,092	1,075	819

In short, minimizing the required energy entails sectorizing the network from its conception, because doing so later is difficult unless structural changes, similar to those considered, are implemented in the layout. Finally, to avoid connectivity losses (which is necessary to increase the network's reliability) in the third scenario,

additional pipes were included [Fig. 8(b), discontinuous lines] to enhance the reliability of the system.

Finally, and although there are networks with different connectivity, to complete this analysis a cost study was performed. Because Gessler's network (Walski et al. 1987) is the most costeffective solution proposed, it was compared with the eco-layout of Anytown [Fig. 8(b)]. The network was sized to fulfil identical service conditions to those stated in the original competition. With identical data (same C-factor and equal unitary pipe costs), Gessler's network was around 1% cheaper than the eco-layout of Anytown (including the additional pipes to improve connectivity). Therefore The whole proposed system requires lower investment because additional pumping station costs should be widely compensated by civil works savings (tanks are not needed) and, furthermore, produces 30% energy savings.

6. PROTOCOL TO MINIMIZE THE ENERGY REQUIREMENTS IN WATER NETWORKS. FINAL REMARKS

The ultimate goal of any water network is, no matter its final use, to deliver adequate quantities of water to the different points of use at an adequate pressure established by the regulatory standards, currently 20 – 25 m (Ghorbanian et al., 2016). For irrigation use, the pressure is set by the devices' needs (drippers or sprinklers). In addition, the requirements must be met with the minimum amount of water and energy, i.e., avoiding losses. In particular, this paper is devoted to minimizing the structural energy losses.

Fig. 10 presents the protocol for reducing both kinds of energy losses, structural and operational. The upper-left rectangle corresponds to the analyzed eco-layout process, a strategy which, the authors know from experience, can be unpopular because it is not easy to convince users with 60 m of service pressure that, in order to improve the efficiency, this value must be drastically reduced to the standard value (say 20 m). What is evident to engineers is not evident to consumers. In any case, this should be a matter of future discussion between all players (customers, managers and operators of water systems, and regulators). The lower rectangle of Fig. 10 summarizes the well-known PM strategy implemented with PATs and PRVs. The whole left column shows the three-Rs (reduce, recover, and remove) actions described previously.

The right side is the protocol devoted to minimize the operational losses, a process that summarizes the term ecomanagement, a synthesis of the Ecomanagement and Audit Scheme process (EMAS) (EC 2011). In fact, the two first actions are the network audits (water and energy). Both columns are coupled because fitting PATs and PRVs reduces leaks, modifying the water balance and therefore the energy balance as well. This diagram is an improved version of a former diagram (Cabrera et al. 2017) devoted more specifically to operational losses, which were ignored in this paper but are widely reported in the technical literature.

In contrast, structural losses have been disregarded until now, perhaps because reducing them involves complex, long-term actions that may even be seen as utopian, and therefore only applicable to new systems. However, these actions can be implemented gradually in operating systems (Cabrera et al. 2014). This is a similar case to energy improvement actions in existing buildings. Although they are long-term assets (over 50 years), which account for about one-third of the world's energy consumption, they are key objectives in developed countries. Energy efficiency programs (EEFIG 2015) are tailored to that purpose. In the end, all the systems are dynamic, with their components having different life expectancies. For any strategic asset management plan, knowing the way to more-sustainable behavior of the asset is crucial.

To summarize, there are two ways to reduce structural losses: equalizing the delivered pressure to the required pressure as much as possible, and subdividing the system into EMAs. Concerning each strategy important remarks apply. With regards to the first one strategy

- A new debate arises about the minimum pressure requirement for urban water networks. Previously, the literature has provided little information about this. Although Ghorbanian et al. (2016) discussed current pressure standards in some relevant countries, they did not actually answer the debate. This is a subject that should be addressed at a local level, where the answer could involve merging hydraulics, considering the characteristics of cities (in some places, achieving lower pressure requires localized pumping in commercial and residential properties) and the expectations of customers.

- High water pressures have pros and cons. From the point of view of utility, clear advantages are higher resilience, greater water consumption, and better pathogen-intrusion prevention. On the negative side are a higher level of leaks, higher stress on pipes (which means shorter pipe life), and higher energy consumption. Therefore, in this era of climate change, the debate continues.
- The analysis must include an additional factor: when water pressure is near the minimum standard, when emergencies arise (e.g., fires, burst pipes, and so on) an additional source of energy is required.
- In less-demanding uses (e.g., irrigation) the preceding debate is not so relevant. Pressure should be as close as possible to requirements.

With regards to subdividing the system in EMAs, it is important to emphasize that:

- • The eco-layout is an approach which is dependent on the area, and it has a rational and economic limit. It is obvious that the pressure in every house cannot be supplied at exactly the required minimum pressure. In flat areas or where sloping land is uniform, subdividing the network into EMAs will be much easier than in undulating areas.
- In operating systems, implementing this strategy is much more complex than in new systems, and will always require a costbenefit analysis, similar to those preceding a DMA division. In any case, creating an EMA will always be more expensive (because it requires extra pipes and pumps), but more economic benefits will be obtained (because the EMA can work as well as a DMA). In conclusion, the shift from Figs. 2 and 3 is not free. Taking into account operational implications, it must be tradedoff and should also include a life-cycle analysis.

In the end, with the eco-layout fundamentals properly established, in real systems the final decision can be made from the comparison of the two scenarios (the actual versus the new), obviously including operational losses. This analysis will foster the change to more-efficient topologies. In any case, as has been noted, this will be a long, complex process.

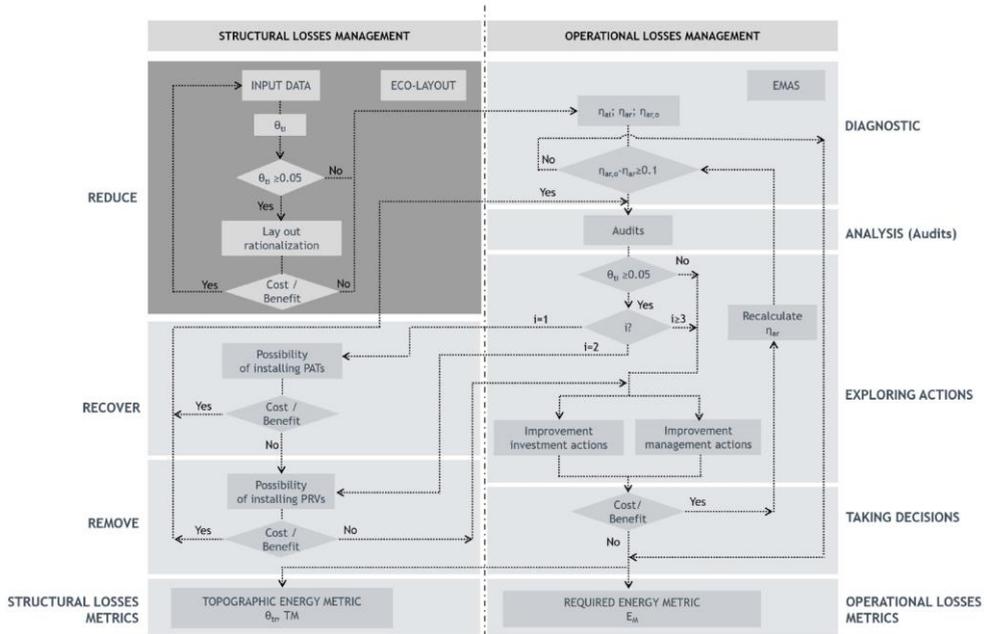


Figure 10. Protocol to reduce the energy requirements in water networks

7. CONCLUSION

In order to minimize energy consumption in a pressurized water network, the basic principle is fairly simple: as far as possible, deliver the required pressure at any time. More is a waste, and less fails to meet the quality standards. This principle is easy to spell out, but far more complex to implement, particularly in areas with irregular topographic profiles, although not so much in areas with uniform slopes no matter the value, because even with small steps the structural energy losses can amount to a significant figure. Topographic energy is quantified in parameter θ_{ti} , which is the complementary value of ideal performance η_{ai} . Minimizing θ_{ti} (equivalent to maximizing η_{ai}) is the ultimate goal of the eco-layout achievable by reducing the structural energy losses. This is achieved through flexible energy sources and by dividing the network into EMAs.

The systems discussed, based on real cases (except the Anytown network), prove that great energy saving can be achieved with adequate eco-layouts. Furthermore, although for the sake of clarity, the analyzed cases were considered ideal, in real

situations the differences would be even greater because in these energy balances, any inefficiencies (friction, leaks, pumping losses, or any others) increase the figures, and consequently the new comparison (assuming similar levels of efficiency in the compared scenarios) would be even more beneficial, especially if the analysis covers the entire life cycle. This is worth bearing in mind in new systems and existing systems that are to be refurbished in the future.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the valuable contributions made by the reviewers of this paper, because their comments and suggestions helped to significantly improve the contents. Additionally, the authors thank Omnium Ibérico/Aguas de Valencia for partially funding this research, and particularly its Energy Efficiency Department for providing some real case studies which inspired some of the examples included in this paper.

REFERENCES

- Batchabani, E., and M. Fuamba. 2012. "Optimal tank design in water distribution networks: Review of literature and perspectives." *J. Water Resour. Plann. Manage.* 140(2) 136-145. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000256](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000256).
- Bhave, P.R., and Lam C.F., 1983. "Optimal layout for branching distribution networks". *Journal of Transportation Engineering.* 109 (4): 534-547. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1983\)109:4\(534\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1983)109:4(534)).
- Cabrera E., Gómez E., Cabrera E. Jr., Soriano J., Espert V., 2014. "Energy assessment of pressurized water systems". *Journal Water Resources Planning and Management.* 141-8. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000494.
- Cabrera E., Gómez E., Espert V. and Cabrera Jr E., 2017. "Strategies to improve the energy efficiency of pressurized water systems". *Procedia Engineering* 186 (2017) 294 – 302.
- Cabrera E., Pardo M.A., Cobacho R., Cabrera E. Jr., 2010, "Energy audit of water networks". *Journal of Water Resources Planning and Management.* 136-6. November 2010. pp 669- 677.

Corominas, J. 2010. "Agua y energía en el riego en la época de la Sostenibilidad." *Ingeniería del Agua*. 17 (3): 219–233. <https://doi.org/10.4995/ia.2010.2977>.

EC (European Communities), 2011. "The European Eco-Management and Audit Scheme. Improving your environmental and business performance". European Commission. Brussels.

EEFIG (Energy Efficiency Financial Institutions Group), 2015. "Energy Efficiency – the first fuel for the EU Economy. How to drive new finance for energy efficiency investments. Final report covering Buildings, Industry and SMEs" EEFIG. Marseille. February 2015.

EP (European Parliament), 2009. "Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products". Official Journal of the European Union. Brussels.

Fontana N., Giugni M., and Portolano D., 2012. "Losses reduction and energy production in water distribution networks". *Journal Water Resources Planning and Management*. 138-3. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943- 5452.0000179.

Ghimire, S.R. and Barkdoll, B.D. (2010) "Sensitivity analysis of municipal drinking water distribution system energy use to system properties". *Urban Water Journal* 7(4), 217-232.

Ghorbanian V., Karney B.W., Guo Y., 2016 "Pressure Standards in Water Distribution Systems: Reflection on Current Practice with Consideration of Some Unresolved Issues". *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE. DOI: 10.1061 / (ASCE) WR. 1943 - 5452.0000665.

GIZ GmbH (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit), 2011. "Guidelines for water loss reduction. A focus on pressure management". Eschborn. Germany.

Gómez E., Cabrera E., Balaguer M., Soriano J., 2015. "Direct and indirect water supply: an energy assessment". *Procedia Engineering* 119 (2015) 1088 – 1097.

HI and Europump (Hydraulic Institute & Europump), 2001. "Pump Life Cycle Costs. A guide to LCC analysis for pumping systems". Hydraulic Institute & Europump, Parsippany, New Jersey and Brussels, Belgium.

ISO (International Organization for Standardization), 2011 "ISO14006:2011. Environmental management systems— Guidelines for incorporating ecodesign". Geneva. Switzerland.

Jayaram N. and Srinivasan K., 2008. "Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing." *Water Resour. Res.*, 44(1), W01417.

Jeong G., Wicaksono A. and Kang D., 2017. "Revisiting the Resilience Index for Water Distribution Networks". *Journal of Water Resources Planning and Management*. 143-8. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000792.

Laucelli D.B., Simone A., Berardi L. and Giustolisi O., 2017 "Optimal Design of District Metering Areas for the Reduction of Leakages". *Journal Water Resources Planning and Management*. 143-6. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000768.

Pelli, T., and Hitz, H.U., 2000. "Energy indicators and savings in water supply". *J. Am. Water Works Assoc.*, 92(6), 55–62.

Price E. and Ostfeld A., 2014 "Discrete Pump Scheduling and Leakage Control Using Linear Programming for Optimal Operation of Water Distribution Systems" *Journal of Hydraulic Engineering*.140-6. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000864.

SSWD (Sacramento Suburban Water District), 2011. "Reservoir and Booster Pump Station Asset Management Plan". Sacramento, CA 95821, EE. UU.

SV (Sustainability Victoria), 2009. "Energy Efficiency Best Practice Guide Pumping Systems" State Government Victoria. Australia.

Swamee P.K., and Sharma A.K., 2008. "Design of water supply pipe networks". John Wiley and Son. DOI: 10.1002/9780470225059.

Todini, E. (2000). "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach." *Urban Water*, 2(3), 115–122.

Van Zyl J. E., Piller O., and le Gat Y., 2008. "Sizing municipal storage tanks based on reliability criteria." *J. Water Resour. Plann. Manage.* 134-6. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:6(548), 548–555.

Walski T.M., Brill E.D., Gessler J., Goulter I.C., Jeppson R.M., Lansey K., Han-Lin L., Liebman J.C., Mays L., Morgan D.R. and Ormsbee, L. (1987). "Battle of the network models: epilogue". *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 113(2), 191-203.

Walski T.M., 2000. "Hydraulic design of water distribution storage tanks." *Water distribution systems handbook*, L. Mays, ed., 10.11–10.20.

Walski, T.M. (1993). Tips for saving energy in pumping operations. *Journal of American Water Works Association*, 85 (7), 49-53.

WW (Water in the West), 2013. "Water and Energy Nexus: A Literature Review". Stanford University. USA.

Apéndice II

Eficiencia energética en redes de agua a presión en su fase de diseño

del Teso, R.; Gómez, E.; Cabrera, E.; Estruch-Juan, E.

V Jornadas de Ingeniería del Agua. JIA 2017 (25 y 26 de octubre)

Congreso Nacional: A Coruña, España.

Estado: presentado en octubre de 2017.

Libro de resúmenes: ISBN: 978-84-9749-670-4

A continuación, se expone la versión de autor de este artículo adaptada al formato de la tesis

RESUMEN

El presente trabajo muestra la importancia de un correcto diseño de las redes de agua a presión, en el que además de cumplir con unas determinadas condiciones de servicio, se tenga en cuenta la energía consumida por la red. Para ello se realiza con EPANET el modelo matemático de la red propuesta en 1989 por Gemanopoulos y Jowitt, base de multitud de estudios. El objetivo es reducir al máximo las ineficiencias energéticas de este sistema desde la fase de diseño, para ello se realizará su auditoría energética con la intención de conocer de qué forma se distribuye la energía total aportada y consumida por el sistema. A lo largo del trabajo se proponen diferentes modificaciones en la red, desde el cambio en el suministro hasta el rediseño del sistema, lo que permite finalmente reducir la energía consumida en más de un 15 %, minimizando la energía de exceso y topográfica.

Palabras clave | eficiencia energética; diseño de redes; energía topográfica; pérdidas; auditoría energética.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente tanto el diseño como la gestión de las redes de agua a presión se han basado en cumplir una serie de estándares de servicio con el mínimo coste de inversión posible. En la actualidad, la eficiencia energética en cualquier sector está a la orden del día, teniendo incluso que cumplir unos determinados ratios exigidos por normativa. Por lo tanto, parece lógico tener en cuenta también la eficiencia energética en las redes de agua a presión. Más aún cuando el agua y la energía forman un binomio fundamental en el desarrollo económico y social de cualquier comunidad. Estando acoplados, es necesario tratarlos de manera conjunta si se desea mejorar la eficiencia de los sistemas de distribución de agua a presión.

En esta línea, el objetivo del presente trabajo es mostrar la importancia de un correcto diseño de las redes de agua a presión, en el que además de cumplir con unas condiciones de servicio establecidas, se tenga en cuenta la energía consumida por la red una vez ésta se ponga en servicio, tratando de minimizarla en la medida de lo posible. Para ello se tratará de reducir al máximo las ineficiencias energéticas del sistema, principalmente la energía de exceso y la energía topográfica, desde la fase de diseño para que en la fase de funcionamiento, la red sea eficiente.

La energía de exceso debe ser eliminada, ya que ni se necesita ni viene impuesta por causas inevitables, sino que es una sobrepresión en todos los nudos de la red, que propiciará un mayor nivel de fugas y al tiempo mayor energía disipada por fricción. En cambio, el valor de la energía topográfica viene condicionado por el perfil del terreno, por lo que es más complicado disminuir su valor. Aun así se deben explorar diferentes alternativas que permitan evitar, recuperar o en última instancia disipar esta energía.

La primera estrategia a explorar es evitarla y para ello se debe concebir un trazado que permita minimizar esta componente de la energía consumida. Si no fuera posible evitarla, desde la misma fase de diseño se deberá estudiar la posibilidad de recuperarla o de reducirla, con la instalación de bombas trabajando como turbinas (PATs) o válvulas reductoras de presión (PRVs), respectivamente. Estas dos últimas acciones están bien documentadas en la literatura (Guigni et al., 2013; Corcoran et al., 2015; Fontana et al., 2016). Este trabajo se centra en la primera de las acciones, la racionalización del diseño, fase crucial, pues como se ha dicho, la mayoría de los sistemas han sido diseñados de espaldas a los problemas energéticos. Para ello, se recurre a estudiar una red de referencia como es la red propuesta en 1989 por Gemanopoulos y Jowitt (Germanopoulos y Jowitt, 1989), red extensamente difundida y utilizada en diferentes estudios desde su publicación en 1990 por Jowitt y Xu (Jowitt y Xu, 1990).

En este caso se reproduce el modelo matemático de la red con EPANET para realizar su auditoría energética (Cabrera et al., 2010) y posteriormente compararla con los resultados obtenidos por el análisis realizado por otros investigadores tras la instalación de PRVs (Nicolini y Zovatto, 2009). Una vez analizados estos dos casos de estudio, se exploran diferentes escenarios para las mejoras energéticas de la red, planteando alternativas tanto en la fuente de suministro como en el diseño del sistema, estas últimas basadas en la minimización de la energía topográfica. Su análisis demuestra cómo además de mejorar la eficiencia energética de la red, se consiguen los mismos objetivos para los que se concibió, reducir las fugas, ya que los estudios realizados en esta red de referencia se centraron en disminuir las fugas del sistema mediante la incorporación de PRVs, analizando a través de algoritmos de optimización tanto el lugar óptimo de instalación como la apertura necesaria a lo largo del día para disminuir al máximo las fugas a través de la reducción de presión en el sistema.

El análisis energético de la instalación como estrategia de mejora de la eficiencia energética, con la consiguiente reducción de fugas, no ha sido llevado a cabo en ninguna de las publicaciones previas.

2. ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA

En lo que sigue se recuerdan un conjunto de conceptos necesarios para comprender los desarrollos realizados. La notación utilizada coincide con la establecida previamente (Cabrera et al., 2010 y Cabrera et al., 2015). En efecto, contabilizar y poner cifras a la energía que interviene en una red es posible con una auditoría energética, que permita conocer de qué forma se distribuye la energía total aportada y consumida, a partir de los resultados derivados del modelo matemático del sistema. La energía aportada podrá ser natural ($E_{sr,n}$) si el abastecimiento se realiza por gravedad desde embalses o depósitos, o de eje ($E_{sr,p}$) si el suministro requiere un bombeo. Esta energía aportada deberá ser igual a la consumida, que se dividirá en cinco términos:

- d) Energía entregada a los usuarios (E_u): es la energía que se entrega en los nudos de consumo del modelo, consecuencia del caudal que demandan los usuarios a la presión a la que se suministra.
- e) Energía disipada por fricción (E_{rf}): es la energía que se disipa por el rozamiento del agua con las tuberías del sistema.
- f) Energía disipada en válvulas (E_{rv}): ésta se debe a las pérdidas de carga que se da en las diferentes válvulas del abastecimiento.
- g) Energía perdida a través de fugas (E_{rl}): representa la energía embebida en las fugas, lo que exige que el modelo las incluya. De esta manera los modelos matemáticos que no tengan cargadas las fugas del sistema, obtendrán una energía perdida por fugas igual a cero, que no representará la realidad del abastecimiento.
- h) Otras pérdidas de energía (E_{ro}): cualquier pérdida energética que no esté contemplada en el resto de términos.

Lógicamente, interesa que la energía consumida se aproxime a la energía entregada a los usuarios. De este modo el resto de energías consumidas, las cuales se consideran pérdidas, serán menores. Pero además es importante analizar cómo se entrega esta energía útil, pues debe ser la mínima requerida, evitando en la medida de lo posible suministrar más presión de la que fijan los estándares de calidad (Cabrera et al., 2015). Esta energía entregada a los usuarios tiene tres componentes:

$$E_u = E_{uo} + E_{tr} + E_{er} \quad (1)$$

- a) Energía mínima requerida (E_{uo}): aquella que debe suministrarse a los usuarios para cumplir con la presión de referencia (P_0/γ) y el volumen de agua demandado. Corresponde al área azul de la Figura 1.
- b) Energía topográfica (E_{tr}): término energético que el sistema demanda debido a las irregularidades del terreno. Representa la energía que se debe aportar para alcanzar, prestando el servicio adecuado, la cota del nudo crítico, afectando al resto de nudos de consumo de menor cota, ya que para que el nudo más alto tenga presión el resto de nudos del sistema tendrán sobrepresión. De esta manera, en una red plana, la energía topográfica sería nula. Es proporcional al área gris claro de la Figura 1.
- c) Energía de exceso (E_{er}): es el exceso sobre la energía mínima requerida en el nudo crítico y por tanto en el resto de nudos. Tal exceso de energía es superflua porque se supera la mínima necesaria para garantizar en el nudo crítico la presión mínima, y por tanto debe ser eliminada. Se corresponde con el área gris oscuro de la Figura 1.

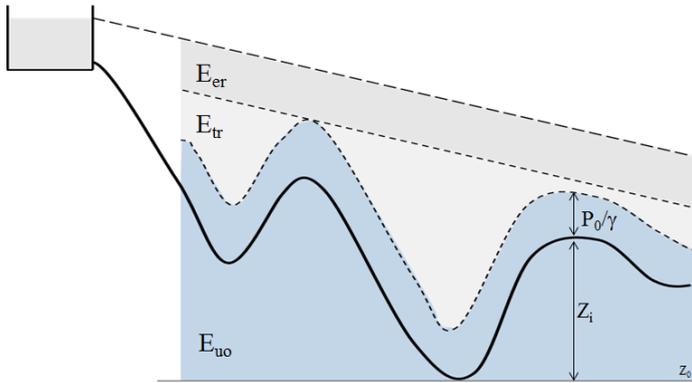


Figura 1. Términos de la energía suministrada a los usuarios.

El valor de estas energías permitirá evaluar la eficiencia del sistema. Organizadas en una serie de indicadores hídricos y energéticos ayudarán a entender el estado de la red. Como indicadores hídricos se utilizan el rendimiento volumétrico y las fugas por unidad de longitud:

- a) Rendimiento volumétrico (η_v): indicador hídrico que permite evaluar las fugas del sistema relacionando el volumen de agua suministrado con el volumen de agua inyectado. Su valor corresponde con el porcentaje de volumen de agua consumido. Conviene recordar que este indicador no es adecuado para establecer comparaciones entre sistemas. Pero utilizarlo para caracterizar la evolución de un mismo sistema, por representativo, sí tiene interés.
- b) Fugas por unidad de longitud: se calcula a partir del total del volumen fugado, de la longitud de tuberías de la red y del tiempo de simulación del modelo, según la expresión (2).

$$\text{Fugas por unidad de longitud} = \frac{V_{\text{fugado}}}{L_{\text{total}} \cdot t} \quad (2)$$

Como indicadores energéticos se utiliza el rendimiento ideal y el rendimiento real del sistema, comparando uno con otro se puede estimar cuán cerca estamos de la mejor versión energética de la red:

- a) Rendimiento ideal (η_{ai}): Este valor es inalcanzable, pues está calculado sin considerar ningún tipo de pérdidas, es decir, admitiendo un comportamiento ideal del sistema. Por ello relaciona la energía mínima requerida de la red (E_{uo}) con la energía suministrada ideal (E_{si}) según la expresión (3).

$$\eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} \quad (3)$$

- b) Rendimiento real (η_{ar}): este indicador energético tiene en cuenta las pérdidas y permite cuantificar la eficiencia de la red relacionando la energía mínima requerida por los usuarios (E_{uo}) y la energía suministrada real al sistema (E_{sr}) según la expresión (4). Este indicador debe ser lo más próximo posible al rendimiento ideal, que aun siendo inalcanzable fija el máximo rendimiento del sistema.

$$\eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{sr}} \quad (4)$$

Una vez conocida, evaluada y cuantificada la distribución de energías del sistema, el objetivo es mejorar la eficiencia energética del mismo, para ello se deben tomar determinadas medidas a llevar a cabo en la red, salvaguardando en todo momento los estándares de servicio establecidos. La decisión sobre las medidas a implementar, ya sean operacionales o estructurales, vendrá regida por los datos extraídos de la auditoría energética. Por ejemplo, no parece lógico centrar esfuerzos en reducir las pérdidas si el componente de la energía perdida en fugas es minoritario. Se deberá evitar cualquier tipo de exceso de energía, en el caso de suministro con energía natural tratando de reducir la altura de depósitos y embalses hasta la mínima que permita abastecer en las condiciones de servicio al nudo más desfavorable. Si la energía es de eje, deberá ajustarse el punto de funcionamiento de las bombas a aquel que permita dotar al nudo más desfavorable del caudal demandado bajo las condiciones de presión establecidas. Para ello se hace uso de bombas de velocidad variable (BVV) que permitan adaptar en todo momento el punto de trabajo de la bomba al requerido por el nudo más desfavorable, operando de esta manera el sistema en su punto óptimo.

Por otro lado se deberán seleccionar aquellas medidas que permitan reducir al mínimo cualquier tipo de pérdida, ya sea utilizando bombas más eficiente, reduciendo las pérdidas por fricción con el cambio de tuberías, o tratando de reducir las fugas mediante una correcta gestión de la presión con la instalación de PRVs, o con el cambio de tuberías; incluso con la mejora del diseño del suministro. El objetivo es claro, tratar de disminuir al máximo cualquier tipo de pérdidas existente en el sistema.

3. CASO DE ESTUDIO

Como se ha dicho anteriormente, se plantea analizar y mejorar la eficiencia de la red propuesta en 1989 por Gemanopoulos y Jowitt, representada en la Figura 2 y analizada por diferentes autores (Vairavamoorthy y Lumbers, 1998; Araujo et al., 2006; Campisano et al., 2009; Fecarotta et al., 2015). Para ello, en primer lugar se crea su modelo matemático con EPANET (Rossman, 2000) y a continuación se realiza la auditoría energética, comparándola posteriormente con la auditoría que se obtiene tras la instalación de PRVs tal cual se propone en un trabajo previo (Nicolini y Zovatto, 2009).

3.1. Características de la red

La red está compuesta por 25 nudos y 37 tuberías. De los 25 nudos, tres de ellos son embalses y están encargados del suministro del sistema, 13 tienen demandas base con una demanda total de 150 l/s, mientras que los otros 9 no tienen demanda base asignada. Las propiedades de los nudos y las tuberías, Tabla 1, se han extraído del artículo original (Jowitt y Xu, 1990). En la red inicial, el nivel de los embalses varía 1.5 m a lo largo del día, siguiendo un esquema habitual de llenado durante períodos nocturnos, cuando el bombeo es más barato. En este análisis se mantiene el nivel de cada depósito constante, en línea con análisis posteriores (Nicolini y Zovatto, 2009), siendo sus valores 54.66 m, 54.60 m y 54.5 m (nudos 23, 24 y 25 respectivamente).

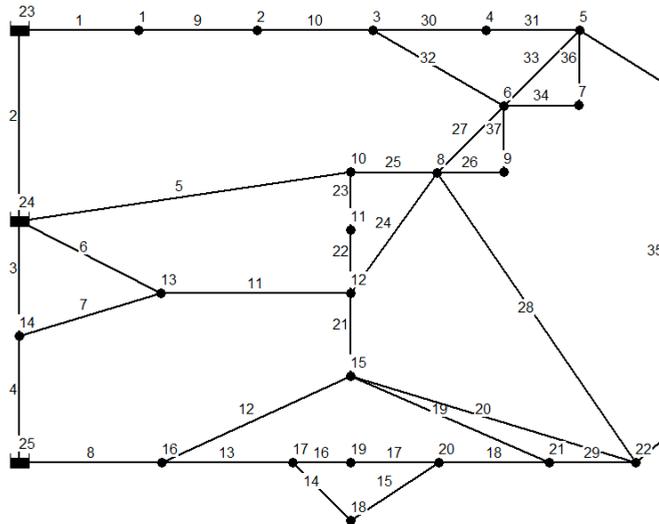


Figura 2. Esquema de la red.

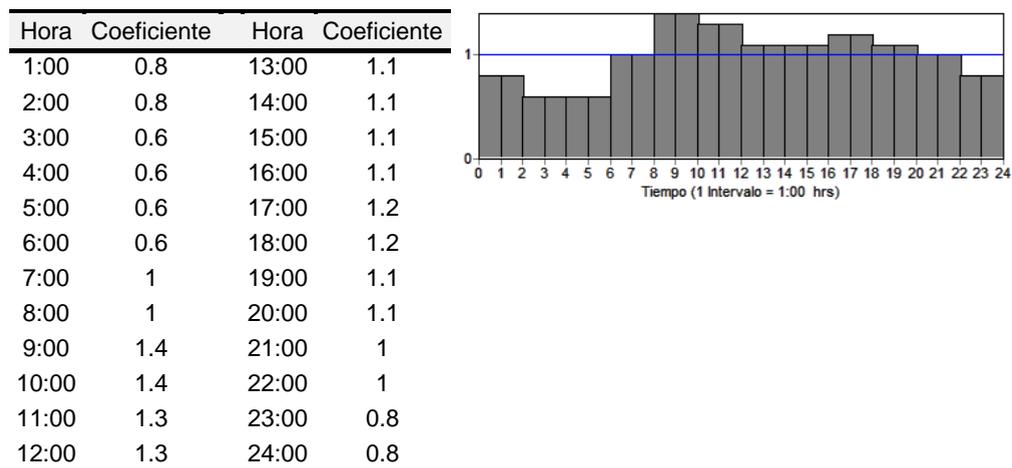
Tabla 1. Características de nudos y tuberías

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Coficiente C_{HW}	Nudo	Cota (m)	Demanda base (l/s)	Coficiente emisor (K)
Tubería 1	606	457	110	Conexión 1	18	5	0.0127
Tubería 2	454	457	110	Conexión 2	18	10	0.0354
Tubería 3	2782	229	105	Conexión 3	14	0	0.0338
Tubería 4	304	381	135	Conexión 4	12	5	0.0059
Tubería 9	1930	457	110	Conexión 5	14	30	0.0193
Tubería 10	5150	305	10	Conexión 6	15	10	0.0202
Tubería 30	326	152	100	Conexión 7	14.5	0	0.0056
Tubería 31	844	229	100	Conexión 8	14	20	0.0189
Tubería 32	1274	152	100	Conexión 9	14	0	0.0037
Tubería 34	615	381	110	Conexión 10	15	5	0.0209
Tubería 33	1115	229	90	Conexión 11	12	10	0.0066
Tubería 36	500	381	110	Conexión 12	15	0	0.0257
Tubería 27	743	381	110	Conexión 13	23	0	0.0177
Tubería 26	443	229	90	Conexión 14	20	5	0.0205
Tubería 37	300	229	90	Conexión 15	8	20	0.0304
Tubería 23	542	229	90	Conexión 16	10	0	0.0142
Tubería 22	777	229	90	Conexión 17	7	0	0.0115
Tubería 25	249	305	105	Conexión 18	8	5	0.0056
Tubería 5	3383	305	100	Conexión 19	10	5	0.0097
Tubería 6	1767	475	110	Conexión 20	7	0	0.0114

Tubería 7	1014	381	135	Conexión 21	10	0	0.0212
Tubería 12	914	229	125	Conexión 22	15	20	0.0368
Tubería 8	1097	381	6				
Tubería 14	411	152	100				
Tubería 13	822	305	140				
Tubería 16	1072	229	135				
Tubería 17	864	152	90				
Tubería 19	832	152	90				
Tubería 20	2334	152	100				
Tubería 28	931	229	125				
Tubería 18	711	152	90				
Tubería 35	1408	152	100				
Tubería 24	1600	457	110				
Tubería 15	701	229	110				
Tubería 29	2689	152	100				
Tubería 21	1996	229	95				
Tubería 11	762	457	110				

La demanda base de cada nudo se ve afectada por unos coeficientes encargados de representar el patrón de consumo diario. Estos coeficientes (Tabla 2), corresponden al artículo original (Jowitt y Xu, 1990), y se aprecia cómo en las horas centrales del día la demanda es máxima, mientras que en horario nocturno la demanda es mínima. Esto afectará a la evolución de presiones en la red, y por lo tanto a las fugas, aspecto clave de la eficiencia de estos sistemas.

Tabla 2. Coeficientes y gráfica del patrón de consumo



El caudal fugado a través de cada nudo se representa en el modelo matemático realizado con EPANET mediante emisores que permiten descargar por cada nudo un determinado caudal en función de la presión. Se modelan siguiendo la expresión (5):

$$Q_f = K \cdot (P)^\gamma \quad (5)$$

siendo γ el exponente del emisor que en el caso de estudio tiene un valor constante igual a 1,18. De otra parte, el coeficiente K del emisor se ha calculado a partir de la expresión (6):

$$K = C_L \cdot 0,5 \cdot \sum L_{ij} \quad (6)$$

donde C_L toma un valor de 10^{-5} . La longitud de tubería aplicada a cada emisor es la mitad del total de longitudes que llegan a cada nudo, cuanto más longitud de tubería confluye en un nudo, más posibilidad tiene de fugar. De este modo los coeficientes del emisor K para cada nudo del sistema son los que aparecen en la Tabla 1.

3.2. Análisis energético de la red

Una vez elaborado el modelo matemático de la red de estudio, se realiza su auditoría hídrica y energética siguiendo la metodología previamente desarrollada (Cabrera et al, 2010), con la intención de obtener de qué manera se distribuye el agua y la energía a lo largo del sistema. La auditoría hídrica permitirá tener un conocimiento del porcentaje de fugas existen en la red, y por ende del rendimiento volumétrico de la misma, el cual está próximo al 85 %.

Pese al notable rendimiento de la red desde el punto de vista de las fugas, los trabajos previos ya referidos se han centrado en reducir el volumen fugado gestionando la presión en la red con PRVs. Sin embargo nadie ha planteado el análisis energético como medida para tratar de buscar una alternativa más eficiente energéticamente y que cumpla con el objetivo de la reducción de fugas. En la Tabla 3 pueden verse los resultados de la auditoría realizada en la red inicial de estudio.

Tabla 3. Resultados de la auditoría realizada en la red inicial

Auditoría hídrica	m ³ /día	%
Volumen inyectado total	15320	100
Volumen consumido	12960	84.59
Volumen fugado	2360	15.41
Auditoría energética	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	1529	77.01
Energía mínima requerida	1289	84.28
Energía de exceso	7.3	0.48
Energía topográfica entregada	233	15.24
Energía topográfica disipada en válvulas	0	0.00
Energía disipada por fricción	175	8.81
Energía perdida a través de las fugas	282	14.19
Energía total consumida	1986	

Una vez realizada la auditoría energética, se comprueba que el 77 % de la energía consumida es energía entregada a los usuarios, representando la energía mínima requerida el 84 %, mientras que la topográfica supone un 15 %, no existiendo apenas energía de exceso. En cuanto a las pérdidas energéticas del sistema, corresponde principalmente a la embebida en fugas y en menor medida a la fricción de tuberías. Realizando un análisis de las características de la red, se encuentra la explicación a estos datos energéticos. Las cotas del sistema oscilan entre 7 y 23 m, encontrándose la cota más alta en el nudo 13, justo a la salida del depósito 24. Para poder ofrecer la presión de servicio en este nudo, es necesario dotar a los depósitos de suficiente altura, implicando que el resto de nudos sufran una serie de sobrepresiones, ya que están a menor cota. He aquí la explicación a la energía topográfica que se debe entregar a los usuarios.

En cuanto a la energía disipada por fricción, se observa que el coeficiente de Hazen Williams (C_{HW}) de algunas tuberías es extremadamente bajo. En efecto, en las tuberías 10 y 8, el C_{HW} es de 10 y 6 respectivamente, cuando valores típicos para tuberías de polietileno rondan los 140 (Jeppson, 1976). Localizando estas tuberías, se observa como la tubería 8 se encuentra a la salida del depósito 25, condicionando el abastecimiento de la zona inferior de la red. Mientras que la

tubería 10 está aguas abajo del depósito 23, ocurriendo una situación similar a la del tubo 8, pero ahora condicionando el suministro de la parte superior.

Este análisis de las características de la red a partir de los resultados de la auditoría energética permitirá llevar a cabo una serie de medidas a implementar para mejorar la eficiencia del sistema, comenzando por la instalación de PRVs tal como ha sido propuesto previamente (Nicolini y Zovatto, 2009).

3.3. Instalación de PRVs

Analizada la red inicial, se han replicado los resultados obtenidos en otro de los estudios realizados sobre este sistema (Nicolini y Zovatto, 2009), donde se decide instalar 5 PRVs, cuyo emplazamiento se optimizó utilizando técnicas de algoritmos genéticos multiobjetivo, indicando además las pérdidas introducidas por cada válvula para 3 escenarios diferentes: demanda mínima, media y máxima de la red.

La auditoría hídrica y energética de este caso es la que muestra la Tabla 4. Se observa que el volumen inyectado total disminuye debido a que el volumen fugado se ha reducido con la instalación de las PRVs y la consiguiente reducción de presiones. Parte de la energía topográfica entregada a los usuarios es disipada por las PRVs. Sin embargo se observa que la energía total consumida es similar (apenas una reducción del 2.5% con las PRVs).

Tabla 4. Resultados de la auditoría de la red tras la instalación de PRVs

Auditoría hídrica	m ³ /día	%
Volumen inyectado total	14933	100
Volumen consumido	12960	86.79
Volumen fugado	1973	13.21
Auditoría energética	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	1356	70.04
Energía mínima requerida	1289	95.09
Energía de exceso	1.6	0.12
Energía topográfica entregada	65	4.79
Energía topográfica disipada en válvulas	190	9.81
Energía disipada por fricción	182	9.40
Energía perdida a través de las fugas	208	10.74
Energía total consumida	1936	

4. ESCENARIOS PLANTEADOS

Tras la elaboración del modelo matemático de la red y su análisis energético, tanto con los datos de la red inicial como con los de la red tras la instalación de PRVs, se proponen una serie de medidas para mejorar la eficiencia energética del sistema, fundamentalmente con cambios en las fuentes de suministro. Finalmente, y buscando mejoras adicionales, se rediseña la red, desacoplando el abastecimiento en varios sectores y aumentando los diámetros de algunas tuberías clave. El trabajo concluye con su comparación final.

4.1. Mejoras por ajuste de la energía suministrada

Descenso de depósitos

El exceso de energía suministrada en el sistema es mínimo, aun así, siguiendo con la intención de eliminarla se plantea en primer lugar descender el nivel de los depósitos al mínimo necesario para satisfacer las condiciones de servicio. Tal como muestra la Tabla 5, con esta alternativa la energía de exceso prácticamente desaparece al estar dotando el nudo más desfavorable de la presión mínima requerida en los momentos de máxima demanda. Esto permite reducir la presión de la red y por lo tanto la energía perdida a través de las fugas. Sin embargo, el perfil del abastecimiento sigue siendo un obstáculo, representando la energía topográfica casi el 14 % de la energía entregada a los usuarios.

Junto al descenso de depósitos se plantea la posibilidad de instalar dos PRVs para disipar la energía topográfica existente. Esto permite reducir la presión y por lo tanto el volumen fugado. Con el cierre de las PRVs el caudal se redistribuye a lo largo de la red a través de tuberías que no están dimensionadas para tal efecto, teniendo como consecuencia un aumento de la energía disipada por fricción, siendo la energía total consumida ligeramente inferior pero similar a la del caso precedente.

Tabla 5. Resultados de la auditoría de la red tras el descenso del nivel de depósitos y la instalación de PRVs

Auditoría hídrica	Descenso depósitos		Con PRVs	
	m ³ /día	%	m ³ /día	%
Volumen inyectado total	15230	100	14967	100
Volumen consumido	12960	85.10	12960	86.59
Volumen fugado	2270	14.90	2007	13.41
Auditoría energética	kWh	%	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	1491	76.96	1378	72.53
Energía mínima requerida	1289	86.42	1289	93.51
Energía de exceso	1.2	0.08	1.2	0.09
Energía topográfica entregada	201	13.50	88	6.40
Energía topográfica disipada en válvulas	0	0	88	4.65
Energía disipada por fricción	183	9.43	219	11.54
Energía perdida a través de las fugas	264	13.61	214	11.27
Energía total consumida	1938		1901	

Suministro con bombas de velocidad variable

Para tratar de aportar en todo momento el caudal y presión de servicio en los nudos más desfavorables, y no únicamente en los momentos de máxima demanda como en el caso anterior, se plantea un cambio en el suministro, sustituyendo el bombeo a depósitos y posterior suministro por gravedad, por un bombeo directo con bombas de velocidad variable que permitan aportar en cada instante la energía necesaria desde las tres fuentes de suministro existentes, de esta manera se pretende que el sistema trabaje en su punto de funcionamiento óptimo en todo momento. La cota de aspiración de las bombas se sitúa a una altura igual a la de la cota del nudo más bajo, 7 m, ya que esta cota sirve de nivel de referencia para realizar la auditoría energética. El rendimiento de las bombas será del 100 % con la intención de poder comparar este escenario con el escenario inicial, en el que el agua se bombea a los depósitos desde los que se realiza el suministro, pero sin tener en cuenta el rendimiento de las bombas ni el gasto energético de las mismas consumido para tal fin.

Con esta alternativa tanto el volumen fugado como la energía perdida en fugas disminuye, aunque la energía topográfica sigue siendo un componente importante debido a la propia topografía de la red.

Tabla 6. Resultados de la auditoría de la red con bombeo directo utilizando bombas de velocidad variable

Auditoría hídrica	m ³ /día	%
Volumen inyectado total	15212	100
Volumen consumido	12960	85.20
Volumen fugado	2252	14.80
Auditoría energética	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	1485	77.08
Energía mínima requerida	1289	86.81
Energía de exceso	1	0.07
Energía topográfica entregada	195	13.12
Energía topográfica disipada en válvulas	0	0
Energía disipada por fricción	181	9.42
Energía perdida a través de las fugas	260	13.5
Energía total consumida	1926	

4.2. Mejoras en el diseño de la red

Como con los cambios de las fuentes de suministro apenas se consiguen mejoras hídricas y energéticas, se plantea modificar su diseño con la intención de reducir la energía topográfica, y por consiguiente el resto de pérdidas de la red.

Sectorización del sistema en 3 sectores

Tras analizar la topografía y características de la red, se plantea la posibilidad de desacoplarla en tres subsistemas diferentes agrupados por similitud de cotas en los nudos de consumo (Figura 3). De esta manera la bomba 23 se encargará de abastecer al sector 1, zona superior de la red que comprende los nudos 1 y 2, cuya cota en ambos casos es de 18 m. Este sector se aísla del resto de sistema con el cierre de la tubería 10, cuya pérdida de carga, debido al bajo C_{HW} , es muy elevada, lo que ayudará a disminuir las pérdidas por fricción.

La bomba 25 estará destinada al suministro del sector 3, parte inferior de la red que incluye siete nudos con una diferencia de tres metros entre la cota mínima (7 m) y máxima (10 m). Además, para reducir la pérdida por fricción producida por el bajo C_{HW} de la tubería 8 se sustituye por una nueva de diámetro interior igual a 423.3 mm y C_{HW} de 140. Se aprovecha este cambio para aumentar su diámetro, lo que permite disminuir tanto la energía disipada por fricción, como la curva de la bomba que abastece esta zona.

Por último, la bomba 24 estará encargada de abastecer el sector 2, zona central del abastecimiento con cotas comprendidas entre los 12 y 23 m. En este caso la diferencia de cotas es bastante grande debido a los nudos 13 y 14 situados a la salida de la bomba, que obligan al resto de nudos de este sector a estar sometidos a presiones por encima de la de servicio, lo que hace que en este caso la energía topográfica todavía sea un componente energético a tener en cuenta.

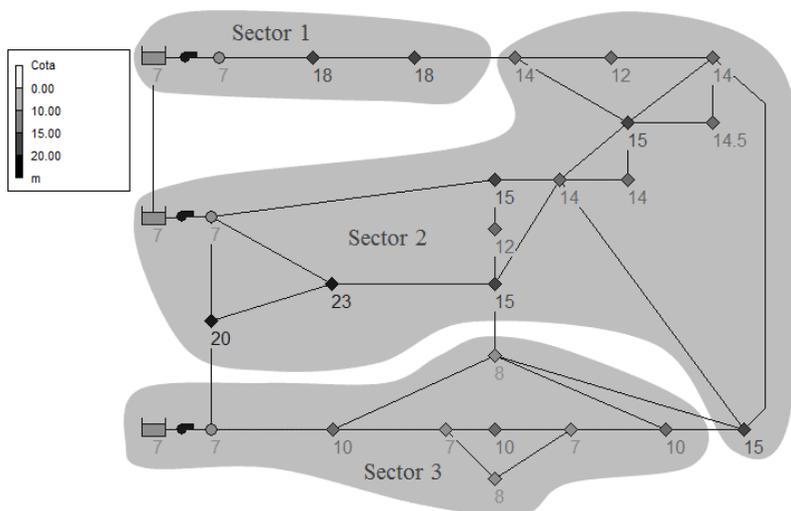


Figura 3. Sectorización del sistema en tres sectores

La auditoría hídrica y energética se realiza de forma independiente para cada uno de los tres sectores definidos, puesto que los resultados de uno no afectan al resto. La suma de los resultados de las tres auditorías conforma la auditoría hídrica y energética final del sistema, tal y como puede verse en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de la auditoría tras desacoplar la red en tres sectores

	Sector 1		Sector 2		Sector 3		TOTAL	
Auditoría hídrica	m ³ /día	%						
Volumen inyectado total	1530	100	10464	100	3133	100	15127	100
Volumen consumido	1296	84.71	9072	86.70	2592	82.73	12960	85.70
Volumen fugado	234	15.29	1392	13.30	541	17.27	2167	14.30
Auditoría energética	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%
En. entregada a los usuarios	146	84.57	1084	79.83	238	79.61	1468	80.15
En. mínima requerida	145	98.99	923	85.16	221	93.09	1289	87.95
En. de exceso	1.5	1.01	0.3	0.03	0	0	1.8	0.02
En. topográfica entregada	0	0	161	14.81	16	6.91	177	12.03
En. topog. disipada en válvulas	0	0	0	0	0	0	0	0
En. disipada por fricción	0.3	0.15	105	7.75	11	3.64	116	6.51
En. perdida en las fugas	26	15.27	169	12.42	50	16.75	245	13.35
Energía total consumida	173		1358		299		1829	

Sectorización del sistema en 4 sectores

Con la intención de reducir la energía topográfica del sector 2, se instala una cuarta bomba encargada de abastecer únicamente a los nudos 13 y 14 de mayor cota, formando así un nuevo sector, el sector 4. Con esta actuación se consigue que las cotas en el sector 2 sean más uniformes, con una diferencia entre la cota mínima y máxima de únicamente tres metros, frente a los once metros del caso anterior. De esta manera la energía entregada a los usuarios está representada prácticamente en su totalidad por la energía mínima requerida, reduciéndose la energía de exceso y la energía topográfica casi hasta desaparecer, como puede verse en la Tabla 8. Lógicamente, al desacoplarse el sistema, las auditorías del sector 1 y 3 no varían.

En cambio, la energía total consumida aumenta considerablemente debido al aumento de la energía disipada por fricción del sector 2. Esto se debe a que el dimensionado inicial del abastecimiento no está preparado para el nuevo diseño, ya que el abastecimiento se pensó para abastecer al sector 2 con las tuberías 3, 5 y 6, mientras que ahora se realiza únicamente a través de la tubería 5, es decir, el caudal que antes circulaba por tres líneas ahora circula por una. Para solventar este problema se requiere la sustitución de algunas tuberías del sector 2 por tuberías de

diámetro mayor y menor rugosidad, lo que permitirá obtener valores aceptables de energía disipada por fricción.

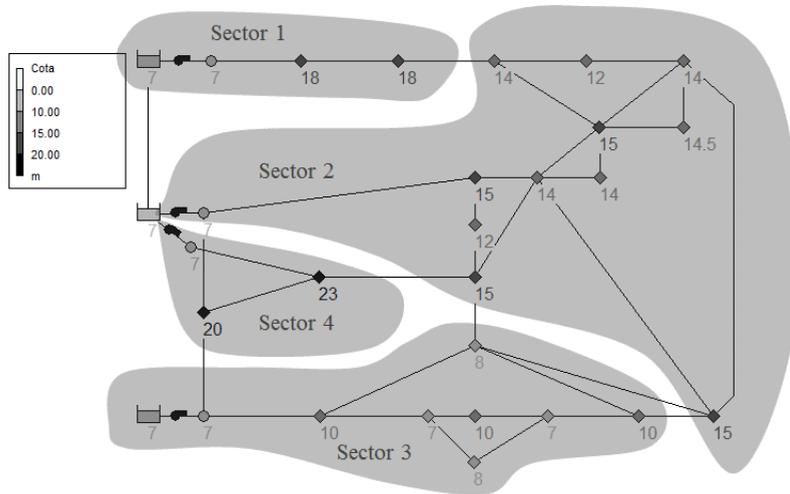


Figura 4. Sectorización del sistema en cuatro sectores

Tabla 8. Resultados de la auditoría tras desacoplar la red en cuatro sectores

	Sector 1		Sector 2		Sector 3		Sector 4		TOTAL	
Auditoría hídrica	m ³ /día	%								
Volumen inyectado total	1530	100	9646	100	3133	100	627	100	14936	100
Volumen consumido	1296	84.71	8640	89.57	2592	82.73	432	68.90	12960	86.77
Volumen fugado	234	15.29	1005	10.43	541	17.27	195	31.10	1975	13.23
Auditoría energética	kWh	%								
En. entregada a los usuarios	146	84.57	919	40.47	238	79.61	54	68.84	1358	48.10
En. mínima requerida	145	98.99	872	94.88	221	93.09	51	93.2	1289	94.94
En. de exceso	1.5	1.01	0.25	0	0	0	0.16	0.3	1.9	0.17
En. topog. entregada	0	0	46.8	5.09	16	6.91	3.5	6.5	66	4.89
En. topog. disipada en válv.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
En. disipada por fricción	0.3	0.15	1245	54.82	11	3.64	0.04	0.05	1257	44.53
En. perdida en las fugas	26	15.27	107	4.72	50	16.75	25	31.11	208	7.37
En. total consumida	173		2272		299		79		2823	

Redimensionado del sector 2

Para concretar las tuberías a redimensionar, se analiza las pérdidas unitarias de carga introducidas por las tuberías pertenecientes al sector 2, observando que las tuberías 5 y 25 son con diferencia las tuberías que mayores pérdidas de carga unitaria introducen en el sector, llegando a valores de 20.92 m/km, por lo que se aumentará el diámetro de estos tubos hasta conseguir que la pérdida de carga ronde los 1.5 m/km. Esto se consigue dotando a estas tuberías de un diámetro interior de 470.3 mm y un C_{HW} de 140, valor típico para tuberías de polietileno, como se ha citado anteriormente.

Con este cambio en el diseño de las tuberías se consiguen valores de energía disipada por fricción aceptables, y consecuentemente una reducción notoria de la energía consumida por el abastecimiento, como puede verse en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de la auditoría tras desacoplar la red en cuatro sectores y redimensionar el sector 2

	Sector 1		Sector 2		Sector 3		Sector 4		TOTAL	
Auditoría hídrica	m ³ /día	%								
Volumen inyectado total	1530	100	9635	100	3133	100	627	100	14925	100
Volumen consumido	1296	84.71	8640	89.67	2592	82.73	432	68.90	12960	86.83
Volumen fugado	234	15.29	995	10.33	541	17.27	195	31.10	1965	13.17
Auditoría energética	kWh	%								
En. entregada a los usuarios	146	84.57	915	81.84	238	79.61	54	68.84	1353	81.12
En. mínima requerida	145	98.99	872	95.38	221	93.09	51	93.2	1289	95.28
En. de exceso	1.5	1.01	0	0	0	0	0.16	0.3	1.7	0.13
En. topog. entregada	0	0	42.3	4.62	16	6.91	3.5	6.5	62	4.59
En. topog. disipada en válv.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
En. disipada por fricción	0.3	0.15	97.7	8.74	11	3.64	0.04	0.05	109	6.53
En. perdida en las fugas	26	15.27	105	9.42	50	16.75	25	31.11	206	12.35
En. total consumida	173		1118		299		79		1668	

5. RESULTADOS

Tras un análisis en profundidad de las características de la red de estudio, se han estudiado diferentes alternativas a llevar a cabo con el fin de mejorar la eficiencia energética del sistema. Se ha comprobado que los cambios en la fuente de suministro no supone una mejora energética sustancial. Esto es debido a la propia topografía de la red, que obliga a entregar a la mayoría de usuarios más presión de la necesaria para abastecer a los nudos críticos con la presión de servicio establecida, es decir, hay que prestar especial atención al componente de energía topográfica si se desea mejorar la eficiencia del sistema. Por ello, la opción de modificar la fuente de suministro debe ir acompañada de un rediseño del abastecimiento que permita evitar en la medida de lo posible la energía de exceso y topográfica suministrada en la red.

Para lograr este objetivo, finalmente se decide desacoplar la red en cuatro sectores compuestos por nudos de consumo de cotas similares, con la intención de minimizar la energía topográfica de cada sector. El suministro a cada sector se realizará de forma independiente mediante un bombeo directo con bombas de velocidad variable que permita aportar en cada instante el volumen demandado a la presión de servicio en el nudo más desfavorable.

De este modo cada bombeo se encarga de abastecer a nudos con cotas muy similares, reduciéndose casi hasta desaparecer la energía topográfica del sistema. El problema que aparece con esta alternativa es la cantidad de energía disipada por fricción por condicionantes del dimensionado inicial. Su solución requiere la sustitución de dos tuberías por tuberías de diámetro mayor y menor rugosidad, lo que permite obtener valores aceptables de energía disipada por fricción, reduciendo de esta manera considerablemente la energía consumida por la red, como se observa en la Tabla 10.

Los indicadores que aparecen en la Tabla 11, muestran como tanto el rendimiento volumétrico, como el ideal y el real aumentan considerablemente con la última alternativa planteada, mientras que las fugas por unidad de longitud disminuyen. Del mismo modo se observa que el rendimiento real se aproxima notablemente al rendimiento ideal e inalcanzable de la red.

Tabla 10. Resumen de los resultados obtenidos en la auditoría de cada alternativa estudiada

	Inicial		PRVs		Descenso		BVV		3 sectores		4 sectores	
Auditoría hídrica	m ³ /día	%										
Volumen inyectado total	15320	100	14933	100	15230	100	15212	100	15127	100	14925	100
Volumen consumido	12960	84.59	12960	86.79	12960	85.10	12960	85.20	12960	85.70	12960	86.83
Volumen fugado	2360	15.41	1973	13.21	2270	14.90	2252	14.80	2167	14.30	1965	13.17
Auditoría energética	kWh	%										
En. entregada a usuarios	1529	77.01	1356	70.04	1491	76.96	1485	77.08	1468	80.15	1353	81.12
En. mínima requerida	1289	84.28	1289	95.09	1289	86.42	1289	86.81	1289	87.95	1289	95.28
En. de exceso	7.3	0.48	1.6	0.12	1.2	0.08	1	0.07	1.8	0.02	1.7	0.13
En. topog. entregada	233	15.24	65	4.79	201	13.50	195	13.12	177	12.03	62	4.59
En. topog. disipada en válv.	0	0.00	190	9.81	0	0.00	0	0	0	0	0	0
En. disipada por fricción	175	8.81	182	9.40	183	9.43	181	9.42	116	6.51	109	6.53
En. perdida en las fugas	282	14.19	208	10.74	264	13.61	260	13.5	245	13.35	206	12.35
En. total consumida	1986		1936		1938		1926		1829		1668	

Tabla 11. Indicadores hídricos y energéticos de cada alternativa estudiada

		Inicial	PRVs	Descenso	BVV	3 sectores	4 sectores
Indicadores hídricos	Rendimiento volumétrico (%)	84.59	86.79	85.1	85.2	85.7	86.8
	Fugas por km (m ³ /km h)	2.22	1.86	2.14	2.12	2.04	1.84
Indicadores energéticos	Rendimiento ideal	0.74	0.74	0.74	0.82	0.83	0.83
	Rendimiento real	0.65	0.66	0.66	0.67	0.71	0.77

Con este diseño final del abastecimiento se ha logrado reducir la energía consumida en un 16 % respecto del diseño inicial (Jowitt y Xu, 1990), y en un 14 % con relación a posteriores refinamientos (Nicolini y Zovatto, 2009) con la inclusión de cinco PRVs. Conviene subrayar que de la energía consumida, el 81.12 % es energía entregada a los usuarios, de la cual el 95.28 % se corresponde con la energía mínima

requerida por los mismos, desapareciendo prácticamente tanto la energía de exceso como la topográfica.

Obviamente la modificación de tuberías, la instalación de una nueva bomba y los variadores de frecuencia conllevan unos costes de inversión a considerar. Teniendo en cuenta los costes de instalación de estos elementos, se estima una inversión necesaria de 800.000 €, mientras que el ahorro anual de energía supone 35.000 €, por lo que los costes de inversión se recuperarían en algo más de 20 años. Este periodo de recuperación de inversiones, a priori, es bastante elevado, pero no hay que olvidar que se parte de un abastecimiento diseñado de espaldas a la eficiencia energética.

Dicho de otro modo, el sistema está condicionado por el diseño inicial planteado. Si se cuantifica el coste correspondiente a la construcción de los tres depósitos iniciales, el coste de la inversión de la mejora planteada es inferior a la mitad del coste de éstos.

6. CONCLUSIONES

Este completo análisis evidencia que en el caso de estudio planteado la mejor opción para disminuir tanto la energía consumida por la red como el volumen fugado en la misma, hubiese sido realizar un correcto diseño de la misma, abasteciendo la red con una inyección directa a través de cuatro bombas de velocidad variable, con cada bomba alimentando a un sector definido a partir de las cotas de los nudos, de forma que se minimiza la energía topográfica y se elimina la de exceso, y por consiguiente la asociada a pérdidas en fugas.

El proceso realizado en este trabajo es perfectamente aplicable al estudio de otras redes y abastecimientos, únicamente faltará realizar el correspondiente estudio económico en cada caso. Aunque en esta ocasión parece evidente que el ahorro de construir y mantener tres depósitos es suficiente como para llevar a cabo esta alternativa, en la que únicamente se tendría que tener en cuenta la instalación de las tres tuberías redimensionadas y la bomba del sector 4, puesto que los otros tres bombeos ya existían para llenar los depósitos.

Las redes de agua a presión consumen energía, mayor o menor en función de las características de cada sistema, pero sin duda, suficiente como para tener en cuenta esta componente en el diseño de los mismos. Para ello se deben plantear diseños y estrategias que permitan minimizar al máximo la energía consumida, pero sobretodo tratando de minimizar las pérdidas energéticas, es decir, con un ecodiseño de la red desde su concepción inicial. En esta dirección deben enfocarse los futuros trabajos e investigaciones a realizar en el campo de la eficiencia energética de las redes de agua a presión.

REFERENCIAS

Araujo, L., Ramos, H., Coelho, S. 2006. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resources Management* 20(1), 133–149.

Cabrera, E., Pardo, M. A., Cobacho, R., Cabrera Jr., E. 2010. Energy Audit of Water Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(6), 669-677.

Cabrera, E., Gómez, E., Cabrera Jr., E., Soriano, J., Espert, V. 2015. Energy Assessment of Pressurized Water Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141(8).

Campisano, A., Creaco, E., Modica, C. 2009. RTC of valves for leakage reduction in water supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(1), 138–141

Corcoran, L., McNabola, A., Coughlan, P. 2015. Optimization of Water Distribution Networks for Combined Hydropower Energy Recovery and Leakage Reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000566.

Fecarotta, O., Aricò, C., Carravetta, A., Martino, R., Ramos, H.M. 2015. Hydropower Potential in Water Distribution Networks: Pressure Control by PATs. *Water Resources Management* 29, 699–714. DOI :10.1007/s11269-014-0836-3

Fontana, N., Giugni, M., Marini, G. 2016. Real Time Control of a Prototype for Pressure Regulation and Energy Production in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000651.

Germanopoulos, G., and Jowitt, P. W. 1989. Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, June, 87(2), 195-214.

Giugni, M., Fontana, N., Ranucci, R. 2013. Optimal Location of PRVs and Turbines in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000418.

Jeppson, R.W. 1976. *Analysis of flow in pipe networks*. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan, USA.

Jowitt, P.W., Xu, C. 1990. Optimal valve control in water distribution networks. *Journal Water Resources Planning and Management* 116(4), 455–472.

Nicolini, M. y Zovatto, L. 2009. Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Networks. *Journal Water Resources Planning and Management* 135(3), 178-187.

Rossman, L. A. 2000. *EPANET 2: User's manual*. U.S. EPA, Cincinnati.

Vairavamoorthy, K., Lumbers, J. 1998. Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(11), 1146–1154.

Apéndice III

Quick energy assessment of irrigation water transport systems

Cabrera, E.; del Teso, R.; Gómez, E.; Estruch-Juan, E.; Soriano, J.

Biosystems engineering, ISSN 1537-5110

Impact Factor 2018: 2,983. Rank: 7/57 (Q1). Agriculture, multidisciplinary.

Estado: publicado en 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.013>

A continuación, se expone la versión de
autor de este artículo adaptada al formato
de la tesis

ABSTRACT

Pressurised water transport systems are highly energy-intensive. Therefore, in the context of resource scarcity and climate change, efficiency is essential. To achieve this, it is necessary to (1) assess the state of the process and (2) evaluate the existing margin for potential improvement. These are the two objectives of this work, which is based on the energy intensity I_e (kW h m^{-3}) of a process that can simultaneously be expressed in units of pressure. Considering water transport, and its incompressible behaviour, there exists a biunivocal relationship between I_e and the sum of energy required to transport water, which can be expressed as equivalent height H (m, energy per unit of mass). From the energy intensity (I_e) and energy requirements (H), the efficiency of a water transport system in operation is evaluated. From installations in the design phase, the range of I_e values that are needed to achieve efficiency can be predicted. The proposed procedure is general, simple and precise, as demonstrated through three case studies.

Keywords: energy intensity; energy assessment; water transport systems; diagnostic of water; distribution system

1. INTRODUCTION

The main benefits of pressurised water transport are its flexibility (because its layout is compatible with the topography), water quality conservation (the pipe itself and its internal pressure maintain the water quality) and higher efficiency. That is why there is a general trend towards the transformation of classic irrigation channels into pressurised networks. Its weak point in pressurised water transport is the energy required which is associated with high costs and greenhouse gas emissions. It is, therefore, crucial to minimise the economic and environmental impacts of pressurised water transport that are responsible for a significant percentage of total energy consumption. In Europe, pumps (including those for industrial use) account for 10% of the electricity demand (Grundfos, 2014), whilst, in California, water transport represents 6% of the total energy demand (WW, 2013). In Spain, pressurised irrigation is responsible for only 3% of the total consumption (Cabrera, Pardo, Cabrera, & Cobacho, 2010a). The European Union's reviews of energy-saving objectives are aimed at least an 20% reduction by 2020 (EC European Commission, 2011) and 32.5% by 2030 (EC European Commission,

2019). Pressurised water transport should contribute to the achievement of these objectives.

Improving the performance of an operating pressurised water system requires both the identification of the current system state and the subsequent assessment of the margin for improvement that exists with the current level of available technology. In the design phase of new systems, energy efficiency must be a fundamental concern. This work synthesises previous research (Cabrera et al., 2015, 2018, 2019) focuses on their concepts and presents a quick assessment of the energy efficiency of the reported systems. The proposed method is accessible to a wide range of professionals.

2. FUNDAMENTALS OF QUICK ENERGY ASSESSMENT

A simple water transport system consists of movement between two points without any pressure requirements. The levels and distance between the two points determine the energy requirements. If the initial elevation, z_i , is lower than the final one, z_f , the system needs shaft (or pumping) energy. However, if $z_i > z_f$, water can move by gravity, although an additional contribution from pumping energy may be required to overcome friction, h_f , if it exceeds the available energy (i.e. $h_f > z_i - z_f$).

As gravitational energy has no costs, energy analyses have been concentrated on systems with pumping stations. This restrictive selection is nowadays unacceptable because no form of energy should be neglected. If a gravitational energy surplus exists, it can be recovered with turbines or PATs (Pumps as Turbines) to reduce energy loss. If that it is not economically feasible, energy can be dissipated with pressure-reducing valves (PRVs). In other words, efficiency analyses could be extended to all systems. This work starts with those systems that arouse the most interest (when pumping is needed) and these are later extended to other cases.

The methodology derived here is based on the equivalence between the units of the energy required to transport 1 m^3 of water, or energy intensity l_e , (kW h m^{-3}), and units of pressure (N m^{-2}). Since water density is constant, each l_e unit corresponds to pressure height on a 1:1 basis. This relationship, with $\gamma = 9810 \text{ N m}^{-3}$ in SI units, is

$$I_e \left(\frac{kWh}{m^3} \right) = 2.725 \cdot 10^{-3} H(m) \quad (1)$$

Therefore, 0.2725 kW h m⁻³ which is equivalent to 100 m of height.

However, water transport is not just a matter of its movement and elevation. In networks (and sometimes in simple systems as well) a specified service pressure, p_o , must be provided. In urban water networks, this pressure is established by standards (Ghorbanian, Karney, & Guo, 2016), whereas, in irrigation, it is set by the requirements of the devices (e.g. sprinklers or drippers). In short, in ideal systems, the energy intensity corresponding to the total energy needed (where p_i is the pressure at the origin) is:

$$I_e \left(\frac{kWh}{m^3} \right) = 2.725 \cdot 10^{-3} \left[(z_f - z_i) + \left(\frac{p_o}{\gamma} - \frac{p_i}{\gamma} \right) \right] (m) \quad (2)$$

In addition to useful energy, there are also inefficiencies (Cabrera et al., 2015) in pumping stations and in pipelines (through leaks and friction). There are metrics (η_p and η_l) corresponding to pumping and water efficiencies. But this is not the case for frictional losses, which, do not allow a similar concept to be established that defines a relationship between useful and required energy. Although frictional losses are inevitable, they must be added to energy needs. Thus, Eq. 3 includes friction, h_f , the sum of all losses in pipes and fittings ($h_f = \sum h_{fi}$). The equivalent height H is therefore

$$I_e \left(\frac{kWh}{m^3} \right) = 2.725 \cdot 10^{-3} \left[(z_f - z_i) + \left(\frac{p_o}{\gamma} - \frac{p_i}{\gamma} \right) + \left(\sum h_{fi} \right) \right] \quad (3)$$

The final I_e formula, referred to the delivered volume and including the inefficiencies and the natural energy ($z_i - z_l$), is

$$I_e \left(\frac{kWh}{m^3} \right) = \frac{2.725 \cdot 10^{-3}}{\eta_p \eta_l} H(m) \quad (4)$$

Other inefficiencies (such as the surplus of energy delivered) that are avoidable are not included.

Figure 1 graphically depicts Eq. 4 for different efficiency values ($\prod \eta_i = \eta_p \eta_l$), which range from the ideal case ($\prod \eta_i = 1$) to less efficient systems. To qualify the system's behaviour, in the l_e-H plane (Fig. 1), four zones are defined: zone A (excellent), zone B (reasonable), zone C (unsatisfactory) and zone D (unacceptable). The intersection of the horizontal line defined by the real value of l_e with the vertical line given by H (derived from Eq. 3, which includes frictional losses) indicates the global efficiency of the system. These zones are commented on below.

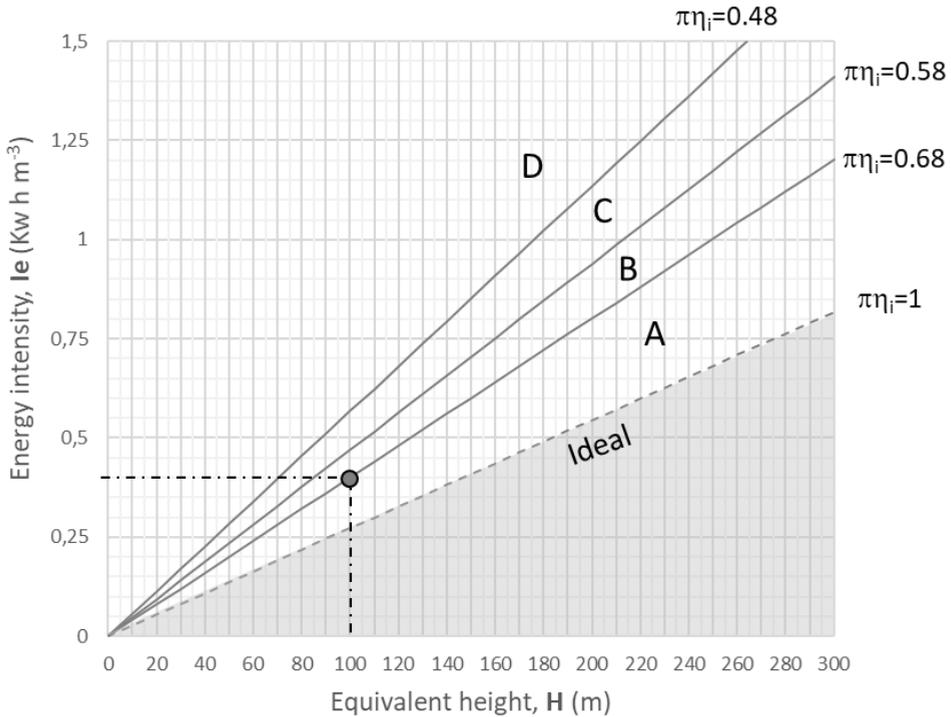


Figure 1. Assessment of the energy efficiency of a water transport system

The lower limit adopted for excellent efficiency (zone A in Fig. 1) corresponds to a frequently used point: $I_e = 0.4 \text{ kW h m}^{-3}$; $H = 100 \text{ m}$ (ERSAR & LNEC, 2013). It corresponds to pumping 100 m of height, with both ends at atmospheric pressure and a short pipe length. Therefore, $h_f \approx 0$, so $H \approx 100 \text{ m}$. Without leaks, this energy intensity corresponds to an overall pumping efficiency of 68%, which is a moderate value if current requirements are met (EC, 2012). Including leaks, this energy

intensity corresponds, to a pumping efficiency of 75% and a water efficiency of 90%. The other zones are separated successively by 10 points in the efficiency product.

Some final remarks apply:

- a) The inclusion of head losses and pressure requirements in H (Fig. 1) is key to generalising the scope of Fig. 1. Graphs considering only the net elevation in the abscissa H (Plappally & Lienhard, 2012) are of more limited use.
- b) In systems at the design phase, the real value of l_e is not yet known. In this case, using Fig. 1, H can anticipate the range of energy intensities corresponding to different efficiencies. For the friction height, the value $h_f = J_o(L + \sum L_{ei})$ must be adopted, where J_o is the optimal hydraulic slope (Cabrera et al., 2018), and L and L_{ei} are the length of the system and the equivalent lengths of the accessories, respectively.
- c) In simple systems, neither the pressure term, nor leakage inefficiencies, are usually involved.
- d) The values of the parameter $\prod \eta_i$ are indicators that should reflect the evolution of technological improvements. For example, in submersible pumps, replacing asynchronous motors by synchronous ones improves the efficiency, especially at partial load (Sperlich et al., 2018). In short, in Fig. 1, the values of $\prod \eta_i$ must reflect the saving targets.
- e) This assessment is based on the integral energy equation (a power balance) applied to systems limited by control-volumes (White, 1979), a balance that can be extended for any period of time. Therefore, any well-established system, no matter its size, can be assessed. Nevertheless, temporal variability of the system's efficiency can be analysed by extending the energy equation during the appropriate time interval, provided that for such period all the energy flows through the system's boundaries are known. In any case, for assessments of average energy, the focus of this paper, current time intervals (i.e. day, month or year) must be adopted.

Finally, and because friction is included as an additional requirement in H , it should be noted that Fig. 1 does not assess the system from the point of view of friction.

Therefore, especially for systems in which friction is significant (e.g. where $h_f/H \geq 0.15$), its contribution must be evaluated independently. For this purpose, the friction efficiency, w_f , is of great interest and is defined as

$$w_f = \frac{h_f}{J_o(L + \sum L_{ei})} \quad (5)$$

A w_f value different from 1 indicates that the diameter is insufficient ($w_f \gg 1$) or excessive ($w_f \rightarrow 0$). The need for this complementary analysis increases with the length of the transport L and decreases with height. Obviously, if a facility is being designed, it is reasonable to design it with a diameter that corresponds to the optimal hydraulic slope, J_o , in which case, $w_f = 1$.

3. DIFFERENT HYDRAULIC GRADE LINES

Regardless of whether the water transport is driven by gravity or pumped, the hydraulic slope J is a key parameter. In our analysis, four J parameters are defined:

- J_{min} which corresponds to the lowest water speed. A minimum value is currently set to maintain quality (time of residence of the water in the system) and avoid sedimentation.
- J_o which corresponds to the optimal slope of a pipe requiring shaft energy. It is generally associated with pumping lines ($z_i < z_f$) but can easily be generalised to gravity pipes ($z_i > z_f$) in which the available slope $(z_i - z_f)/L$ is lower than J_{min} .
- J_o^* which corresponds to the optimal slope of a gravity pipe in which some gravitational energy can be recovered. It is a similar concept to the previous one, but there are some differences. J_o is linked to the purchase price of the energy, whereas J_o^* is linked to the sale price (equations 7 and 8).
- J_{max} which corresponds to the maximum water speed. For the security of the facility (to control the water hammer) and the prevention of erosion, a given value should not be exceeded.

In general, $J_{min} < J_o < J_o^* < J_{max}$ applies, although systems with little use (i.e. low number of hours per year) can increase J_o to a value that is higher than J_{max} . In such a case, J_{max} is adopted. On the other hand, the optimal slopes, J_o and J_o^* , are incompatible (since one applies to pumped systems and the other applies to gravity systems, respectively). Lastly, the boundary values (J_{min} and J_{max}) are subjective and depend on the reference consulted. Two examples follow.

- a) According to the American Water Works Association (AWWA), J_{max} depends on the diameter. If it is less than 16 inches (≈ 400 mm), then $J_{max} = 7 \text{ m km}^{-1}$. If this diameter is exceeded, then $J < 3 \text{ m km}^{-1}$ (AWWA, 2012). Other authors (Bouman, 2014) have set the maximum water speed at 3 m s^{-1} ; this is a very high value because for a 400 mm pipe (with a friction factor $f = 0.015$), $J \approx 17 \text{ m km}^{-1}$. This value is unacceptable outside of exceptional cases (such as with a fire suppression network).
- b) The AWWA does not propose a value for J_{min} . It can be set from the minimum speed value of 0.2 m s^{-1} (Bouman, 2014). For a diameter of 400 mm ($f = 0.020$), $J_{min} \approx 0.1 \text{ m km}^{-1}$, a rather low value.

In short, under normal operating conditions, the interval $(0.1 - 7) \text{ m km}^{-1}$ can be used as a reference, but singular cases require specific analysis. For instance, in penstocks of large hydroelectric plants, it is common to find speeds of up to 5 m s^{-1} (Stevens & Davis, 1969), a value that is explained by short pipe lengths carrying very large flows.

The optimal slope comes from a well-defined expression that is shown in Eq. 6 (Cabrera et al., 2018). Its major uncertainty lies in the starting data since it is difficult to anticipate the average value of some of the equation's key parameters, such as the price of the energy, for a 50-year period (the pipe's expected lifespan). Its expression is

$$J_o = f_p \left(\frac{\lambda}{e} \right)^{\frac{5}{5+c}} \quad (6)$$

where f_p is dependent on the pipe parameters; c and λ lied on technical performance and cost, respectively, and e is a parameter that synthesises energy

costs. Following Cabrera et al. (2018), the same equation can be expressed with additional parameters:

$$J_o = (0.0826 \cdot f)^{\frac{c}{5+c}} Q^{\frac{2c-5}{5+c}} \left[\frac{0.2c \cdot F_i \cdot a_o(p) \cdot \eta_p}{\gamma \cdot n \cdot h \cdot \bar{p}_e} \right]^{\frac{5}{5+c}} \quad (7)$$

where f is the friction factor, c and $a_o(p)$ are adjustment factors for pipe cost and diameter variation (very specific to the material), Q is the pipe flow, F_i is the installation factor (it includes all additional costs apart from the cost of the pipe itself: transport, trench, labour, etc.), η_p is the efficiency of the pumping station, γ is the specific water/fluid weight, h is the annual operating hours, and \bar{p}_e is the global average price of energy. Finally, it is important to underline that, because the constant 0.0826 has dimensions, Eq. 7 is not dimensionless (Cabrera et al., 2018) and requires application of SI units.

A gravitational pipe (as used for the penstock of a hydroelectric plant) is similar to a pumping line; therefore, the differences between J_o and J_o^* are minimal. In J_o , the energy term is quantified by the cost of the energy to be paid to the energy provider, \bar{p}_e ; conversely, in J_o^* , the energy term is affected by the average selling energy price, \bar{p}_e^* . The second difference lies in η_p , the efficiency of the hydraulic machine (pump or turbine). In J_o , it appears in the numerator (the hydraulic energy is the output), while, in J_o^* , it is in the denominator (the hydraulic energy is an input). Thus, J_o^* is determined by

$$J_o^* = (0.0826 \cdot f)^{\frac{c}{5+c}} Q^{\frac{2c-5}{5+c}} \left[\frac{0.2c \cdot F_i \cdot a_o(p)}{\gamma \cdot n \cdot h \cdot \bar{p}_e^* \cdot \eta_t} \right]^{\frac{5}{5+c}} \quad (8)$$

4. QUICK ASSESSMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF SIMPLE SYSTEMS

As mentioned before, in the current context of climate change, it is necessary to generalise the energy analysis to all simple systems and not limit it to pumping systems. The possibility of recovering excess energy is arousing growing interest

(Fecarotta, Aricò, Carravetta, Martino, & Ramos, 2015). From this view, simple systems can be classified (Fig. 2) into five groups on the basis of energy.

- 1) Impulsion pipes (conventional pumping) must overcome elevation ($z_f - z_i \geq 0$) and friction. Shaft (pumping) energy, E_p , must be supplied.
- 2) Gravitational pipes ($z_f - z_i < 0$) have insufficient natural energy available because $(z_i - z_f)/L < J_{min}$. Therefore, additional shaft energy must be introduced.
- 3) Classic adduction means that the available natural energy can move the water at a reasonable speed.
- 4) Adduction with excess natural energy, ΔE , which energy cost analysis advises against recovering, means that the excess energy ($\Delta E = (z_i - z_f) - J_{max} L$) is dissipated with a PRV.
- 5) Adduction with excess, recoverable natural energy is a case similar to the previous one. However, the cost/benefit analysis is now positive.

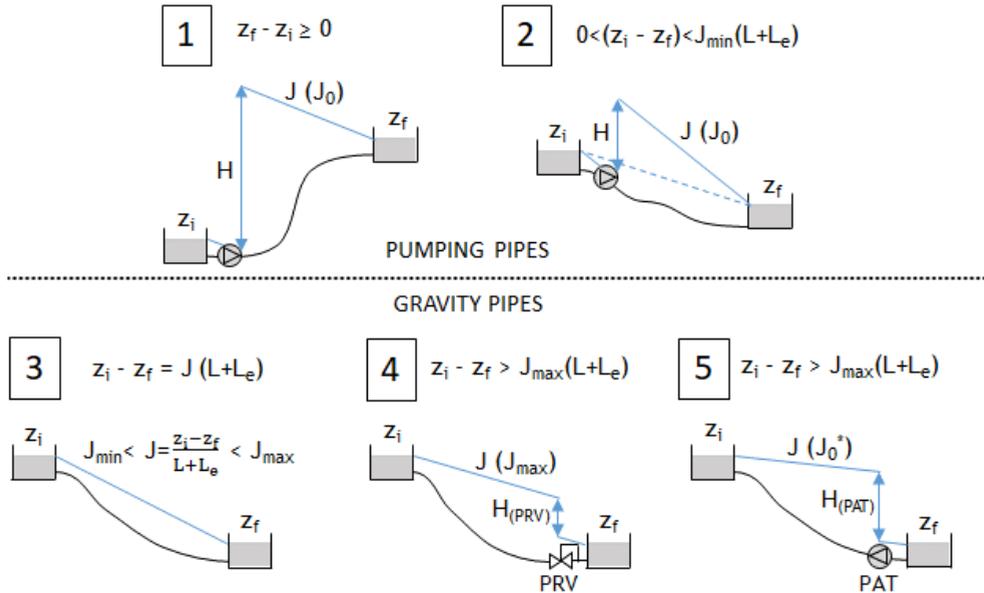


Figure 2. Pressurised water transport in simple systems (different energy configurations)

Long-distance water transport systems include some (or all) of these five cases because the pipelines must be adapted to the topography of the terrain. Even if the slope of the terrain decreases monotonically (as in case 3), an open channel is a feasible solution. In any case, global energy analysis of the whole system must be performed in stages. Each section constitutes a volume of control to be analysed. Then, from the energy efficiency of each section and proper weighting, the final overall value is obtained. Notable examples of these transports are the California Aqueduct (CDWR California Department of Water Resources, 2011), which is 700 km long with a $370 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ capacity; Israel's National Water Carrier (Cohen, 2008), which is 130 km long with a $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ capacity; and the Tajo Segura transfer system in Spain (Melgarejo & Montaña, 2009), which is 290 km long with a $33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ capacity.

Figure 3 qualifies each case from an energy perspective. The process begins with the calculation of hydraulic slopes. The order of magnitude of the extremes (J_{min} and J_{max}), although subjective, is well defined, while J_o and J_o^* must be calculated appropriately. For operational pumping pipes (left column, cases 1 and 2), if the system is working, the adopted hydraulic slope is the real one, J . H is determined from J , and the efficiency is obtained. During the design phase of pipelines, the goal is to set the intervals of I_e that correspond to each efficiency level. These ranges are established by means of J_o and H_d (the d subscripts refer to the design phase).

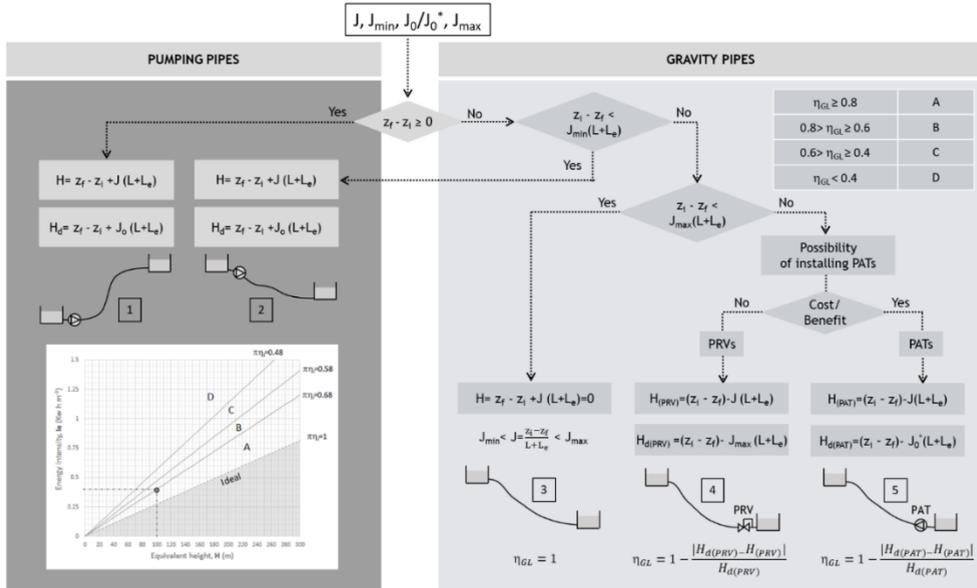


Figure 3. Energy efficiency of pressurised water transport in simple pipelines

The qualification of gravitational adductions (cases 3, 4, and 5) is, to some extent, subjective. Natural energy therefore has no cost and minimising costs is futile. However, I_e , the basic indicator of the analysis and linked to the energy to be paid, does not exist. It only makes sense in adductions with PATs, which is a case of economic balance in the conventional context. In case 3, in which J lies between the extreme slopes, there is no alternative and, therefore, the global efficiency (η_{GL}) is equal to 1. In cases 4 and 5, the measure of efficiency is linked to the difference between the real H and the designed one, H_d .

5. QUICK ASSESSMENT OF THE ENERGY INEFFICIENCIES IN NETWORKS: OPERATIONAL AND STRUCTURAL LOSSES

The assessment of the energy efficiency of complex systems resembles that of simple systems, although there are important differences. The first and most relevant one is the existence of topographic energy, which is a consequence of different consumption at different heights (in simple systems, there is just one delivery point). The design of any network aims to meet the requirements of the

most unfavourable node, while the volume of the other nodes is delivered with excess pressure (the higher the node, the lower the pressure). The sum of all these excesses is topographic energy, E_{ti} (Cabrera et al., 2015). This energy is not an energy loss linked to the system's operation, although, in practice, it implies that more energy is supplied than is strictly necessary. Therefore, it is advisable to associate that energy with another type of inefficiency, that is structural loss (Cabrera et al., 2019). The second difference is the potential presence of several energy sources. In a network, it is common to supply water from two (or more) pumping stations or reservoirs.

Once the system is defined (with its surface and volume of control), the integral energy equation can be applied (Cabrera, Pardo, Cobacho, & Cabrera, 2010b). For this reason, in complex systems, it is common to divide the supplied (or injected) energy (E_i) into natural (E_N) and pumping energy (E_p): $E_i = E_N + E_p$. The weight of each form is represented by the parameter $C_1 = E_N / (E_N + E_p) = E_N / E_i$. In simple systems, the energy injected, E_i , only has both components in scenario 2.

There remains a third major difference between simple and complex systems. It is possible to define the optimal hydraulic slope, J_o , in both types (Cabrera et al., 2018). Nevertheless, this is not the case for the slope J_o^* , which is typical of simple gravitational systems. The explanation is clear: while J_o is based on the evaluation of the friction in all pipes, it is unrealistic to assess the energy in any line in which it could be recovered with PATs, and this is the basis of J_o^* . So, it is a challenge to typify complex networks the way that simple systems are characterised in Fig. 3. There are additional minor differences, such as the habitual existence of leaks in complex systems (in simple systems, they are usually negligible) or the current requirement to supply pressure of service p_o in networks.

Despite these differences, calculating the energy efficiency of a network is similar to that of a simple system. However, in this new case, the starting point is the minimum energy E_{si} required by the system for a period of time T. This energy can be expressed (Cabrera et al., 2015) by

$$E_{si} = \gamma V \left[(z_h - z_l) + \frac{p_o}{\gamma} \right] \quad (9)$$

where γ is the specific weight of the water (N m^{-3}), V is the volume supplied (m^3) to the system in period T , z_h and z_l are the elevation (m) of the extreme (highest and lowest) nodes and p_o is the pressure of service (N m^{-2}). To this minimum energy, the energy required to overcome friction must be added. This term is more diffuse in water-looped networks than in simple systems because the water path is not a priori defined. To overcome this problem, the friction energy is maximised, adopting the energy lost between the source and the critical node for the whole system. In a real network, this value can be measured or, alternatively, estimated by multiplying the distance between the two points (L) by a reasonable hydraulic grade line slope; for instance, $J = 0.0015 \text{ m/m}$. In a real case, if J is ultimately higher than the estimated value, H will be smaller. Consequently, the energetic requirements of the system will be smaller, too.

In short, assuming that the suction pressure is zero, the equivalent final height H , with the real h_f measured (the abscissa of Fig. 1), is determined by

$$H = (z_h - z_l) + \frac{p_o}{\gamma} + h_f \quad (10)$$

A quicker but less accurate estimation (without measurements) is obtained from

$$H = (z_h - z_l) + \frac{p_o}{\gamma} + 0.0015 \cdot L \quad (11)$$

In Fig. 1, the purpose of the intersection between the horizontal given by l_e and the vertical defined by H (equation 10 or 11) is to qualify the behaviour of the system in terms of energy and, at the same time, determine the margin for improvement. The relevance of the friction, h_f/H , which is typically moderate in networks, indicates whether the estimation's error is more or less significant.

Finally, if the height of the source, z_i , is intermediate between extremes ($z_l < z_i < z_h$), natural energy must be included in the balance. The natural energy is

$$E_N = \gamma V (z_i - z_l) \quad (12)$$

The natural energy plus the shaft energy amounts to the total energy injected, E_i . The result obtained from Figure 1 illustrates the overall energy assessment of the network and includes both operational and structural losses. This is because the energy requirements were calculated according to the needs of the most unfavourable node.

In order to assess the contribution of structural losses to the inefficiency, it is necessary to calculate the weight of the topographic energy, E_{ti} , relative to the total energy requirements. In a network without friction (Cabrera et al., 2015), topographic energy is equal to

$$E_{ti} = \gamma \sum v_j [(z_h - z_j)] \approx \gamma V(z_h - \bar{z}) \quad (13)$$

where v_j is the water consumption of node j , z_j is its height and \bar{z} is the weighted average of the consumption nodes. In Eq. 13, E_{ti} can be roughly estimated from the extreme nodes' average elevation. This approach is reliable for uniform spatial demand distribution. However, if most of the consumption transpires in the upper part of the network, the average value overestimates E_{ti} ; in the opposite case, E_{ti} is underestimated. As previously mentioned, the topographic energy is the total excess of the energy delivered, and it is independent of the type of energy (natural or pumped). The relation between E_{ti} and the ideal total energy delivered is the parameter θ , the weight of structural losses in the energy balance. That is,

$$\theta = \frac{\sum v_j [(z_h - z_j)]}{V \left[(z_h - z_l) + \frac{p_o}{\gamma} \right]} \quad (14)$$

The value of θ enables the decoupling of the total energy losses and, therefore, the identification of the most effective improvement strategies. Better management reduces the operational losses, while structural losses can only be diminished with a layout modification (Cabrera et al., 2019).

6. EXAMPLES

Three examples are presented to clarify the concepts previously explained. Two of them are in operation (Examples 1 and 3). Example 2 is in the design phase: specifically, it describes a working facility that is being renovated. The objective in each example is to assess their energy efficiency behaviour.

6.1. Example 1. Pumping line

Water is pumped from a well to a tank (Fig. 4). The use is residential (25%) and agricultural (75%); therefore, the number of hours of operation per year is variable. In 2018, the total energy consumption was 646672 kW h, and 415317 m³ was pumped ($I_e = 1.56 \text{ kW h m}^{-3}$).

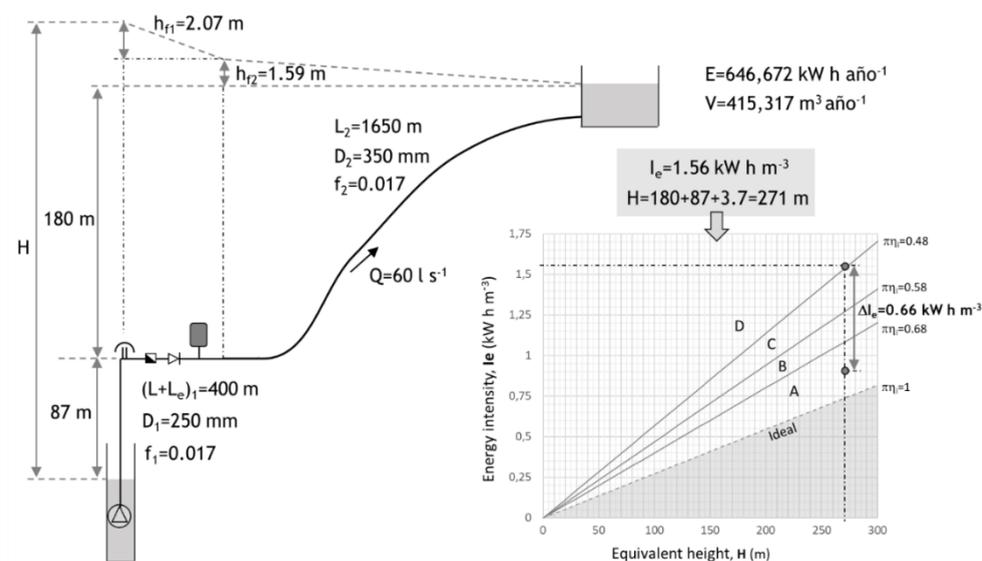


Figure 4. Simple pipeline in Castellon (Spain) with its energy assessment

The equivalent height H (270.66 m) is equal to the water elevation (267 m) plus friction losses h_f (3.66 m). The defined lines meet at a point located in the unsatisfactory–unacceptable zones (zones C-D in Fig. 4), and there is considerable room for improvement before reaching a status of excellent (0.66 kW h m^{-3} , greater than 40%). This justifies a thorough review of the system's operation. In the

absence of leaks, the conclusion is obvious: all operational inefficiencies are located at the pumping station, with a global efficiency of 49% (Fig. 4). However, seasonal variations in the well water table level can contribute to this degree of poor performance.

Figure 1 does not assess the contribution of friction. That is, it does not answer the question of whether 3.66 m of friction is (or is not) a reasonable value. To this end, the first step is to calculate J_o (equation 7). The basic data of a cast iron pipe are $c = 1.4$; $\alpha_o(p) = 635.575 \text{ € (m} \cdot \text{m}^{-1.4})^{-1}$; $n = 50$ years; $F_i = 1.5$; $\overline{p_e} = 0.14 \text{ € kW h}^{-1}$; $h = 4000 \text{ h year}^{-1}$ and $\eta_p = 75\%$, which is a more reasonable pump efficiency than the current value (49%). These data should represent the pipe's 50-year average lifespan. From these values, $J_o = 2,213 \text{ m km}^{-1}$, and the optimal head loss is 4.56 m ($L_T = 2.05 \text{ km}$), which is almost equal to the actual value (3.66 m). In short, $w_f = 3.66/4.56 = 0.80$, while the weight of friction is low ($h_f/H = 3.66/270.66 = 0.014$), and it should be less without the contribution of local losses (e.g. foot valves, filters, elbows, etc.). Therefore, system's friction is reasonable.

6.2. Example 2. Gravity line

This example corresponds to an operational gravity pipe in Cusco, Peru (Fig. 5). The old pipeline requires renewal and, at the same time, the potential recovery of excess gravitational energy (actually dissipated by a PRV located at the entrance to the Picchu Alto tank) is economically feasible. For the new cast iron pipe, data from Example 1 are assumed to apply. The specific data are $F_i = 1.5$; $\overline{p_e^*} = 0.08 \text{ € (kW h)}^{-1}$, $h = 8760 \text{ h year}^{-1}$ and PAT efficiency = 72%. From these data, J_o^* (equation 8) is 2,743 m km^{-1} , which corresponds to a 502 mm diameter pipe (rounded to 500 mm). The energy to be recovered by the PAT (H_{PAT}) should be 83.1 m. A positive cost/benefit analysis would justify its installation. As seen in Figure 5, the energy efficiency of the design would be the unit.

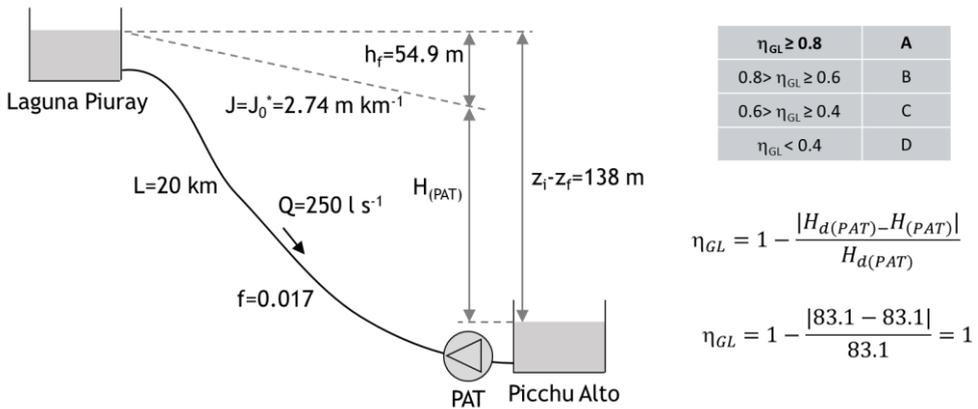


Figure 5. Gravity pipeline in Cusco (Perú)

6.3. Example 3. Irrigation network

In 2011, the irrigation network shown in Figure 6 displayed poor energy-related behaviour. Operational data for an average day in that year were an injected flow of $19164 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, supplied flow of $18580 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ (leaks = $584 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, a good performance for a 5-year-old network), pressure service of 20 m and consumed shaft energy of 5833 kW h d^{-1} . The physical data are $z_h = 35.53 \text{ m}$, $z_l = 14.39 \text{ m}$ and the suction pressure, z_i , 25.00 m . The length from the source to the most unfavourable node is 3 km (the total network length is slightly over 50 km).

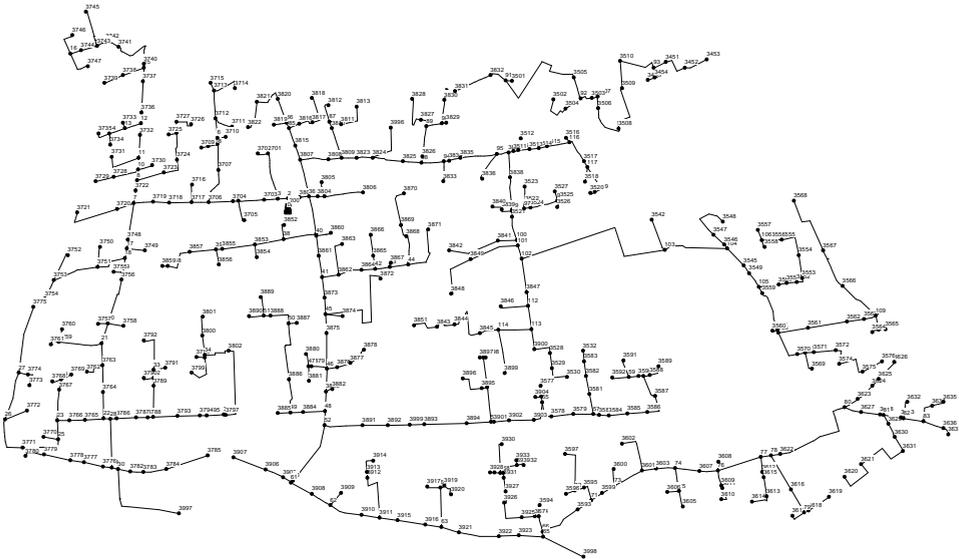


Figure 6. Irrigation network in Vila-Real (Spain)

From these data, $H \approx (35.53 - 14.39) + 20 + 0.0015 \cdot 3000 = 45.64$ m. The energy intensity, I_e , (considering the natural energy of 554 kW h) is

$$I_e = \frac{5833 + 554}{18580} = 0.34 \text{ kWh m}^{-3}$$

This point (45.64; 0.34) falls into the D (unacceptable) area (Fig. 1), given that this energy evaluation of the network occurred before any improvement. In order to assess the weight of the structural losses, the topographic energy was estimated by Eq. 13. The result is

$$E_{ti} \approx \gamma \cdot V(z_h - \bar{z}) = 9810 \cdot 19,164 \cdot \left(35.54 - \frac{35.54+14.39}{2}\right) = 1.99 \cdot 10^9 \text{ J d}^{-1} = 552.78 \text{ kW h d}^{-1}$$

In this case, the correct topographic energy (588.71 kW h d⁻¹), evaluated using the non-simplified Eq. 13, is slightly higher than the approximated value (552.78 kW h d⁻¹), a small difference due to the relatively homogeneous spatial distribution of the demand.

If the inefficiencies are only due to operational losses, I_e is recalculated without considering the topographic energy; the result is $I_e = 0.31 \text{ kW h m}^{-3}$. This value intersects with $H = 45.64$ m in Figure 1 and again results in an unacceptable

assessment (D zone). This figure shows that the network efficiency should only be classified as excellent if $I_e < 0.17 \text{ kW h m}^{-3}$. After some operational and structural improvements, the present energy intensity is 0.16 kW h m^{-3} . As the focus of this paper is on the average values only a brief description of the three main implemented actions (one operational and two structural) are provided:

- c) This system operated with two turns of two hours each with rigid patterns for irrigation and very different flows (up to 50% of difference). With that variability, the system could hardly operate constantly at best efficient point (BEP). The irrigation was re-scheduled (constant flow, no matter the turn) and with these new load conditions, one of the five pumps was stopped, and the remaining operating pumps worked steadily at their BEP.
- d) Local losses at the pumping and filtering station were very high (10 m). With a more rational piping layout and new efficient filters, this loss was dramatically reduced (3 m).
- e) The pumps, working in parallel, supplied water to the highest and lowest nodes. To reduce the topographic energy, the network was divided into three independent sectors and the pumps were conveniently decoupled. Although the partition, strongly conditioned by the existing network, was not the optimum, the requested energy by the four pumps was significantly reduced.

7. CONCLUSION

A methodology designed to perform quick energy assessments for irrigation water transport systems is presented. Among these systems, those that require pumping energy are of special interest because of their economic implications. The proposed procedure is based on the fact that the energy intensity units (kW h m^{-3}) are effectively pressure units as well (N m^{-2}). Therefore, a direct and biunivocal relationship between I_e and the equivalent height H (sum of the energies required per unit of weight) can be established. From the real transport needs (I_e) and the minimum energy needs (H), the inefficiencies (in kW h m^{-3}) can be estimated. This analysis requires use of concepts that are generally ignored, such as natural energy or topographic energy.

From the physics of pressurised water transport systems, with the inefficiencies duly classified (as operational losses, pumps and leaks, and friction) and quantified, the global efficiency can be assessed. The proposed labels (Fig. 1) are, to some extent, subjective and can be reformulated from the energy efficiency goals set by the regulators and the current state of the technology.

Nomenclature

Symbols **Meaning of symbols**

$a_o(p)$	Constant, depending on working pressure and material cost of the pipe [€ (m m ^c) ⁻¹]
c	Adjustment exponent of material cost evolution (currently, 2)
C_1	Energy source context indicator [kW h]
E_i	Supplied (or injected) energy [kW h]
E_N	Natural energy [kW h]
E_p	Shaft (pumping) energy [kW h]
E_{si}	Minimum energy required by the system [kW h]
E_{ti}	Topographic energy [kW h]
f	Friction factor
F_i	Installation factor
f_p	Investment - installation - construction factor
H	Piezometric head [m]
h	Number of operating hours [h year ⁻¹]
H_d	Designed height [m]
h_f	Pressure losses [m]
η_{GL}	Global efficiency [%]
H_{PAT}	Energy to be recovered by the PAT [kW h]
I_e	Energy intensity [kW h m ⁻³]
J_{max}	Maximum hydraulic slope [m km ⁻¹]
J_{min}	Minimum hydraulic slope [m km ⁻¹]
J_o	Optimal hydraulic slope/gradient [m km ⁻¹]
J_o^*	Optimal slope of a gravity pipe [m km ⁻¹]

L	System length [m]
L_{ei}	Equivalent lengths of the accessories [m]
\bar{p}_e	Global average price of energy [€ (kW h) ⁻¹]
\bar{p}_e^*	Average selling energy price [€ (kW h) ⁻¹]
p_i	Pressure at the origin [N m ⁻²]
p_o	Service pressure [N m ⁻²]
Q	Flow [m ³ s ⁻¹]
v_j	Water consumption of node j [m ³]
w_f	Friction efficiency
\bar{z}	Weighted average of the consumption nodes [m]
z_f	Final node elevation [m]
z_h	Elevation of the highest node [m]
z_i	Initial node elevation [m]
z_l	Elevation of the lowest node [m]
γ	Specific weight of water [N m ⁻³]
ΔE	Excess of natural energy [kW h]
η_l	Water efficiency [%]
η_p	Pumping efficiency [%]
ϑ	Weight of structural losses in the energy balance
λ	Installation cost factor

Abbreviations

<i>PRV</i>	Pressure Reducing Valve
<i>PAT</i>	Pump As Turbine
<i>BEP</i>	Best Efficient Point

REFERENCES

AWWA, American Water Works Association. (2012). Computer Modeling of Water Distribution Systems. *AWWA Manual M32. Third Edition*. Denver. Colorado. USA.

Bouman, D. (2014). Hydraulic design for gravity based water schemes. *Aqua for All*. Den Haag. The Netherlands.

Cabrera, E., Pardo, M., Cabrera, E. Jr., & Cobacho, R. (2010a). Agua y Energía en España. Un reto complejo y fascinante. *Ingeniería del Agua*, (17-3), 235-246.

Cabrera, E., Pardo, M., Cobacho, R., & Cabrera, E. Jr. (2010b) Energy audit of water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136, 669-677.

Cabrera, E., Gómez, E., Cabrera, E. Jr., Soriano, J., & Espert, V. (2015). Energy assessment of pressurized water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000494.

Cabrera, E., Gómez, E., Cabrera, E. Jr., & Soriano, J. (2018). Calculating the economic level of friction in pressurized water systems. *Water* 2018, 9, 763. DOI: 103390/w10060763.

Cabrera, E., Gómez, E., Soriano, J., & del Teso, R. (2019). Eco-layouts in water distribution networks. *Journal of Water Resource Planning Management*, 2019, 145(1): 04018088. DOI: 10.1061/(ASCE) WR.1943-5452.0001024.

CDWR, California Department of Water Resources. (2011). *California State Water Project at a glance*. Department of Water Resources. State of California, USA April 2011.

Cohen, N. (2008). Israel's National Water Carrier. *Present environment and sustainable development*, 2(1), 15-27.

EC, European Commission. (2011). *Directive of the European Parliament and of the Council on energy efficiency and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC*. Brussels, 22.6.2011 COM (2011) 370 final.

EC, European Commission. (2012). *Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with Regard to Ecodesign Requirements for Water Pumps*. Official Journal of the European Union. 26.6.201.

EC, European Commission. (2019). *Fourth Report on the State of the Energy Union*. Brussels, 9.4.2019 COM (2019) 175 final.

ERSAR & LNEC. (2013). *Guide to the quality of service assessment for drinking water supply, urban wastewater management and municipal waste management services - 2nd generation of the assessment system (in Portuguese)*. 2nd ed. Lisbon: ERSAR.

Fecarotta, O., Aricò, C., Carravetta, A., Martino, R., & Ramos, H. M. (2015). Hydropower Potential in Water Distribution Networks: Pressure Control by PATs. *Water Resources Management* 29:699–714. DOI 10.1007/s11269-014-0836-3.

Ghorbanian, G., Karney, K., & Guo, Y. (2016). Pressure Standards in Water Distribution Systems: Reflection on Current Practice with Consideration of Some Unresolved Issues. *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE. DOI: 10.1061 / (ASCE) WR. 1943 - 5452.0000665.

Grundfos. (2014). *High efficiency motor technology that reduces energy waste in pump applications*. Grundfos. Denmark.

Melgarejo, J. & Montaña, B. (2009). *La eficiencia energética del trasvase Tajo-Segura*. Cuaderno Interdisciplinar de Desarrollo Sostenible, CUIDES, nº 3.

Plappally, J. H. & Lienhard, V. J. H. (2012). Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 4818–4848.

Sperlich, A., Pfeiffer, D., Burgschweiger, J., Campbell, E., Beck, M., Gnirss, R., & Ernst, M., (2018). *Energy Efficient Operation of Variable Speed Submersible Pumps: Simulation of a Ground Water Well Field*. *Water* 2018, 10, 1255.

Stevens, J. C. & Davis, C. V. (1969). In Davis, C. V., & Sorensen, K. E. (Eds.), *Hydroelectric Plants*. Section 24 of the Handbook of Applied Hydraulics. New York, USA: . Mc Graw Hill

White, F. M. (1979). *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, Inc.: New York. ISBN 10: 0070696675.

WW, Water in the West. (2013). *Water and Energy Nexus: A Literature Review*. Stanford University, CA, USA.

Apéndice IV

Topographic energy management in water distribution systems

del Teso, R.; Gómez, E.; Estruch-Juan, E.; Cabrera, E.

Water Resources Management, ISSN 0920-4741

Impact Factor 2018: 2,987. Rank: 24/132 (Q1). Engineering, civil.

Estado: publicado en 2019.

<https://doi.org/10.1007/s11269-019-02375-9>

A continuación, se expone la versión de
autor de este artículo adaptada al formato
de la tesis

ABSTRACT

A significant amount of energy is required to operate pressurised water distribution systems, and therefore, improving their efficiency is crucial. Traditionally, more emphasis has been placed on operational losses (pumping inefficiencies, excess leakage or friction in pipes) than on structural (or topographic) losses, which arise because of the irregular (unchangeable) terrain on which the system is located and the network's layout. Hence, modifying the network to adopt an ecologically friendly layout is the only way to reduce structural losses. With the aim of improving the management of water distribution systems and optimising their energy use, this work audits and classifies water networks' structural losses (derived from topographic energy), which constitutes the main novelty of this paper. Energy can be recovered with PATs (pumps as turbines) or removed through PRVs (pressure reducing valves). The proposed hydraulic analysis clarifies how that energy is used and identifies the most suitable strategy for improving efficiency as locating the most suitable place to install PRVs or PATs. Two examples are discussed to illustrate the relevance of this analysis.

Keywords: topographic energy, water distribution systems, energy efficiency, pressure management, energy balance

1. INTRODUCTION

Pressure management is unanimously qualified as an essential strategy for improving the efficiency of water networks, as is recognised in the manuals tackling the challenge of reducing water losses from a general perspective (EU 2015). Managing pressure in water networks has been the objective of many papers ranging from general reviews to more specific work dealing with the practicalities of how this ambition can be fulfilled (Walski et al. 2006). Any surplus pressure over the level established in supply standards (urban networks) or over the level required by sprinklers or drip feed systems (irrigation networks) only leads to problems, namely, increased leakage and pipe breakage (Lambert et al. 2013), particularly if the pressure is fluctuating (Agathokleous and Christodoulou 2016). In short, any surplus pressure contributes to water and energy inefficiencies and shortens the average lifespan of pipes (Lambert and Thornton 2012). Moreover, it

is worth remembering that managing water pressure has other consequences. On the one hand, citizens who are used to a high pressure associate a low water pressure with a relatively poor service quality. On the other hand, water supply companies report lower earnings in conjunction with lower consumption, which is dependent on the water pressure. In any case, these apparent drawbacks are easily manageable with environmental education.

Since the energy efficiency of a water network is conditioned by its layout, pressure management should begin at the design stage. Dealing with the problem during the design stage (i.e., a top-down approach) and establishing EMAs (energy management areas) (Cabrera et al. 2019), are more effective strategies than modifying an operating system. When a system is already operating, pressure management is implemented as follows:

Installing pressure reducing valves (PRVs) to dissipate surplus energy. In addition, by reducing pressure, leaks are minimised, as is the embedded energy, while friction, which is linked to circulating flows, is also reduced (Cabrera et al. 2010). Installing PRVs is the most common method and has been studied in depth concerning its cost, effectiveness and ease of implementation. Different studies have analysed how many PRVs should be installed (Creaco and Franchini 2013), where they should be placed (Saldarriaga and Salcedo 2015) and how to size them (Covelli et al. 2016).

Sub-dividing the network into pressure management zones (PMZs) in an attempt to operate them as district metered areas (DMAs) (Lambert et al. 2013). Creating PMZs is highly dependent on the initial network layout (Castro Gama et al. 2014). The differences among EMAs, PMZs and DMAs have been previously discussed (Cabrera et al. 2019).

Installing pumps as turbines (PATs). This option maintains the benefits of PRVs (Patelis et al. 2017) and recovers energy, an advantage that compensates for the complexity involved in regulating a hydraulic machine (in which the flow rates are highly variable over time). However, integrating the generated energy into the electricity loop is not a simple matter, and therefore, this approach is usually used for self-consumption. Installing PATs in optimum places obeys criteria similar to those of PRVs (De Paola et al. 2017). This is a mature technology (Fecarotta et al.

2014), although few systems operating at a real scale utilise this option (Muhammetoglu et al. 2017).

In short, we can “reduce”, “recover” or “remove” surplus energy linked to excess pressure (Cabrera et al. 2019). The differences among these strategies are significant. Reducing focuses on pressure (an intensive variable), whereas recovering and removing refer to energy (an extensive variable). Therefore, by modifying the layout, both pressure and structural losses (Cabrera et al. 2019) are reduced at the source. By installing PRVs or PATs, the initial balance is altered with a new energy term, equal to the flow through them times the decrease in pressure they produce.

This paper reviews energy concepts that have already been introduced concerning water distribution systems, particularly the differences between operational and structural losses. This review also updates the terminology related to the energy balance employed in previous papers. Structural losses, the subject of this paper, are then broken down to assess and manage topographic energy with the aim of improving water transport efficiency. The focus of this proposed comprehensive approach is illustrated in two networks (branched and looped).

Finally, the differences between the traditional approaches and the method suggested in this paper are highlighted. Most of the current methodologies consist of optimisation algorithms (that is, mathematical tools) that seek to minimise pressures and leaks (Creaco and Pezzinga 2018). Our focus straightforwardly aims to minimise structural energy losses. Although structural energy losses are strongly related to pressure and leaks, they are different concepts. Therefore, the proposed method is mainly a physics approach, which can be easily followed in the simple proposed examples. In any case, guidelines to generalise the procedure to complex real systems are duly outlined.

2. PRESSURIZED WATER TRANSPORT SYSTEMS: BASIC ENERGY CONCEPTS

The aim of a pressurised water distribution system is to efficiently deliver the water flow users require (Q) at the established pressure (p). The result ($Q \cdot p$) is related to the power required by users, which, extended over a specific period of time, is the energy delivered to users. If water is supplied at the pressure established in the

standards, the sum of the energy delivered to each user (j) is the minimum energy required by the system E_{uo} :

$$E_{uo} = \gamma \sum_{j=1}^n v_{c,j} \left[(z_j - z_l) + \frac{p_{0,j}}{\gamma} \right] \quad (1)$$

where γ is the specific weight of water; n is the number of users; j is the index for users, ranging from 1 to n ; $v_{c,j}$ is the volume of water consumed at node j during the considered period; z_j the height of node j ; and $\frac{p_{0,j}}{\gamma}$ is the minimum supply pressure at node j . The height of the lowest node in the system, z_l , is the reference system height.

The total energy supplied to the system, E_{sr} , is calculated by adding E_{uo} to the energy losses in the system (operational and structural losses). These concepts, in addition to those that will be discussed in this work, have been established in previous works (Cabrera et al. 2010; Cabrera et al. 2015; Cabrera et al. 2019).

2.1. Energy supply sources

Water supply sources inject water into the system, adding a specific amount of energy per unit volume (kWh/m^3), thereby conditioning the energy efficiency of the network. If the established pressure is exceeded at the least favourable node, this leads to system inefficiency.

Depending on whether supply sources are able to regulate the hydraulic head, those sources can be either rigid or variable (Cabrera et al. 2019). Tanks and reservoirs supply gravitational energy to water, and since the height of the supply, H_{hi} , is almost constant (with only small level variations inside the tanks), the hydraulic head cannot be regulated. Tanks and reservoirs are therefore rigid sources. On the other hand, pumps installed with variable-frequency drivers are variable energy sources because the unitary injected energy, H_{hi} , can be adjusted by modifying their operating point.

2.2. Operational losses

Operational losses are those that depend on the operation of the network. These losses are located in pumping stations, E_{pr} , in pipes as a result of friction, E_{fr} , and through leaks, E_{lr} . There are other losses, such as breakages in tanks, in the network itself or in household tanks, all of which are collectively denoted as E_{or} .

The first source of losses, E_{pr} , is the one that usually requires closer attention. These losses are obtained directly from different pump characteristic curves. In this work, E_{pr} is not considered. The second source of losses in the network, that is, friction losses, E_{fr} , is expressed in equation 2 for a given time interval, Δt (Cabrera et al. 2010):

$$E_{fr} = \gamma \sum_{i=1}^m q_i \Delta h_i \Delta t = \gamma \sum_{i=1}^m v_i \Delta h_i \quad (2)$$

where q_i is the flow in pipe i ; m is the number of pipes; Δh_i is the head loss in pipe i ; and v_i is the volume through pipe i in the given time interval. Nevertheless, as the energy balance is nodal, it is worth expressing friction losses in terms of nodes, leading to the following:

$$E_{fr} = \gamma \sum_{j=1}^n v_{g,j} \left[H_{hi} - \left((z_j - z_l) + \frac{p_j}{\gamma} \right) \right] \quad (3)$$

where $v_{g,j}$ is the total volume at node j , equal to the water demand at node $v_{c,j}$ plus the leaked volume $v_{l,j}$ through half of the pipes converging at node ($v_{g,j} = v_{c,j} + v_{l,j}$), while $\frac{p_j}{\gamma}$ is the pressure at node j . Equation 3 therefore provides the friction losses occurring between the source and each node for the total volume of water in each of the nodes. Analytically, equations 2 and 3 give the same result. Removing the consumed volume at the corresponding node from equation 3, the nodal formulation allows a direct calculation of the total contribution of leaks to friction losses.

In systems with multiple sources, the percentage of water that arrives at each node from any of the sources must be known. In this case, the nodal friction E_{fr} should

be calculated by weighting, according to each source, the friction corresponding to the water volume at each node, as stated in equation 4:

$$E_{fr} = \gamma \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^k \alpha_{s,j} v_{g,j} \left[H_{hi,s} - \left((z_j - z_l) + \frac{p_j}{\gamma} \right) \right] \quad (4)$$

where $\alpha_{s,j}$ is the percentage of water arriving at node j coming from source s ; $H_{hi,s}$ is the piezometric head of the corresponding source s ; and k is the number of sources. In what follows, we assume systems with only one source.

On the other hand, the embedded energy in leaks (E_{lr}) is equal to the leaked volume by the piezometric height at the node where the leak is located. This leads to the following nodal equation:

$$E_{lr} = \gamma \sum_{j=1}^n v_{l,j} \left[(z_j - z_l) + \frac{p_j}{\gamma} \right] \quad (5)$$

Finally, if the supply is coming from a variable source and there is an excess pressure at the critical node, this is attributed to a deficient pumping regulation, as the energy requirements have not been adjusted to the critical node needs. This energy surplus, E_{er} , is therefore an operational loss, as shown in Fig. 1a. The value for this loss is obtained as follows:

$$E_{er} = \gamma \sum_{j=1}^n v_{g,j} \left(\frac{p_{min}}{\gamma} - \frac{p_{0,j}}{\gamma} \right) \quad (6)$$

where $\frac{p_{min}}{\gamma}$ is the minimum pressure in the system. If the energy source is a rigid source, the excess pressure at the critical node is a structural loss, which is explained as follows.

2.3. Structural losses: topographic energy

While operational losses depend on how the system is managed, structural losses are inherent to the topography and layout (network, tank heights, etc.). Since users are located at different heights, to supply the right pressure to the critical node, the remaining nodes are supplied at a pressure over the required minimum. Consequently, more energy will be delivered than is required. Topographic energy (E_{tr}) is basically excess energy linked to the topography and network structure, as its name suggests (Cabrera et al. 2015). Topographic energy is not in itself a loss of energy, as is the case of energy lost through operational losses. However, topographic energy is still an inefficiency and should be corrected as far as is reasonably possible since it means that more energy is supplied than is strictly necessary. The value of topographic energy is obtained as follows:

$$E_{tr} = \gamma \sum_{j=1}^n v_{g,j} \left(\frac{p_j}{\gamma} - \frac{p_{0,j}}{\gamma} \right) - E_{er,j} \quad (7)$$

The excess energy existing in each node, $E_{er,j}$, must be subtracted to avoid quantifying it as topographic energy. Tanks (as with any rigid energy source) lead to inefficiencies since they are unable to adapt to the exact energy requirements at the critical node over time. In the best-case scenario, with the height being designed to avoid excesses at the least favourable node during peak hours, as demand falls, there will be an energy excess (inefficiency) at the critical point. While pumps can be regulated, tanks cannot (they have small level variations that are not used to regulate the pressure within the system). Consequently, energy surpluses are considered inevitable. Fig. 1 illustrates the difference (Fig. 1a shows the situation for a variable source, while Fig. 1b shows that for a rigid source).

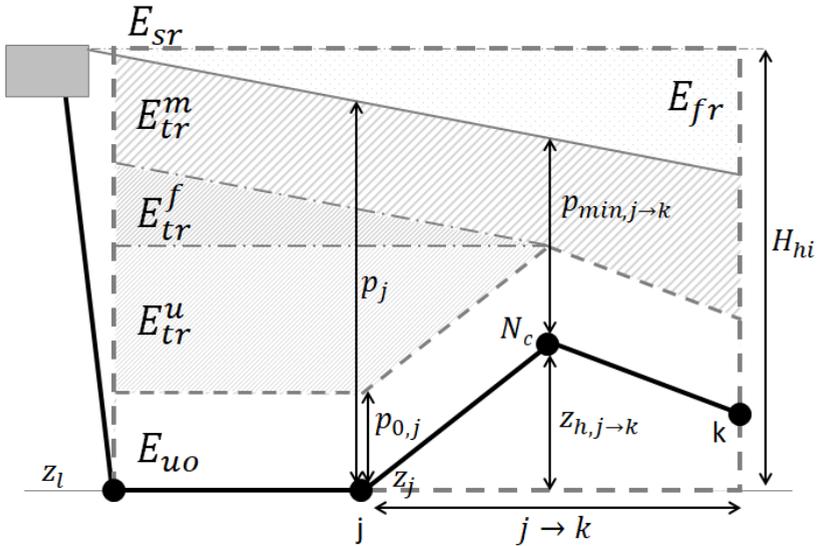


Figure 2. Topographic energy breakdown with a rigid supply source

3.1. Unavoidable topographic energy

Unavoidable topographic energy is linked to the energy needed to supply a high-elevation point in a network in an ideal situation (no friction losses). Such energy cannot be avoided except by modifying the layout and can be defined as follows:

$$E_{tr}^u = \gamma \sum_{j=j}^k v_{g,j} (z_{h,j \rightarrow k} - z_j) \quad (8)$$

where $z_{h,j \rightarrow k}$ is the height of the highest node along the possible paths between the study node j and nodes k . The k nodes are the final points of consumption along the paths carrying water downstream from j . In branched networks, the k nodes are always terminal nodes, and there will be as many paths as there are end nodes. Fig. 3a shows that to analyse node N_1 (study node j), there are two paths of water downstream from N_1 that end at nodes N_2 and N_3 (the k nodes). In looped networks, the situation is similar, but we need to bear in mind that water can flow down different paths from j to the same k node, and consequently, all of them must

be analysed. To analyse node N1 in Fig. 3b, there are two different paths leading to the same k node, i.e., node N3. Among all the nodes along the paths flowing between j and k, the height of the highest node of all will be $z_{h, j \rightarrow k}$.

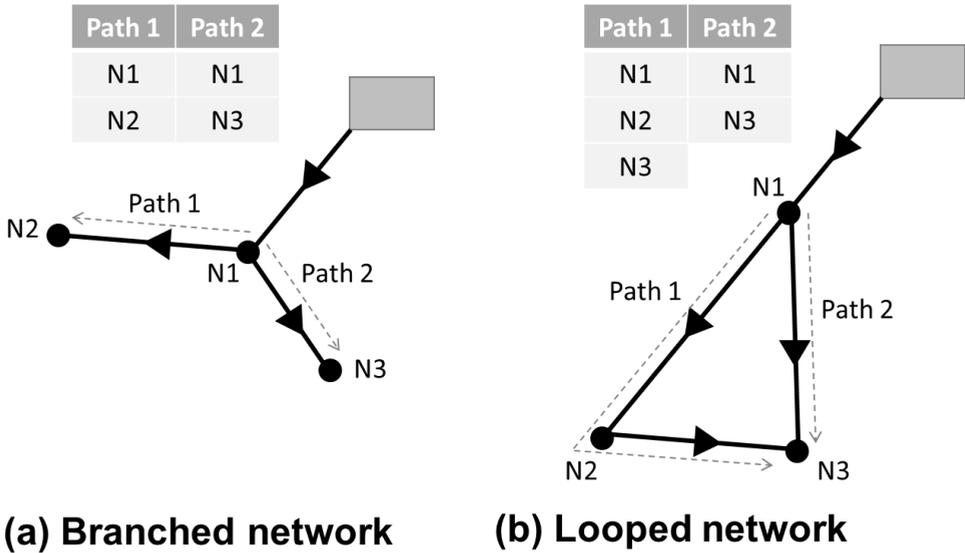


Figure 3. Possible paths between the study node j and nodes k for (a) a branched network and (b) a looped network

Water paths are obtained following the direction of circulation of the water flow. In branched networks, water always flows in the same direction, and its determination can be simply performed: the flow has only to be followed from the source through the system, and the different paths that appear at bifurcations need to be determined. In looped networks, any change, such as the demand pattern during the day, can impact the water flow direction. This is not difficult with calculus, as paths are determined at each instant of time. For this purpose, the water flow is again followed from the source until it reaches a node where there is a junction of pipes. Any of the pipes in the node creates a new path. Each path ends when it arrives at a node that is already part of the path or when it arrives at a node without any outgoing flow (see node N3 in Fig. 3b). This process of determining paths can be automated once the sense of the water flow is known in each pipe. It

requires a hydraulic simulation software package that provides the sense of the water flow.

The unavoidable topographic energy (E_{tr}^u) is therefore conditioned by the highest points in the network. At all nodes upstream from the highest point that are located at required heights lower than or equal to this highest point, a part of the topographic energy is unavoidable. Fig. 2 shows how node j has a lower required height than node N_c ; therefore, this part of the topographic energy is unavoidable since the flow has to overcome this difference. Unavoidable topographic energy therefore depends on the height differences within the network and the network design.

3.2. Unavoidable flow-dependent topographic energy

This component of the topographic energy is necessary to meet the minimum pressure required at the nodes. Reducing it would mean that the required supply pressure would not be reached at nodes located downstream. This depends on the hydraulic gradient of the system, and consequently, flow-dependent topographic energy, E_{tr}^f , is considered:

$$E_{tr}^f = \gamma \sum_{j=j}^k v_{g,j} \left(z_j + \frac{p_j}{\gamma} - \frac{p_{min,j \rightarrow k}}{\gamma} - z_{h,j \rightarrow k} \right) \quad (9)$$

where $p_{min,j \rightarrow k}$ is the least favourable node pressure from among the possible paths of flow between study node j and all end nodes k . To assess the minimum pressure between j and k , the midway nodes without demand are not relevant.

3.3. Manageable topographic energy and accumulated topographic energy

The dispensable part of topographic energy is defined as manageable and is equal to:

$$E_{tr}^m = \gamma \sum_{j=j}^k v_{g,j} \left(\frac{p_{min,j \rightarrow k}}{\gamma} - \frac{p_{0,j}}{\gamma} \right) - E_{er,j} \quad (10)$$

Manageable topographic energy can be recovered (using PATs) or dissipated (using PRVs). Fig. 4b shows that a PRV introduces a height reduction equal to the dissipated manageable topographic energy to the line of piezometric heights. This manageable topographic energy becomes dissipated energy through friction in the PRV.

Finally, to identify the ideal point at which to install a PRV, the concept of accumulated topographic energy is defined as the total manageable topographic energy pertaining to the path that begins at node j and ends at node k, leading to:

$$\Delta E_{tr,j}^m = \gamma \left(\sum_{j=j}^k v_{g,j} \right) \left(\frac{p_{min,j \rightarrow k}}{\gamma} - \frac{p_{0,j}}{\gamma} \right) - \sum_{j=j}^k E_{er,j} \quad (11)$$

The sum includes the total volume $v_{g,j}$ of the nodes along the flow path between study node j and end node k, taking into account that a node can be on more than one path (Fig. 3). In short, the total volume of all nodes downstream from start node j must be considered, as must the fact that all nodes are on one of the possible paths leading to node k. Similarly, we need to consider the sum of the surplus energy between nodes j and k, where applicable.

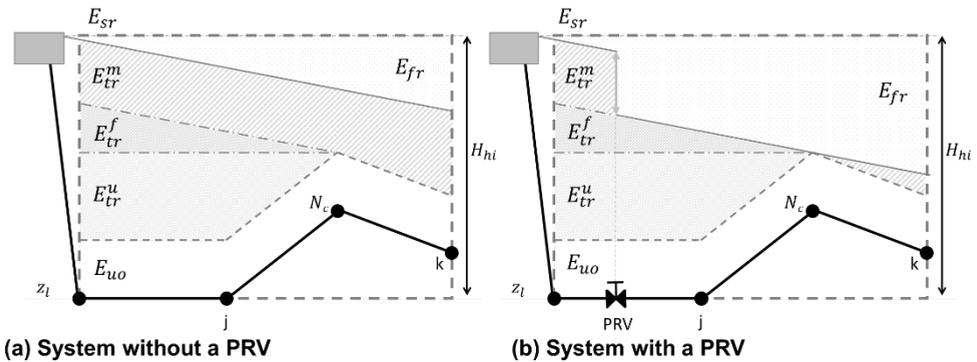


Figure 4. Managing topographic energy without a PRV (a) and with a PRV (b)

The ideal point at which to install a PRV or PAT is the location where the highest amount of manageable topographic energy is accumulated. This node is able to dissipate (or recover) the maximum amount of topographic energy. After the first device (PAT or PRV) has been installed, a new study is required to identify where the next device should be installed.

The topographic energy, E_{tr} , can be expressed as:

$$E_{tr} = E_{tr}^u + E_{tr}^f + E_{tr}^m \quad (12)$$

To specify the magnitude and type of topographic energy in the system, two indicators are defined, namely, θ_t and θ_{tm} . The first indicator, θ_t , represents the percentage of topographic energy E_{tr} within the total energy supplied to the system E_{sr} :

$$\theta_t = \frac{E_{tr}}{E_{sr}} \quad (13)$$

If the terrain is very irregular or if tanks are located higher than necessary, this value will be high (θ_t will nearly equal 1), as topographic energy will represent a high percentage of the total energy supplied. In flat networks with energy efficient layouts, θ_t will be closer to 0. Nevertheless, this information is incomplete since it says nothing about whether the topographic energy is manageable. This information is provided by another indicator, θ_{tm} :

$$\theta_{tm} = \frac{E_{tr}^m}{E_{tr}} \quad (14)$$

This indicator represents the percentage of manageable topographic energy over the total topographic energy. These two indicators provide relevant (and complementary) information about the system.

It is worth analysing the relationship between topographic energy (and its components) and the features of the system:

- a) Influence of the network layout: In systems with supply points located at different heights, topographic energy can be important. Changes in the layout can reduce topographic energy (Cabrera et al. 2019).
- b) Influence of the energy source: With a rigid supply source, part of the topographic energy can be managed. With a variable source of energy, if it exists excess energy, it can be avoided by regulating the pumping station.
- c) Influence of the system profile: Depending on the profile of the network, topographic energy will be either manageable or unavoidable.

4. BREAKDOWN OF STRUCTURAL LOSSES LINKED TO LEAKS

After having characterised structural losses, we need to discuss some relative aspects of the energy balance. Losses embedded in leaks, E_{lr} (equation 5), are operational losses that are dependent primarily on the water pressure. This term is broken down into two summands. The first includes leaks at standard pressure (E_{lr}^o), whereas the second addresses leaks when there is an excess pressure (E_{lr}^{te}), leading to:

$$\begin{aligned}
 E_{lr} &= \gamma \sum_{j=1}^n v_{l,j} \left[(z_j - z_l) + \frac{p_j}{\gamma} \right] \\
 &= \gamma \sum_{j=1}^n v_{l,j} \left[(z_j - z_l) + \frac{p_{o,j}}{\gamma} \right] + \gamma \sum_{j=1}^n v_{l,j} \left(\frac{p_j}{\gamma} - \frac{p_{o,j}}{\gamma} \right) = E_{lr}^o + E_{lr}^{te}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Consequently, the operational loss linked to leaks is E_{lr}^o , whereas the complementary summand E_{lr}^{te} is included in the topographic energy and excess energy. This approach means we are able to calculate the amount of energy embedded in leaks caused by topographic energy and excess energy. This leads to the following energy balance:

$$E_{sr} = \gamma \left(\sum_{j=1}^n v_{g,j} \right) H_{hi} = E_{uo} + E_{pr} + E_{fr} + E_{lr}^o + E_{er} + E_{tr}
 \tag{16}$$

Operational losses through pumping E_{pr} and excess energy E_{er} are zero in the case of systems supplied through rigid sources. This balance does not include other types of losses (E_{or}), such as load breakages in tanks.

Installing PRVs modifies the values of these terms. The energy dissipated by PRVs is integrated into E_{fr} , whereas E_{tr} will decrease by the same amount. If a PAT is installed, on the one hand, operational losses (those of the hydraulic machine) will be included in E_{fr} ; on the other hand, the energy the turbine produces must be subtracted from E_{sr} , whereas E_{tr} will diminish (energy withdrawn by the PAT).

5. METHODOLOGY APPLICATION AND GENERALISATION

The preceding analyses require the flow directions to be known. The minimum pressure required at a node without compromising nodes further downstream can only be determined if the flow direction is known. Therefore, knowing the water path is fundamental. In branched networks, the flow path is immediately formed and does not vary. In looped networks, the paths may depend on the load status of the network. Nevertheless, PRVs and PATs can only be installed in pipes with only one flow direction; therefore, this flow direction must be properly defined. To focus on the discussed concepts, the two example networks are static. In dynamic networks, an analysis is performed for each network status, after which the set of energies is superimposed, and all the results are integrated for the final analysis.

The authors have developed an algorithm to determinate the water paths in both branched and looped networks that allows complex structural energy audits to be performed. As the focus of this paper is on the new concepts and the proposed procedure, the cases presented are simple to allow the methodology to be better understood.

5.1. Case study 1: branched network

A variable supply source injects water into the branched network of Fig. 5. This figure also includes the pipes' diameters and lengths (with a roughness of 0.1 mm) and different flow paths in the network. There are 6 possible paths through which water can flow, as in branched networks, the number of paths is equal to the

number of end nodes. The pump is located at the lowest height ($z_i=0$ m) and supplies the flow at a pressure of 78.54 mWc ($H_{hi} = 78.54$ m). No losses at the pumping station are deemed to exist. The reference pressure is 15 m at all consumption nodes ($\frac{p_0}{\gamma}=15$ mWc). Hydraulic calculations are carried out using EPANET; therefore, the results are obtained assuming a demand-driven approach for user consumption, while leaks (loaded as emitters) are considered pressure-driven demand. Nevertheless, this nodal structural loss audit could be improved with a global pressure-driven formulation (Ciaponi and Creaco 2018). The proposed structural losses audit could be performed from any of these two perspectives. Nevertheless, regardless of the approach followed, both the concepts explained and the methodology followed would not change.

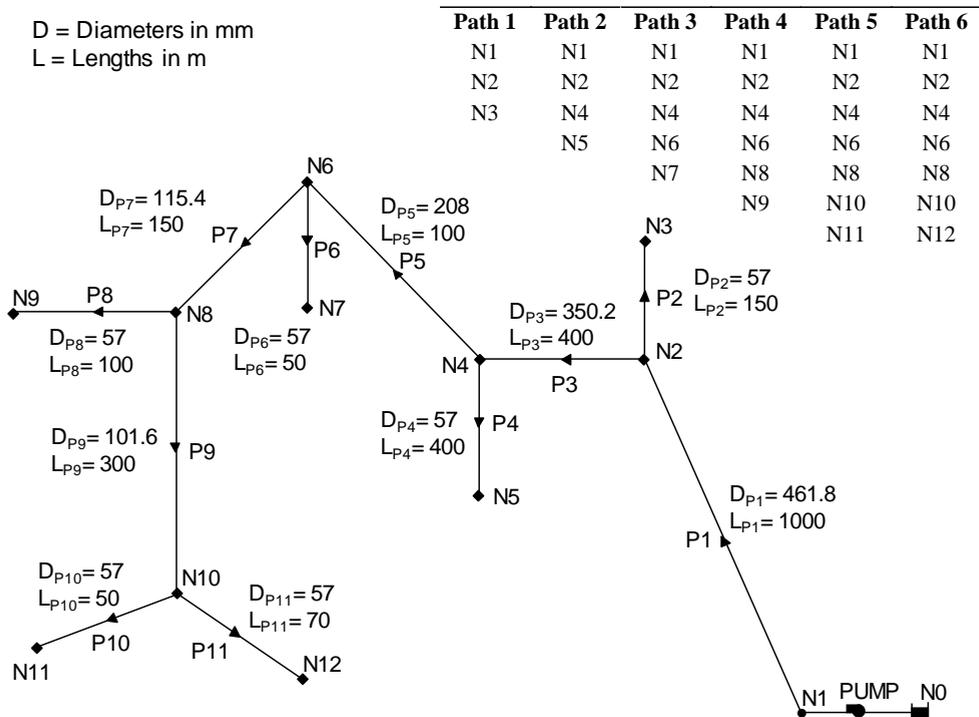


Figure 5. Branched network with a variable supply source

The node data (height, total demand, consumption and leaks) are shown in the first four columns of Table 1. The final three columns in Table 1 show the following: p_j ,

the pressure at each node; $z_{h, j \rightarrow k}$, the greatest height of the set of nodes, including study node j , which are downstream from study node j on any of the possible paths; and $p_{min, j \rightarrow k}$, the minimum pressure resulting from applying identical criteria. Having established the paths, the least favourable node in the network is identified as the one with the least pressure. In this case, the least favourable node is N3 (with a minimum pressure of 20.34 mWc), which, as can be seen, is not the highest node.

Table 3. Node features in the branched network

Node ID	z_j (m)	$v_{g,j}$ (l/s)	$v_{c,j}$ (l/s)	$v_{l,j}$ (l/s)	p_j (mWc)	$z_{h, j \rightarrow k}$ (m)	$p_{min, j \rightarrow k}$ (mWc)
N3	50	3.97	3.83	0.14	20.34	50	20.34
N2	40	2.98	2.78	0.20	38.44	55	20.34
N4	40	0.20	0	0.20	38.33	55	20.82
N5	25	4.20	4.03	0.17	29.26	25	29.26
N6	55	1.65	1.5	0.15	23.06	55	20.82
N7	45	4.56	4.39	0.17	29.54	45	29.54
N8	45	2.95	2.78	0.17	28.37	45	20.82
N9	45	4.73	4.58	0.15	20.82	45	20.82
N10	15	3.01	2.78	0.23	51.56	15	51.56
N11	10	4.23	4	0.23	53.51	10	53.51
N12	5	4.49	4.25	0.24	56.77	5	56.77
N1	0	0.00	0	0.00	78.54	55	20.34
N0	0	-	-	-	-	-	-

Table 2 shows the different overall energy balance terms by node (pumping losses are not considered) and characterises the system's topographic energy. This table includes the term E_{tr}^{te} (already counted in E_{tr}), a fact that must be taken into account when establishing the sum provided by the overall balance E_{sr} .

Table 4. Energy obtained (nodal and overall) in the network (kWh/h)

Nodes	E_{uo}	E_{fr}	E_{lr}^o	E_{lr}^{te}	E_{er}	E_{tr}	$E_{tr,j}^u$	$E_{tr,j}^f$	$E_{tr,j}^m$	$\Delta E_{tr,j}^m$	E_{sr}
N3	2.44	0.32	0.09	0.01	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.06
N2	1.50	0.00	0.11	0.05	0.15	0.54	0.44	0.09	0.01	0.10	2.29
N4	0.00	0.00	0.11	0.05	0.00	0.05	0.03	0.00	0.01	0.23	0.15
N5	1.58	1.00	0.07	0.02	0.21	0.38	0.00	0.00	0.38	0.38	3.24
N6	1.03	0.01	0.11	0.01	0.08	0.05	0.00	0.04	0.02	0.19	1.27
N7	2.58	0.18	0.10	0.02	0.23	0.42	0.00	0.00	0.42	0.42	3.52
N8	1.64	0.15	0.10	0.02	0.15	0.24	0.00	0.22	0.02	0.15	2.27
N9	2.70	0.59	0.09	0.01	0.24	0.03	0.00	0.00	0.03	0.03	3.64
N10	0.82	0.35	0.07	0.08	0.15	0.93	0.00	0.00	0.93	3.63	2.32
N11	0.98	0.62	0.06	0.09	0.21	1.39	0.00	0.00	1.39	1.39	3.26
N12	0.83	0.74	0.05	0.10	0.22	1.62	0.00	0.00	1.62	1.62	3.46
Total	16.10	3.96	0.96	0.46	1.85	5.65	0.47	0.35	4.83	-	28.5

The balance includes excess energy because the minimum pressure, 20.34 mWc, exceeds the required amount, 15 mWc (variable supply source). The difference between these two values is modest because the excess is not significant.

Two actions can be taken to improve the system’s efficiency: adjusting the minimum pressure to the established supply requirements (reducing the speed of the pump) and installing a PRV. Table 2 shows where the PRV should be installed, namely, at N10, where more manageable topographic energy is accumulated than at any other node. Table 3 compares the initial and final scenarios after implementing these two improvements. The values are rather modest because of the analysed energy period. An annual calculation must be multiplied by the hours per year the system is operated.

Table 5. Total energy (kWh/h) in the branched network

	E_{uo}	E_{fr}	E_{lr}^o	E_{lr}^{te}	E_{er}	E_{tr}	E_{tr}^u	E_{tr}^f	E_{tr}^m	E_{sr}	θ_t	θ_{tm}
Initial scenario	16.10	3.96	0.96	0.46	1.85	5.65	0.47	0.35	4.83	28.5	0.20	0.86
Final scenario	16.10	7.36	0.78	0.12	0	1.96	0.46	0.37	1.13	26.2	0.07	0.58

The following conclusions are drawn from this comparison:

- By reducing the relative speed of the pump to 0.976, the pressure at the critical node equals the required pressure. This is more efficient than installing a PRV since, with this action, the E_{er} term is eliminated, reducing the E_{sr} term ($\Delta E_{sr} = 2.3$ kWh/h).
- The contribution of the PRV to energy efficiency is marginal. The reduction in manageable topographic energy (3.70 kWh/h) is compensated by the increase in friction within the PRV ($\Delta E_{fr} = 3.40$ kWh/h). The difference between these variations (0.30 kWh/h) is mainly due to the energy reduction linked to leaks, as a reduction in flow rates impacts on lower friction losses.
- Table 2, particularly column $\Delta E_{tr,j}^m$, pinpoints the optimum location of the PRV to be installed, in this case, at N10. A second analysis with the PRV installed allows us to identify the optimum point at which to install a second PRV (N7).
- Once the PRV has been installed, the indicators referring to topographic energy improve.

On the basis of the information provided in Table 3, each contribution can be studied individually while passing through intermediate stages (i.e., the pump adjustment without and with a PRV).

5.2. Case study 2: looped network

The second example is the looped network depicted in Fig. 6, supplied from a rigid source (N1). The operating pressure is 30 mWc. Table 4 (similar to Table 1) shows the nodes specifications (with a roughness of 0.1 mm) of this network. The arrows show the path of the flow, which is invariable in this load status. The height of the lowest node (N2) is taken as the reference ($z_l = 50$ m).

Table 6. Node features in the looped network

Node ID	z_j (m)	$v_{g,j}$ (l/s)	$v_{c,j}$ (l/s)	$v_{l,j}$ (l/s)	p_j (mWc)	$z_{h,j \rightarrow k}$ (m)	$p_{min,j \rightarrow k}$ (mWc)
N2	50	25.84	25	0.84	142.8	150	37.9
N3	150	30.43	30	0.43	37.92	150	37.9
N4	120	30.59	30	0.59	71.25	120	71.3
N5	90	23.69	23	0.69	97.75	90	97.8
N6	80	40.73	40	0.73	109.84	90	97.8
N7	80	60.73	60	0.73	108.51	90	97.8
N1	200	0.00	0	0.00	0.0	200	37.9

N5 is the end of all three possible paths regardless of the path chosen (Fig. 6).

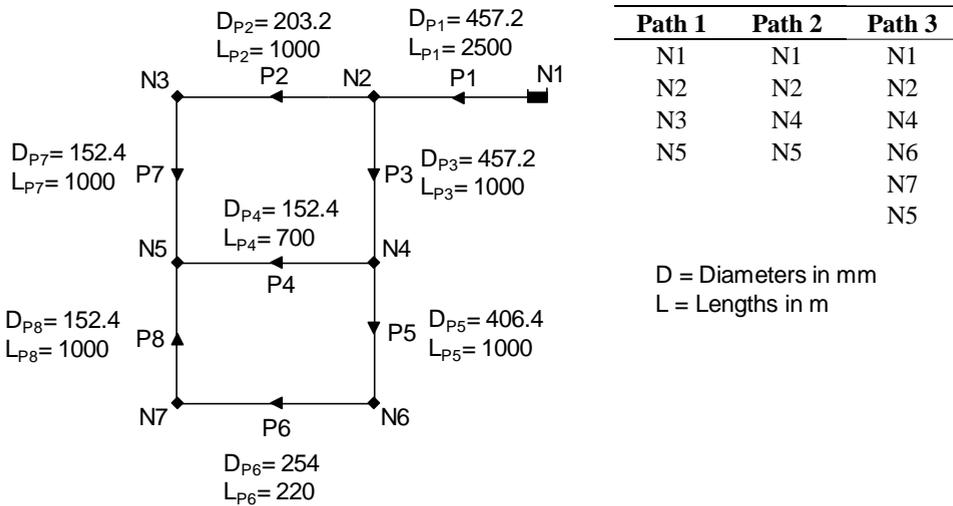


Figure 6. Looped network and flow paths

Table 5 shows the nodal and total energy balances (kWh/h), included the topographic energy breakdown. The maximum accumulated topographic value is at node N6, and thus, the PRV should be installed just upstream of N6 and set at 55 mWc, thereby guaranteeing 30 mWc at all nodes (N3 is the critical node).

Table 7. Nodal and total energy balances (kWh/h)

Nodes	E_{uo}	E_{fr}	E_{lr}^o	E_{lr}^{te}	E_{er}	E_{tr}	$E_{tr,j}^u$	$E_{tr,j}^f$	$E_{tr,j}^m$	$\Delta E_{tr,j}^m$	E_{sr}
N2	7.36	14.50	0.25	0.93	0.00	28.59	25.35	1.24	2.01	16.47	50.70
N3	38.26	18.53	0.55	0.03	0.00	2.36	0.00	0.00	2.36	4.20	59.72
N4	29.43	17.63	0.58	0.24	0.00	12.38	0.00	0.00	12.38	63.02	60.02
N5	15.79	14.47	0.47	0.46	0.00	15.77	0.00	0.00	15.75	15.75	46.48
N6	23.54	24.04	0.43	0.57	0.00	31.90	4.00	0.84	27.07	83.18	79.91
N7	35.32	36.63	0.43	0.56	0.00	46.77	5.96	0.45	40.36	56.11	119.15
Total	149.70	125.80	2.71	2.79	0.00	137.77	35.31	2.53	99.93	-	415.98

Similar to Table 3, Table 6 compares the energy audits without and with a PRV. The main difference lies in the fact that with the PRV installed, the water flow in line P8 changes its direction, and the new end of the line becomes N7. After the PRV is installed, $\theta_t = 0.19$. If further energy reduction is required, a second PRV can be installed. Any additional analysis should consider the three new paths ending at N7.

Table 8. Total hourly energy (kWh/h) of the looped network with and without a PRV

	E_{uo}	E_{fr}	E_{lr}^o	E_{lr}^{te}	E_{er}	E_{tr}	E_{tr}^u	E_{tr}^f	E_{tr}^m	E_{sr}	θ_t	θ_{tm}
Without a PRV	149.7	125.8	2.71	2.79	0	137.77	35.31	2.53	99.93	415.98	0.33	0.73
With a PRV	149.7	185.8	2.35	1.72	0	77.08	25.35	13.82	37.90	414.90	0.19	0.49

As in the preceding example (the branched network), the PRV barely contributes to improving the energy efficiency of the network since the reduction in manageable topographic energy (62.03 kWh/h) is counteracted by a friction increase (60 kWh/h). In this case, as there are fewer leaks in the looped network than in the branched network, the differences are even lower.

6. CONCLUSIONS

The global energy analysis performed in this study from a strictly hydraulic perspective allows topographic energy to be better managed. This energy, although necessary, is inefficient because of the excess pressure over and above the

reference value. These losses, called structural losses, should be reduced beginning at the design stage (through an ecologically friendly layout); when a system is already operating, the possibilities to manage these losses are limited. Recovering or removing part of the existing topographic energy are available options. To better understand and assess the improvement possibilities, it is worth breaking topographic energy down into unavoidable, unavoidable flow-dependent and manageable components. Only the third component can be recovered (using PATs) or removed (using PRVs).

From the energy audit of structural losses, the main novelty of this paper, that is, a strategy that should be followed to break down topographic energy based on a nodal energy analysis, is presented. The proposed methodology analyses the energy at each node and performs a downstream comparison through to the end node on the path. The ultimate aim is to calculate the accumulated topographic energy at each node for each load status. The final sum (superimposing all load statuses) indicates all the energy efficiency benefits of installing a PRV (or PAT), including the benefits stemming from reducing leaks. This automated process, based on a hydraulic model, is capable of analysing real networks.

In summary, while the focus of traditional approaches is on minimising leaks and pressures using mathematical optimisation techniques, this new methodology seeks to maximise the system's energy efficiency through a hydraulic procedure. Consequently, final decisions can be made with a clearer view of the system's behaviour.

NOTES:

Acknowledgment: The authors acknowledge the very careful review made by the three anonymous reviewers which, indeed, improved the understandability and quality of this paper.

Compliance with Ethical Standards

Conflict of Interest: None

Appendix A: Glossary

E_{er} = Energy supplied in excess for the real systems

E_{fr} = Energy dissipated through friction in pipes and valves

E_{lr} = Energy embedded in leaks;

E_{lr}^{te} = Energy embedded in leaks caused by overpressure

E_{or} = Other energy operational losses

E_{pr} = Energy pumping station losses;

E_{sr} = total supplied energy for the real systems

E_{tr} = topographic energy required by the real system

E_{tr}^f = flow topographic energy

E_{tr}^m = Manageable topographic energy

$\Delta E_{tr,j}^m$ = Accumulated manageable topographic energy at node j

E_{tr}^u = Unavoidable topographic energy

E_{uo} = minimum required energy by users

H_{hi} = highest piezometric head

$H_{hi,s}$ = piezometric head of the corresponding source s

$p_{0,j}/\gamma$ = required pressure (established by standards) at the generic node j

p_j/γ = pressure at the generic node j

p_{min}/γ = minimum pressure

$p_{min,j \rightarrow k}/\gamma$ = minimum pressure between nodes j and k

$v_{c,j}$ = volume demand at node j

$v_{l,j}$ = volume leakage at node j

$v_{g,j}$ = total volume at node j = $v_{c,j} + v_{l,j}$.

z_j = Elevation of node j

$z_{h,j \rightarrow k}$ = highest node elevation between nodes j and k

z_l = lowest node elevation

$\alpha_{s,j}$ = percentage of water arriving at the node j that comes from source s

γ = water specific weight

θ_t = percentage of total topographic energy = E_{tr}/E_{sr}

θ_{tm} = percentage of manageable topographic energy; real case = $\frac{E_{tr}^m}{E_{tr}}$

REFERENCES

Agathokleous A, Christodoulou S (2016) Vulnerability of Urban Water Distribution Networks under Intermittent Water Supply Operations. *Water Resources Management* 30: 4731–4750. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1450-3>

Cabrera E, Pardo MA, Cobacho R, Cabrera E (2010) Energy Audit of Water Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(6): 669–677. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000077](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000077)

Cabrera E, Gómez E, Cabrera E, Soriano J, Espert V (2015) Energy assessment of pressurized water systems. *Journal of Water Resources Planning Management* 141(8): 04014095. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000494](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000494)

Cabrera E, Gómez E, Soriano J, del Teso R (2019) Towards eco-layouts in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 145(1): 04018088. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001024)

Castro Gama ME, Quan P, Andreja J, Chiesa C (2014) Model-Based Sectorization Of Water Distribution Networks For Increased Energy Efficiency. 11th International Conference on Hydroinformatics. HIC 2014, New York City, USA

Ciaponi C, Creaco E (2018) Comparison of Pressure-Driven Formulations for WDN Simulation. *Water* 10(4): 523. doi:10.3390/w10040523

Covelli C, Cozzolino L, Cimorelli L, Della Morte R, Pianese D (2016) Optimal Location and Setting of PRVs in WDS for Leakage Minimization. *Water Resources Management* 30(5): 1803–1817. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1252-7>

Creaco E, Franchini M (2013) A new algorithm for real-time pressure control in water distribution networks. *Water Supply* 13(4): 875-882. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.074>

Creaco E, Pezzinga G (2018) Comparison of Algorithms for the Optimal Location of Control Valves for Leakage Reduction in WDNs. *Water* 10(4): 466. <https://doi.org/10.3390/w10040466>

De Paola F, Giugni M, Portolano D (2017) Pressure Management Through Optimal Location and Setting of Valves in Water Distribution Networks Using a Music-Inspired Approach. *Water Resources Management* 31: 1517. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1592-y>

EU (European Union) (2015) EU Reference document Good Practices on Leakage Management. Office for Official Publications of the European Communities, 2015. Luxembourg.

Fecarotta O, Aricò C, Carravetta A, Martino R, Ramos H (2014) Hydropower Potential in Water Distribution Networks: Pressure Control by PATs. *Water Resources Management* 29: 699. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0836-3>

Giugni M, Fontana N, Ranucci A (2014) Optimal Location of PRVs and Turbines in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 140 (9): 06014004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000418](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000418)

Lambert A, Thornton J (2012) Pressure: bursts relationships: Influence of pipe materials, validation of scheme results, and implications of extended asset life. *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2012, IWA, The Hague, The Netherlands*

Lambert A, Fantozzi M, Thornton J (2013) Practical approaches to modelling leakage and pressure management in distribution systems – progress since 2005. *CCWI 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry*

Muhammetoglu A, Nursen C, Karadirek IE, Muhammetoglu H (2017) Evaluation of performance and environmental benefits of a full-scale pump as turbine system in Antalya water distribution network. *Water Supply* 18 (1): 130-141. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.087>

Patelis M, Kanakoudis V, Gonelas K (2017) Combining pressure management and energy recovery benefits in a water distribution system installing PATs. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 66 (7): 520–527. <https://doi.org/10.2166/aqua.2017.018>

Saldarriaga J, Salcedo CA (2015) Determination of optimal location and settings of Pressure Reducing Valves in Water Distribution Networks for minimizing water losses. *13th CCWI. Procedia Engineering* 119: 973 – 983. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.986>

Walski T, Bezts W, Posluszny ET, Weir M, Withman B (2006) Modeling leakage reduction through pressure control. *Journal American Water Works Association* 98 (4): 147-155. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2006.tb07642.x>

Apéndice V

Labeling water transport efficiencies

Gómez, E.; del Teso, R.; Cabrera, E.; Cabrera Jr, E.; Soriano, J.

Water, ISSN 2073-4441

Impact Factor 2018: 2,524. Rank: 29/91 (Q2). Water Resources.

Estado: publicado en 2018.

<https://doi.org/10.3390/w10070935>

A continuación, se expone la versión de autor de este artículo adaptada al formato de la tesis

ABSTRACT

Pressurized Water Transport Systems (PWTs) are responsible for a large percentage of the electricity consumption around the world, and current trends suggest that this proportion will continue to increase in the future. Controlling PWTs is therefore fundamental, including improving efficiency when necessary or compulsory. To achieve this, metrics to objectively assess the efficiency of the different losses and of the whole system are needed. These metrics, based on economic criteria, will be stricter if environmental costs are added to current water and energy costs. To assess different improvement strategies, some relative metrics, applied to both operational and structural losses, are considered. At the end, taking into account their relevance, these metrics are combined in a global energy score (IS), this being the main contribution of this paper. Finally, to focus on the concepts and methodology, a simple case study is presented.

Keywords: energy metrics; labeling; economic energy loss reference; water transport efficiencies

1. INTRODUCTION

Most of the world's fluid transport (measured in $t \times km$) is via pipelines. The significant weight of fluids is a contributing factor especially for water and oil, as are the growing demand for these fluids. In Spain, for example, piped water transport accounts for 66.6% of the total, distantly followed by highway transport (28.3%) [1]. This results in an overwhelming percentage due to an obvious fact: only fluids can be transported by pipe. Moreover, nothing suggests that this situation will decrease in the future. Therefore, more efficient piped fluid transport is required. Specific data also confirm this claim.

In fact, 6% of the total consumed electrical energy in California is due to water transport [2], whereas in Spain, irrigation water alone accounts for 3% of the total [3]. Logically, this energy consumption is not only due to water transport inefficiencies. Gravitational energy due to elevation changes and working pressure are also energy requirements for different usages.

To optimize Pressurized Water Transport Systems (PWTs), work in two directions must be complete. Firstly, fostering improvement strategies from a technical point

of view, such as energy efficiency diagnoses and audits on these systems, must be undertaken, as well as raising awareness among managers, which includes informing and encouraging them. This requires metrics that indicate the level of losses in managed systems are reasonable, in accordance with the current state of the art technologies and standards. This should be globally applicable and easily understood, even for people without specific technical training. This need has already been underlined [4] but our current proposal provides further understanding. The main contribution of this paper is providing a metric that summarizes the global system energy performance, gathering together and weighting all systems' losses, including pumping, leakage, and friction losses. Decoupled analysis of each type of loss, with their corresponding metrics, can be widely found in the literature: pumping station losses [5,6], leakage losses [7,8], pumping and leakage losses simultaneously [9], friction losses [10,11], and pumping and layout (structural) losses [12]. Conversely, pipe-level metrics are available [13], although a global metric based on a well-funded protocol is missing, which was the main objective of this paper.

Global analysis is the only method that can be used to optimize efficiency. Pressurized water transport entails different types of inefficiencies, which have only been addressed separately to date. Efficiency of pumping systems in PWTs is a clear example of the need to conduct extensive analyses. The European Union has fostered a directive imposing minimum pumping performance [14]. Moreover, pump manufacturers have warned that regardless of pump efficiency, if the right pump is not fitted, performance of the assembly can still be very poor. Consequently, the scope has been extended from only considering pump performance to defining an Energy Efficiency Index (EEI), which considers the performance of the pump and the load curve assembly as a whole, within the new Extended Product Approach concept (EPA) [6]. To maximize efficiency, the system curve must be previously optimized.

Consequently, in a global process, the first step is to analyze the system as a whole, then optimize the load system curve, and finally work downward to select the right elements. For example, if the layout is not optimum [15], neither is the system curve nor will the system as a whole be efficient, even if the EEI and the pumping equipment are optimized. It is, therefore, necessary to perform global analyses.

The overall energy efficiency requires jointly analyzing the three parts of the system while simultaneously studying their interdependencies. These parts include the following: (1) Energy sources. Two different types can be considered: Tanks, which are rigid energy sources (RES) and pumping stations, which are variable energy sources (VES). The energy injected into the system by RES is constant, providing variations in the water tank levels are not taken into account. Energy supplied by VES can meet the system's requirements by changing the pump's rotational speed [15]. (2) Piping system and other necessary elements for transporting water, i.e., from a single diameter pipeline to a complex system, with numerous nodes and loops. (3) Points of use, where transported water is delivered. The simplest case would be a tank. In an urban water network, points of use refer to users' installations, whereas in irrigation networks, it refers to final pipes inside the plots supplying sprinklers or drip-irrigation devices.

Once these three parts have been integrated in a PWTS, they create an entire system with a specific layout, largely dependent on the topography that notably affects its energy performance. Achieving the highest efficiency is only possible from a global analysis approach, covering these three parts and without ignoring the framework where it is located.

Previous studies [16–18] described how to perform this global analysis, whereas this article proposes partial and global metrics. The remainder of the paper is organized as follows. In Section 2, system assessment is discussed [16]. The difference between single pipelines and networks and between ideal and real systems are considered and results discussed. Notably, the diagnoses assess the overall energy efficiency, but without providing information on where and how much energy is lost in each phase of the PWTS. Next, the system audit is analyzed [17]. Water and energy audits are required to identify which part of the total energy losses corresponds to each inefficiency. However, metrics are needed to assess the significance of each kind of loss, which is the objective of the next stage. Then the relevance of each kind of loss is evaluated. It is crucial to know whether these losses are excessive, reasonable, or if their current level will be difficult to improve. The proposed reference values are based on economic criteria. Finally, an equation to integrate these partial efficiencies into a single value is proposed. This score that can be used to label the system. Afterward, a simple case study to clarify the methodology is presented. This methodology can be extended to real systems

following the concept herein developed. In fact, from the basic example of this paper, the energy audit of a real case (Bangkok water network) has been recently performed [19].

2. ENERGY ASSESSMENT OF PWTSS

Assuming no operational losses (ideal case), the following data are required to diagnose a system: (1) elevation of the water source, (2) elevation of the demand points z_j with their corresponding consumed volumes v_j , and (3) pressure at the delivery points. In urban networks, pressure is set by the standards, whereas in irrigation networks, it depends on the requirements of drippers or sprinklers, which is zero when a tank is filled.

The simplest case, also fairly common, is pumping water from an aquifer to a tank with a simple pipeline from source to delivery point. Assuming $H = 100$ m of elevation head, a flow $Q = 0.1$ m³/s, which is 8640 m³/day, and no pressure requirements at the delivery point (i.e., a tank), the daily consumed energy is:

$$E = \gamma QH = 2354.4 \text{ kWh/day} \quad (1)$$

Energy intensity I is measured in kWh/m³, and the relation between the energy consumed and the pumped volume is 0.2725 kWh/m³. This is the energy required to pump one cubic meter an elevation of 100 meters. This is an ideal value because transport inefficiencies (friction, leaks, or pumping losses) have not been included.

The indicator generally used is 0.4 kWh/m³ per 100 m elevation. It is assumed that friction losses are 10% of the elevation head (a rather exaggerated figure, only justifiable with long distance water transfer), a pumping efficiency of 75% (a reasonable value), and a non-leaky pipeline. Therefore:

$$I = 0.2725 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times 1.1 \times \frac{1}{0.75} = 0.4 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad (2)$$

In a previous paper [16], this concept was generalized for water networks. Although from a conceptual point of view, the single pipeline network approach is identical, there are three differences to underline. (1) The existence of consumption points

at different heights and with different demands, which introduces two new related concepts: topographic energy and structural losses. These concepts are not logical in pipelines. (2) Network water leaks in practice are unavoidable. This introduces a third type of loss in addition to those mentioned for the simple pipeline. (3) Water supplied at demand points must be delivered at a required pressure ($p_o/\gamma = h_o$).

As such, how to assess the performance of an ideal network is summarized. Further details are provided in a previous study [16]. Figure 1 shows the profile of one pipe of the network that includes intermediate water consumption points. The supplied energy is conditioned by the highest node (z_h) and by the minimum pressure to deliver to users, $p_o/\gamma = h_o$. The heights must refer to the lowest non-zero flow node (z_l). Under these conditions, the efficiency (η_{ai}) is the relation between the minimum energy required to supply to consumers E_{uo} and the energy injected into the system E_{si} :

$$\eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} \quad (3)$$

Where

$$E_{uo} = \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{p_0}{\gamma} \right] \quad (4)$$

And

$$\begin{aligned} E_{si} &= \gamma V H_{hi} = \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{p_{ji}}{\gamma} \right] \\ &= \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{p_0}{\gamma} + (z_h - z_j) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

where V is the total volume to supply in the given period and, if there are no leaks (ideal system), is the sum of all nodal demands, ($V = \sum v_j$), and H_{hi} is the piezometric height of the highest node.

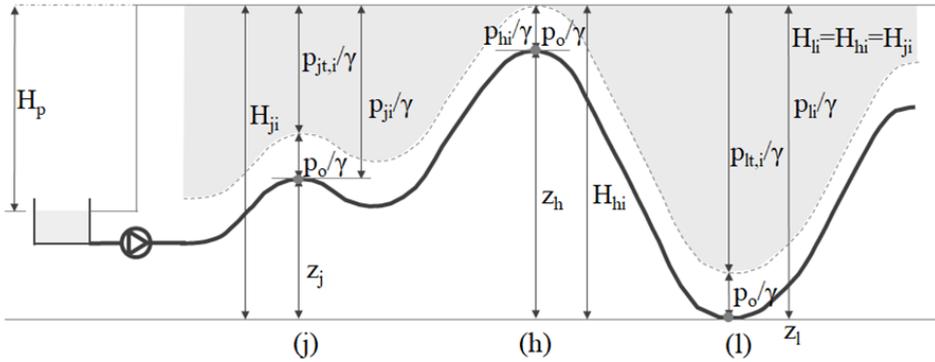


Figure 1. Topographic energy concept in an ideal system, from Cabrera et al. [16]

The ideal topographic energy E_{ti} can be defined as the excess of energy delivered to each node, as shown in Figure 1, thus obtaining:

$$E_{ti} = \gamma \sum v_j \frac{p_{jt,i}}{\gamma} = \gamma \sum v_j (z_h - z_j) \quad (6)$$

Which shows a balance: the total energy injected into an ideal system is the sum of the strictly necessary energy, plus an energy surplus, referred as topographic energy.

$$E_{si} = E_{uo} + E_{ti} \quad (7)$$

Notably, the concept of topographic energy is tied to two facts. First and most important, topographic energy is the link to the land topography, hence its name. With delivery nodes at different heights, this energy will always exist. Since sufficient energy must be guaranteed for the least favorable node, an excess of energy is supplied to the lower nodes. Unlike the previous operational losses, such as leaks or friction, named structural losses. The second factor is linked to RES because, when located higher than necessary, topographic energy in flat areas is generated (Figure 2).

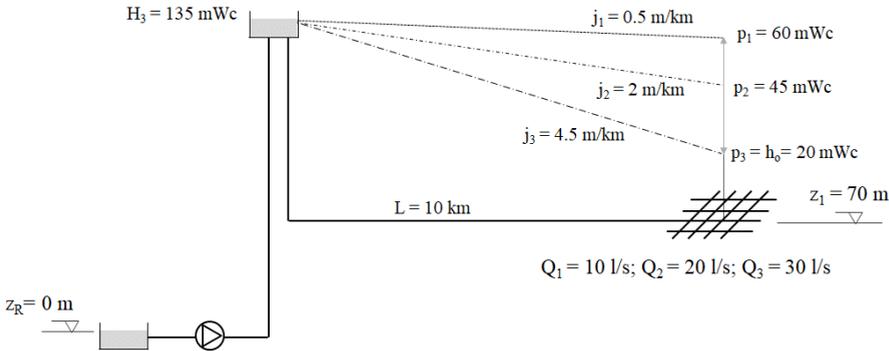


Figure 2. Energy surplus delivered in a flat area from a tank located higher than necessary

By combining Equations (3) and (7), the efficiency of an ideal water distribution network is obtained:

$$\eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} = 1 - \frac{E_{ti}}{E_{si}} = 1 - \theta_{ti} \quad (8)$$

where θ_{ti} is the contribution of the structural losses in decreasing the system efficiency. The structural losses can only be reduced through layout modifications (structural actions). Strictly speaking they are not losses as such because energy is not dissipated but, they are responsible for additional energy being supplied to the system.

In real systems, the energy injected into the system is, to a greater or lesser extent, higher than E_{si} . Figure 3 shows a real system [16] where even more pressure than the minimum required is delivered to the least favorable point. In an energy balance of a real system, the following differences apply:

- 1) The energy E_{uo} is identical in both cases because it only depends on the user demands and the service requirements. This is not the case for the total supplied energy in a real system E_{sr} , which must include losses.
- 2) The operational losses, modifying the piezometric height lines, are energy dissipated through friction in pipes and valves (E_{rf}), energy embedded in leaks (E_{rl}), and pumping station inefficiencies (E_{rp}).

By merging all these real operational losses in E_{ro} , can be stated:

$$E_{ro} = E_{rp} + E_{rf} + E_{rl} \tag{9}$$

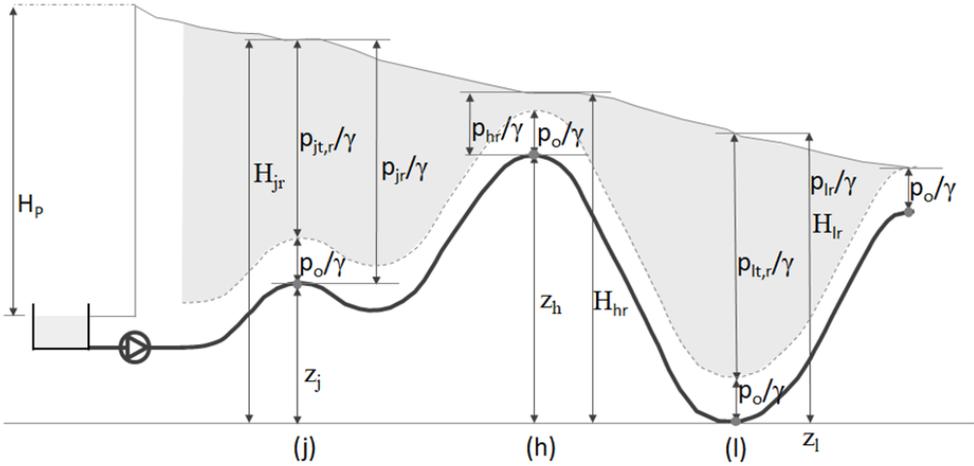


Figure 3. Topographic energy concept in a real system (from Cabrera et al. [16])

The real topographic energy E_{tr} (Figure 3, shaded area) is different to the ideal E_{ti} . E_{tr} is now linked to the new real piezometric height which, with losses, is no longer horizontal. Finally, another type of energy loss exists, the real avoidable losses E_{ra} , which are relatively common. These include excesses of energy delivered at the least favorable node (Figure 3) and depressurization in domestic tanks.

In short, analysis of ideal systems sets the maximum values for system efficiencies. Real systems share the energy efficiency numerator (E_{uo}) with ideal systems, but the denominator, E_{sr} , is substantially different, as shown in Equation (10). That supplied energy can proceed from a RES, natural source E_N , or from a VES also called shaft energy E_p , [17]. Therefore:

$$\begin{aligned} E_{sr} &= E_{uo} + E_{tr} + E_{rf} + E_{rl} + E_{rp} + E_{ra} \\ &= E_{uo} + E_{tr} + E_{ro} + E_{ra} = E_N + E_p \end{aligned} \tag{10}$$

Ultimately, the real efficiency η_{ar} results from:

$$\eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{sr}} = 1 - \frac{E_{ro}}{E_{sr}} - \frac{E_{tr}}{E_{sr}} - \frac{E_{ra}}{E_{sr}} = 1 - \frac{E_{ro}}{E_{sr}} - \theta_{tr} - \frac{E_{ra}}{E_{sr}} \quad (11)$$

Shaft energy E_p is determined from the electricity bill, whereas natural energy E_N can be directly estimated [17], so therefore η_{ar} can be calculated. η_a is the ideal performance less the contributions of the operational losses E_{ro} , the structural losses E_{tr} represented by ϑ_{tr} (topographic energy indicator), and, if any, the avoidable losses E_{ra} .

3. OPERATIONAL AND STRUCTURAL LOSSES METRICS: FINAL LABELING

After the assessment, the system is audited, firstly from a water point of view [20] and then in terms of energy [17]. Figure 4 summarizes the results for a network without domestic tanks, and therefore the only avoidable energy E_{ra} is the excess of pressure. The left of the figure shows the general summary according to Equation (9), and the right shows the losses that have been broken down according to Equation (10). The topographic energy has also been separated. Part of this energy can be managed by recovering it with pumps as turbines (PATs) or dissipating through pressure reducing valves (PRVs), resulting in the manageable topographic energy concept, E_{tr}^m . The complimentary term is the unavoidable topographic energy (E_{tr}^u), which will inevitably continue to be part of the system's energy balance unless the layout is changed [15].

The system as a whole is coupled and therefore operational losses are interdependent. Reducing leaks diminishes friction and simultaneously modifies the operating point of the pumps. However, as the losses are identified and the equations to assess them are decoupled, the losses can be calculated separately [17]. Operational losses are produced in two of the three parts of the system. Losses occur if the energy source is a VES. The transformation of electrical energy in hydraulic energy involves losses that do not exist if the energy comes from a RES, as hydraulic energy is supplied directly without any transformation process. The other two operational losses, friction and leaks, are in the second part of the system in the network pipes, whereas structural losses are at the consumption nodes, corresponding to the third system stage.

Finally, the two kinds of avoidable losses must be considered. The first one, depressurization in domestic water tanks (if any), occurs between the second and third stages. Although there is no loss of water, this inefficiency is similar to a leak from an energy point of view, and therefore can be considered an operational loss. The second avoidable loss is delivering more energy than necessary at the least favorable point and consequently to the entire system. Removing these losses entails reviewing how the energy source works. If the energy source is a RES, the loss is unavoidable and can be classed as an additional structural loss. If the source is a VES, the loss can be minimized using variable speed pumps and should be considered an operational loss.

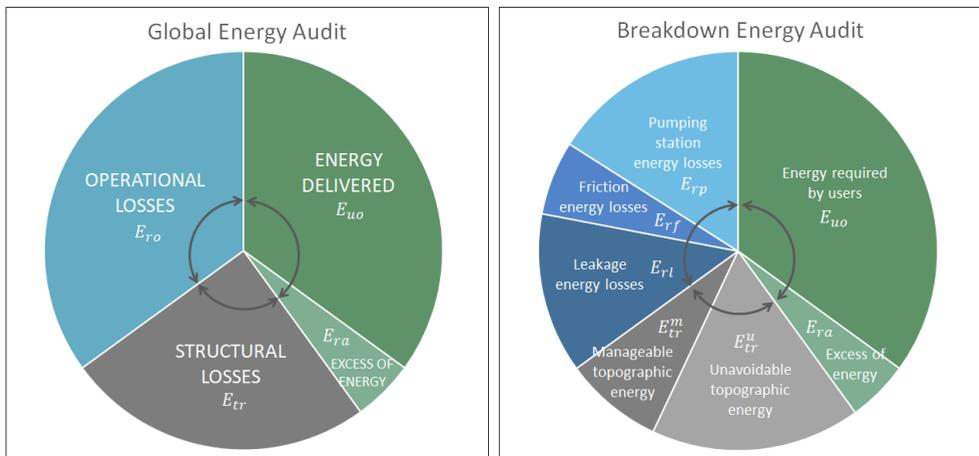


Figure 4. Energy audit of a Pressurized Water Transport System (PWTS)

Once the audit has been performed, the next stage is to identify reference levels, i.e., metrics that permit assessing the relevance of each kind of loss. This allows identifying if losses are excessive, reasonable, or if they are low enough that reducing them further is not practical. This analysis is crucial to determine the priority of actions considered to improve the energy efficiency and, furthermore, to label the global efficiency of the system [21]. The case study will show that a simple quantitative analysis without reference levels can lead to some misleading conclusions.

3.1. Energy Losses Reference Levels

The suggested reference levels are provided for operational losses and structural losses.

Operational Losses, E_{ro}

E_{rl} is the leakage energy losses. Two reference levels, the Economic Level of Leakage (ELL) [22] and alternatively the Infrastructure Leakage Index (ILI) [23], can be used.

E_{rf} represents the friction losses. A previous study provided a similar metric to ELL, called the Economic Level of Friction (ELF) [10], which can be more or less stringent by adding environmental taxes to the energy costs.

E_{rp} represents the pumping station losses (wire to water inefficiencies), referred to the pump only, the Minimum Efficiency Index (MEI). This concept has been defined by the European Commission [14], a criterion extended to the EEI [6], when pumps and motor driven efficiency are considered as a part of the PWTS, such as when coupled to the system load profile. The minimum MEI considered [14] is 0.4 and was adopted for PWTS working for a low number of hours per year (h_w), which is considered to be less than 500 h/year, such as in fire-fighting systems. For higher h_w , a MEI of 0.7 will be adopted. In this new context, with compulsory minimum efficiencies, a pump life cycle cost analysis does not make sense [24]. Although the system's manager can address some losses (e.g., leaks and friction), pump losses cannot be easily changed. They depend on the state of the art and on the right pump selection.

Structural Losses, E_{tr}

Structural losses E_{tr} weighted by ϑ_{tr} , the topographic energy indicator, can be split into manageable topographic energy and unavoidable topographic energy. Manageable topographic energy can be partially recovered with PATs or partially removed with PRVs [15]. Being very much dependent on the PWTS load conditions, a reference level does not make sense. Its relevance is indicated by the manageable topographic energy indicator, $\theta_{tr}^m = \frac{E_{tr}^m}{E_{tr}}$.

E_{tr}^u is unavoidable topographic energy that depends on the network’s topography. It can only be reduced by modifying the system’s layout [15]. Being independent of the management quality, a reference level does not make sense. Its relevance is demonstrated by the unavoidable topographic energy indicator, $\theta_{tr}^u = \frac{E_{tr}^u}{E_{tr}}$ and $\theta_{tr} = \theta_{tr}^m + \theta_{tr}^u$.

Lastly, avoidable losses E_{ra} do not require reference values. They can be, and therefore should be, zero.

3.2. Global Energy Losses Score

The next step was to calculate an energy score for the entire PWTS. The reference levels for losses provide specific values and are of a local nature since they are linked to water and energy costs and can be more or less sensitive to environmental targets by including taxes in their costs. Table 1 summarizes these economic and environmental criteria.

Table 1. Reference levels for operational losses.

Energy Loss Type	Reference Level
Leakage	ELL is used as economic leakage losses reference level, $E_{l,e}$.
Friction	ELF is used as economic friction losses reference level, $E_{f,e}$.
Pump	EEL is used as economic pumping losses reference level $E_{p,e}$. (MEI = 0.4 for low h_w values and MEI=0.7 for high h_w values).

Once the criteria have been established, these levels ($E_{l,e}$, $E_{f,e}$, and $E_{p,e}$) must be calculated for the analyzed system. From the energy audit, leaks and friction energy real losses, E_{rl} and E_{rf} , are known, respectively (Figure 4, right). From the ELL, the economic level of leaks concept, $Q_{l,o}$ is determined, whereas from the ELF procedure, the optimum average unitary head loss, J_o , is calculated. With the present level of leaks Q_l and actual average friction J_o , the reference values $E_{l,e}$ and $E_{f,e}$ can be finally determined, respectively, according to:

$$E_{l,e} = \frac{Q_{l,o}}{Q_l} E_{rl} \quad E_{f,e} = \frac{J_o}{J_a} E_{rf} \quad (12)$$

However, $E_{l,e}$ cannot be directly determined because it depends on the adopted MEI and on the system's characteristic load. It must be calculated from the mathematical model of the network. Equation (13) summarizes this result:

$$E_{p,e} = f(\text{MEI}; \text{PWTS pumping characteristic load}) \quad (13)$$

The global economic energy loss reference $E_{o,e}$ is determined with:

$$E_{o,e} = E_{l,e} + E_{f,e} + E_{p,e} \quad (14)$$

Whereas the score for the proposed global energy index I_s is:

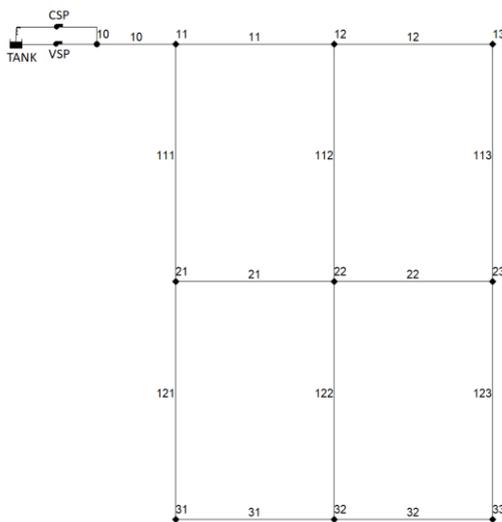
$$I_s = \frac{E_{rl}}{E_{l,e}} \frac{E_{l,e}}{E_{o,e}} + \frac{E_{rf}}{E_{f,e}} \frac{E_{f,e}}{E_{o,e}} + \frac{E_{rp}}{E_{p,e}} \frac{E_{p,e}}{E_{o,e}} = \frac{E_{rl}}{E_{l,e}} \gamma_l + \frac{E_{rf}}{E_{f,e}} \gamma_f + \frac{E_{rp}}{E_{p,e}} \gamma_p \quad (15)$$

where γ_l , γ_f , and γ_p are the weighting factor of leakage, friction, and pump losses, respectively. The optimum value of I_s is one. The higher the value of I_s , the worse the score.

This global energy score I_s represents the weighted operational losses efficiency. Without structural losses metrics, three context performance indicators can be used to provide an idea of its relevance. Two of these indicators, θ_{tr} and θ_{tr}^m , or their complementary value θ_{tr}^u , have been previously defined. The third indicator C_1 clarifies the origin of the energy (natural or shaft) and is given by $C_1 = E_N/E_{sr}$ [17]. Ultimately, θ_{tr} , θ_{tr}^m , and C_1 provide clear information about the relevance of the structural losses and the potential for their reduction. To summarize, the operational losses global score in Equation (15) indicates the efficiency of a PWTS, and could be the basis for a final label, whereas the three structural parameters provide clear information about the framework in which the system operates.

4. CASE STUDY

The network (Figure 5) was adapted from a case study used in a previous paper [17]. It is a simple system to allow focusing on the methodology, so showing the relevance of the reference metrics for each kind of loss is adequate. The quantitative audit result can be misleading and result in bad decision-making. The example corresponds to an urban network.



Nodes		
ID	Elevation (m)	Base Demand (L/s)
10	5.8	0
11	5.8	5
12	4	5
13	2	3
21	4	5
22	2	6.5
23	0	5
31	4	3
32	5	3
33	0	3
TANK	0	-

Pattern Demand (for all nodes)			
Hour	Multiplier	Hour	Multiplier
0:00	0.6	12:00	1.4
1:00	0.5	13:00	1.45
2:00	0.45	14:00	1.45
3:00	0.45	15:00	1.3
4:00	0.5	16:00	1.2
5:00	0.5	17:00	1.2
6:00	0.9	18:00	1.1
7:00	1.3	19:00	1.1
8:00	1.4	20:00	1.2
9:00	1.1	21:00	1.1

Pipes			
ID	Length (m)	Diameter (mm)	Roughness (mm)
10	2000	300	0.1
11	2000	300	0.1
12	2000	300	0.1
21	2000	200	0.1
22	2000	200	0.1
31	2000	200	0.1
32	2000	200	0.1
111	4000	200	0.1
112	4000	250	0.1
113	4000	300	0.1

10:00	1.5	22:00	0.9	121	4000	200	0.1
11:00	1.4	23:00	0.7	122	4000	200	0.1
				123	4000	200	0.1

Figure 5. PWTS case study (adapted from [17])

4.1. Basic Data

In terms of layout, the network length (L_t) is 40 km, the number of service connections (N_c) is 4000, and the total length of service connections (L_a) is 40 km. In terms of volume and leaks, the supplied volume (V) is 4684.6 m³/day, consumed volume (V_U) is 3423.4 m³/day, the leakage volume (V_L) is 1261.1 m³/day, the Technical Indicator for Real Losses (TIRL) calculated by V_L/N_c is 315 L/connection day, and the marginal cost of water is 0.25 €/m³. The Active Leakage Control Curve (ALCC) is $C (\text{€}) = 2 \times 10^8 \times Q_l^{-0.715}$, denoted by Q_l in m³/year. In terms of pressure, the minimum pressure according to standards calculated by p_o/γ is 20 mWc and average pressure (\bar{p}) is 23.6 mWc. For the working pumps, $H_p(\text{m})$ is $46 - 0.007292 Q^2$ (L/s), η_p is $0.03796 Q - 0.00054 Q^2$ (L/s), the electric motor efficiency IE3, η_m is 0.921 (power (P) = 15 kW; speed (N) = 1450 rpm) and working hours/year (h_w) is 8760. Finally, the energy costs for each daily period (€/kWh) are 0.083, 0.15, and 0.22, and the energy supplied is the shaft energy when tank elevation is the lowest (C_1) is 0.

4.2. Energy Audit Results

A water audit was previously performed; Figure 6 condenses the results of the energy audit that was completed as the system is operating. The first pump works at a constant speed (CSP), whereas the second pump is a variable speed pump (VSP). The minimum required energy accounts for 31% of the total energy supplied and consequently the real overall efficiency is $\eta_{ar} = 0.31$. Operational losses, 64%, account for a significant part of the energy balance and the objective was to identify the margin for improvement of each type of loss.

Energy Audit 1VSP + 1CSP	kWh/day
Total energy supplied (E_{sr})	678.8
Energy supplied by pumping stations (E_p)	678.8
Energy pump P1 (Time oper. 24.00 h)	356.0
Energy pump P2 (Time oper. 16.00 h)	322.8
Natural energy (E_N)	0.0
Total energy consumed	678.8
Useful energy delivered to users: $E_{uo}+E_{tr}+E_{ra}$	245.8
Minimum required energy by users (E_{uo})	214.4
Supplied excess energy (E_{ra} and E_{tr})	31.4
Friction energy losses (E_{fr})	87.8
Leakage energy losses (E_{lr})	89.9
Pump + motor energy losses (E_{rp})	255.3
Pump P1 energy losses	138.9
Pump P2 energy losses	116.4

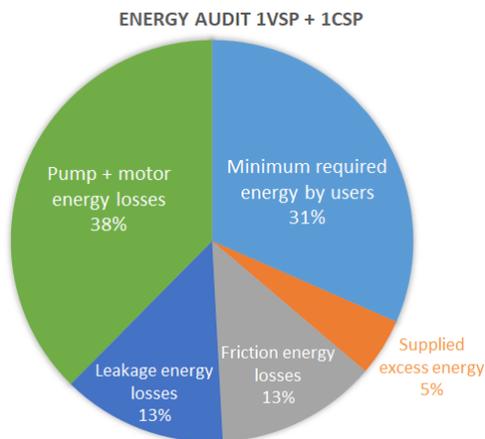


Figure 6. Energy audit result of the initial system with one constant speed pump (CSP) and one variable speed pump (VSP)

Before calculating the reference values for the losses, the working conditions of the two pumps were analyzed. In the initial pumping system (one CSP and one VSP), both pumps frequently operated outside the recommended working points. These extreme points are the partial load flow rate Q_{PL} , 75% of the Best Efficient Point (BEP) flow Q_{BEP} , and the overload flow rate Q_{OL} , equal to 110% of the Q_{BEP} . The reference flow is Q_{BEP} [14].

To enable further adjustment, a simulation with two VSP was performed. The results, depicted in Figure 7, show an improvement of around 5% because most of the working points were within the recommended range. However, as the percentages refer to the total energy demand, which is different in each case, the dissipated pumping energy is examined. In the first case 255 kWh/day was required, and 221 kWh/day was required in the second case, because with two VSP, the working points were closer to the BEP. In summary, for one CSP and one VSP, the working points are outside the recommended range for 15 hours, with a minimum of 36.6% and a maximum of 140.4% over Q_{BEP} , whereas with two VSP, the system only operates outside the range for three hours, with a minimum of 66.6% and a maximum of 118.4% over Q_{BEP} .

This is a remarkable but inconclusive finding because the efficiency of the variable speed driver, which would further hinder the two VSP solution, has not been included. Whichever the case, since this has a minimal impact on the global energy index I_s , the system baseline is considered to be having one CSP and one VSP, as depicted in Figure 6. The system's average pressure over time and space is 23.6 m; this value is necessary for later calculations.

Energy Audit 2VSP	kWh/day
Total energy supplied (E_{Sr})	645.2
Energy supplied by pumping stations (E_P)	645.2
Energy pump P1 (Time oper. 24.00 h)	378.7
Energy pump P2 (Time oper. 16.00 h)	266.5
Natural energy (E_N)	0.0
Total energy consumed	645.2
Useful energy delivered to users: $E_{uo}+E_{tr}+E_{ra}$	246.0
Minimum required energy by users (E_{uo})	214.4
Supplied excess energy (E_{ra} , and E_{tr})	31.5
Friction energy losses (E_{rl})	87.8
Leakage energy losses (E_{rl})	90.0
Pump + motor energy losses (E_{rp})	221.4
Pump P1 energy losses	130.0
Pump P2 energy losses	91.4

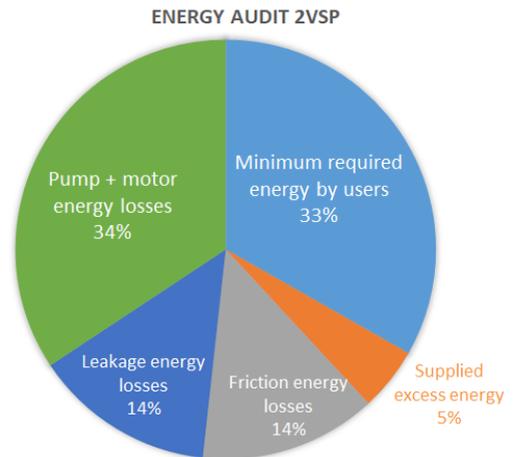


Figure 7. Energy audit result of the initial system with two VSP

Pumping Losses Reference Levels

The results of the system operation (one CSP and one VSP in Figure 6) were compared to the curves whose minimum performance value was previously reported [14]. Basically, the equation that sets the minimum pump efficiency (based on Q_{BEP} , in m^3/h) and the specific speed n_s (in min^{-1}) is:

$$\eta_{BEP} = -11.48(\ln(n_s))^2 - 0.85(\ln(Q_{BEP}))^2 - 0.38 \ln(n_s) \ln(Q_{BEP}) + 88.59 \ln(n_s) + 13.46 \ln(Q_{BEP}) - C \quad (16)$$

In our case, $Q_{BEP} = 35 \text{ L/s} = 126 \text{ m}^3/\text{h}$, $N = 1450 \text{ rpm}$, and $H_{BEP} = 37.74 \text{ m}$, resulting in $n_s = 17.82 \text{ min}^{-1}$. From these values, η_{BEP} is calculated as:

$$\eta_{BEP} = 199.84 - C \quad (17)$$

where the constant C depends on the MEI and the type of pump selected. In this case, Table 2 summarizes the complementary values to determine the minimum required performance [16]. The values were not as high as expected (Figure 8) because all the performed analyses include the efficiency of the alternating current (AC) electric motors as well. The actual pumps and a new MEI 0.4 pump were classified as high efficiency (IE2), whereas the MEI 0.7 pump was classified as premium efficiency, IE3 class. The values adopted for electric motor efficiencies can be found a previous study [25].

Table 2. Minimum required pump performances for ESOB 1450 pumps [16]

Value	MEI = 0.7	MEI = 0.4
C	124.85	128.07
Efficiency Q_{PL}	71.02	67.97
Efficiency Q_{BEP}	74.99	71.77
Efficiency Q_{OL}	73.87	70.70

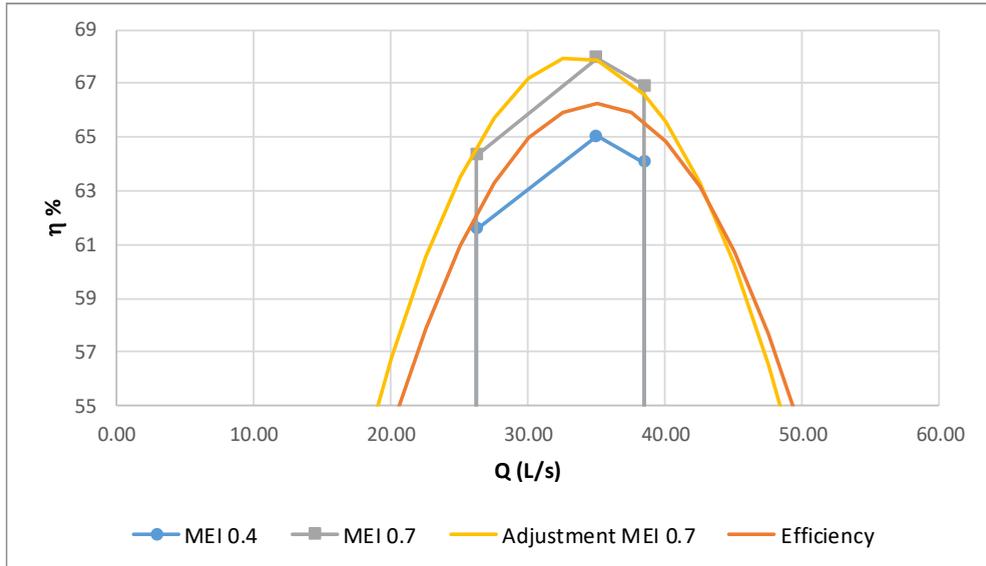


Figure 8. Comparison of working pumps and new pumps (MEI 0.4 and MEI 0.7)

Figure 8 compares the performance of the actual pumps and motors with the minimum requirements previously established [16,25]. The current pumps report a higher performance than pumps with MEI = 0.4. Only pumps with MEI = 0.7 and IE3 class motors would improve current performance. Therefore, calculating the reference value for pumping losses $E_{f,e}$ is completed by adjusting a curve from the values shown in Table 2 for MEI = 0.7 and IE3 class motors.

The energy efficiency analysis of the system with these more efficient pumps and motors is shown in detail in Figure 9. $E_{p,e}$ results in 230.7 kWh/day, obtained from the system energy audit (one CSP and one VSP with MEI = 0.7). Improvements could be more remarkable for higher power. In our case study, the power is only 15 kW.

Energy Audit MEI = 0.7	kWh/day
Total energy supplied (E_{sr})	654.2
Energy supplied by pumping stations (E_p)	654.2
Energy pump P1 (Time oper. 24.00 h)	341.7
Energy pump P2 (Time oper. 16.00 h)	312.5
Natural energy (E_N)	0.0
Total energy consumed	654.2
Useful energy delivered to users: $E_{uo}+E_{tr}+E_{ra}$	245.8
Minimum required energy by users (E_{uo})	214.4
Supplied excess energy (E_{ra} , and E_{tr})	31.4
Friction energy losses (E_{rf})	87.8
Leakage energy losses (E_{rl})	89.9
Pump + motor energy losses (E_{rp})	230.7
Pump P1 energy losses	124.7
Pump P2 energy losses	106.0

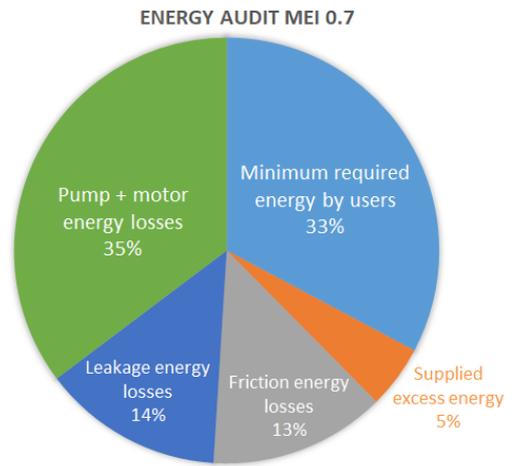


Figure 9. Energy audit result with a MEI = 0.7 pump (one CSP and one VSP)

Friction Losses Reference Levels

Calculating the ELF requires a set of additional data, such as the number of working hours per year, the energy price at different times of use (off-peak, flat, and on-peak), and the pipe’s cost depending on the diameter [10]. The results provide a J_o equal to 1.33 m/km, whereas the actual mean hydraulic gradient J_a is 2.09 m/km. Under these conditions, since the friction losses are proportional to hydraulic gradient, given an E_r of 87.76 kWh/day, the friction reference level is:

$$E_{f,e} = \frac{J_o}{J_a} E_{rf} = \frac{1.33}{2.09} 87.76 = 55.8 \text{ kWh/day} \quad (18)$$

Leakage Losses Reference Levels

The ELL is determined from the ALCC, a well-founded concept expressed in euros. Details of its calculation were previously reported [22,26,27], resulting in

$2 \times 10^8 \times Q_{L0}^{-0.715}$, in m^3/year . The marginal cost of water, assumed to be 0.25 €/m^3 , results in $0.25 \times Q_{L0}$. Therefore, the total cost C_T [20] is equal to:

$$C_T(\text{€}) = 2 \times 10^8 \times Q_{L0}^{-0.715} + 0.25 \times Q_{L0} \quad (19)$$

From Equation (17), the ELL is $350 \text{ m}^3/\text{day}$, a value that permits assessing $E_{l,e}$. Assuming the system's average pressure is constant (in all simulations, the pressure at the critical node is fixed at 20 m), the energy strictly linked to leakage would be reduced by Equation (20):

$$E_{l,e} = \frac{Q_{L0}}{Q_l} E_{rl} = \frac{350}{1261.1} 89.9 = 24.9 \text{ kWh/day} \quad (20)$$

An alternative reference to ELL is available, known as the ILI. This index is, in the analyzed context, much more demanding. It requires calculating the Unavoidable Average Real Losses (UARL) [21] from the equation:

$$UARL = \left(\frac{A \times L_t + B \times N_c + C \times L_a}{N_c} \right) = \left(\frac{18 \times 40 + 0.8 \times 4000 + 25 \times 40}{4000} \right) = 29.03 \text{ l/connection} \cdot \text{day} \quad (21)$$

Taking the value of TIRL, calculating ILI is possible.

$$ILI = \frac{TIRL}{UARL} = \frac{315}{29.03} = 10.9 \quad (22)$$

In other words, the current level of leakage is almost 11 times higher than the recommended value ($ILI = 1$). That means that the level of leakage established by the economic criteria is high. According to this, the initial leakage level of $1261.1 \text{ m}^3/\text{day}$ should be reduced to $350 \text{ m}^3/\text{day}$, when an $ILI = 1$ suggests reducing it to $115.7 \text{ m}^3/\text{day}$. The way to bring both criteria together is by adding an environmental tax to the water cost. For example, adopting the currently valid environmental cost in Denmark of 0.84 €/m^3 [28], the marginal cost of water would rise to 1.09 €/m^3 , and the new ELL would be $148 \text{ m}^3/\text{day}$ with an ILI of 1.28.

Global Energy Losses Reference Level

The final reference value obtained from Equation (14) is:

$$E_{o,e} = E_{l,e} + E_{f,e} + E_{p,e} = 24.9 + 55.8 + 230.7 = 311.4 \text{ kWh/day} \quad (23)$$

The final EEI I_s , also based on the previously calculated baseline values through the audit, results in:

$$E_{rl} = 89.92 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}; E_{rf} = 87.78 \frac{\text{kWh}}{\text{day}}; E_{rp} = 255.25 \frac{\text{kWh}}{\text{day}} \quad (24)$$

Lastly, by combining the real values with the reference values, the final energy efficiency, I_s , results:

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{89.92}{24.9} \frac{24.9}{311.4} + \frac{87.78}{55.8} \frac{55.8}{311.4} + \frac{255.25}{230.07} \frac{230.07}{311.4} = \\ &= 3.61 \times 0.08 + 1.57 \times 0.18 + 1.11 \times 0.74 = 1.39 \end{aligned} \quad (25)$$

This is an acceptable value as it is close to one, because the highest weighting term, which is the energy lost through the pumping station E_{rp} , accounting for 74% of total losses, has a very limited improvement margin (11%). Nevertheless, the highest margin for improvement corresponds to the leak reduction action, 361% higher than the economic value, but only accounts for 8% of the total losses. Therefore, the global efficiency is reasonable. These conclusions are, to a certain extent, different than those reached through the quantitative analysis in Figure 6. Pumping losses account for 38% of the total required energy and are considerably higher than the other two operational losses, which account for 26% of the total. However, the relative analysis highlights the small margin for improvement for these losses, whereas for the other two, the margin is much larger, although with very limited impact.

As for the three context indicators used to assess the contribution of the structural losses in the system, the final values are $C_1 = 0$ (all supplied energy is shaft), $\theta_{tr} = 0.08$, and $\theta_{tr}^m = 0.00$. In conclusion, structural losses are irrelevant in this case study.

5. CONCLUSIONS

The process to improve the PWTs energy efficiency can be performed in three different stages. First, the diagnosis must be completed to calculate the global losses. Second, the audit is performed to break down these losses to calculate their specific weight. The third step, which was the focus of this study, was to assess the margin for improvement in the system by determining the values losses should have from an economic standpoint. By comparing the actual losses with the calculated reference values, the margin for improvement for each component can be estimated. This relative value is more illustrative than the global quantity, as demonstrated by the case study.

Calculating the reference values for friction and leakage operational losses can be directly estimated. However, they are dependent on the load system curve and not on the pumps. As such, an audit with the new pumps was performed in this case. Regardless, it is showed that the difference obtained when friction and leakage improvements were assessed does not justify such a considerable effort. Ultimately, I_s is just an indicator.

The combination of all operational losses in a final score, obtained by combining the improvement margin for each loss with their specific weights, is a clear global efficiency indicator of an operating system. Finally, based on this result, the efficiency of the system as a whole was labeled, being this the main achievement of this paper. In the case study, this margin for improvement was around 40%, relatively small because the energy consumed by the pumps, accounting for 74% of the total operational losses, was only slightly higher (around 11%) than if pumps with MEI 0.7 and IE3 motor drivers were used. More efficient pumps than MEI 0.7 are difficult to find on the market [16]. In systems with bigger pumps, higher improvements could be achieved because pumping efficiency is closely linked to the power of the pumps, which were rather low in this case study.

Author Contributions: E.C. conceived the main idea and structured the paper; E.G. and R.d.T. studied and applied the methodology to different case studies; J.S. reviewed all the ideas presented in the article and the methodology applied to the case study; and E.C. Jr. and the four authors contributed to writing the paper.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

NOTATION:

The following symbols are used in this paper:

ALCC = Active Leakage Control Curve

BEP = Best Efficient Point

CSP = Constant Speed Pump

EI = Energy Efficiency Index

ELL = Economic Level of Leakage

ELF = Economic Level of Friction

EPA = Extended Product Approach

ILI = Infrastructure Leakage Index

MEI = Minimum Efficiency Index

PATs = Pumps as turbines

PRVs = Pressure reducing valves

PWTS = Pressurized Water Transport Systems

RES = Rigid Energy Sources

TIRL = Technical Indicator for Real Losses

UARL = Unavoidable Average Real Losses

VES = Variable Energy Sources

VSP = Variable Speed Pump

C_1 = energy nature coming into the system = E_N/E_{sr}

C_T = Total cost

E_N = Natural energy supplied by the reservoirs or tanks

E_p = Pumping energy (shaft energy) injected into the water pressurized water network;

E_{ra} = Energy avoidable losses

E_{rp} = Energy pumping station losses;

E_{rf} = Energy dissipated through friction in pipes and valves;

E_{rl} = Energy embedded in leaks;

E_{ro} = Energy operational losses = $E_{rp} + E_{rf} + E_{rl}$

E_{si} ; E_{sr} = total supplied energy for the ideal and real systems, respectively

E_{ti} ; E_{tr} = topographic energy required by the ideal and real system, respectively

E_{tr}^m = Manageable topographic energy

E_{tr}^u = Unavoidable topographic energy

E_{u0} = minimum required energy by users (constant, no matter the system be real or ideal)

$E_{l,e}$ = Economic energy leakage losses reference level

$E_{f,e}$ = Economic energy friction losses reference level

$E_{p,e}$ = Economic energy pumping losses reference level

$E_{o,e}$ = Global economic energy loss reference = $E_{l,e} + E_{f,e} + E_{p,e}$

$h_0 = p_0/\gamma$ = required pressure (established by standards)

h_w = number of working hours per year

H_{hi} = piezometric head at the highest node (ideal system)

H_p = piezometric head of the pump

H_{BEP} = piezometric head of the pump in best efficient point

I = energy intensity

I_s = Global energy index

J_a = actual mean hydraulic gradient

J_o = Average Optimum hydraulic gradient

L_t = mains length

L_a = Total length of service connections

n_s = specific speed pump

N = rotational speed pump

N_c = Number of service connections

P = Pump power

p_{ji}/γ = pressure at the generic node j (ideal system)

$p_{jt,i}/\gamma$ = topographic pressure at generic node (ideal system)

\bar{p} = average pressure network

$Q_{l,o}$ = Flow leakage objective

Q_l = Actual flow leakage

Q_{BEP} = Best Efficient Point flow

Q_{PL} = Partial load flow rate = 75% Q_{BEP}

Q_{OL} = overload flow rate = 110% Q_{BEP}

v_j = volume demand at node j

V = total volume demanded by the system

V_U = total volume consumed

V_L = total leakage volume

z_j = Elevation of node j

z_h = highest node elevation

z_l = lowest node elevation

γ = water specific weight

γ_l = weighting factor energy leakage losses reference = $E_{l,e} / E_{o,e}$

γ_f = weighting factor energy friction losses reference = $E_{f,e} / E_{o,e}$

γ_p = weighting factor energy pumping losses reference = $E_{p,e} / E_{o,e}$

η_{ai} ; η_{ar} = ideal and real efficiency of the system

η_m = electric motor efficiency

η_p = pump efficiency

η_{BEP} = pump efficiency in best efficient point

θ_{ti} ; θ_{tr} = percentage of total topographic energy; ideal case = E_{ti}/E_{si} , real case = E_{tr}/E_{sr}

θ_{tr}^m = percentage of manageable topographic energy; real case = $\frac{E_{tr}^m}{E_{tr}}$

θ_{tr}^u = percentage of unavoidable topographic energy; real case = $\frac{E_{tr}^u}{E_{tr}}$

References

Sanz, A.; Vega, P.; Mateos, M. Las cuentas ecológicas del transporte en España. Segunda edición, 2016. Available online: <https://www.ecologistasenaccion.org/?p=28795> (accessed on 12 July 2018). (In Spanish)

Water in the West, Stanford University. Water and Energy Nexus: A Literature Review, 2013. Available online: http://waterinthewest.stanford.edu/sites/default/files/Water-Energy_Lit_Review_0.pdf (accessed on 12 July 2018)

Corominas, J. Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. Ing. del agua 2010, 17, 219–233, doi:<https://doi.org/10.4995/ia.2010.2977>. (In Spanish)

Cabrera, E.; Cabrera, E. Jr.; Cobacho, R.; Soriano, J Towards an energy labelling of pressurized water networks. Procedia Eng. 2014, 70, 209–217.

IDB (Inter-American Development Bank) Evaluation of Water Pumping Systems: Energy Efficiency Assessment Manual; Inter-American Development Bank: Washington, DC, USA, 2011.

Stoffel, B. *Assessing the Energy Efficiency of Pumps and Pump Units : Background and Methodology*; Elsevier Science: Midland, MI, USA, 2015.

Colombo, A.F.; Karney, B.W. Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward Comprehensive Picture. *J. Water Resour. Plann. Manag.* 2002, 128(6), 441–450, doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128:6(441)

Aubuchon, C.P.; Roberson, J.A. Evaluating the embedded energy in real water loss. *J. Am. Water Works Assn.* 2014, 106, 129–138.

HDR Engineering. *Handbook of Energy Auditing of Water Systems*; HDR Engineering: Omaha, NE, USA, 2011.

Cabrera, E.; Gómez, E.; Cabrera, Jr. E.; Soriano, J. Calculating the economic level of friction in pressurized water systems. *Water* 2018, 10(6), 763.

AWWA. *Computer Modeling of Water Distribution Systems (M32): AWWA Manual of Water Supply Practices*; American Water Works Association: Denver, CO, USA, 2005.

Sarbu, I. A study of energy optimization of urban water distribution systems using potential elements. *Water* 2016, 8, 593, doi:10.3390/w8120593.

Hashemi, S.; Fillion, Y.R.; Speight, V.L. Pipe-level energy metrics for energy assessment in water distribution networks. *Procedia Eng.* 2015, 119, 139–147.

EC (European Commission). Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for water pumps. 2012. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0547&from=EN> (accessed on 12 July 2018).

Cabrera, E.; Gómez, E.; Soriano, J.; del Teso, R. Towards eco-layouts in water distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 2018. (Pending publication).

Cabrera, E.; Gómez, E.; Cabrera, E.; Soriano, J.; Espert, V. Energy assessment of pressurized water systems. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 2015, 141, 04014095.

Cabrera, E.; Pardo, M. A.; Cobacho, R.; Cabrera, E. Energy audit of water networks. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 2010, 136, 669–677.

Gómez, E.; Cabrera, E.; Balaguer, M.; Soriano, J. Direct and indirect water supply: an energy assessment. *Procedia Eng.* 2015, 119, 1088–1097.

Lapprasert, S.; Pornprommin, A.; Lipiwattanakarn, S.; Chittaladakorn, S. Energy balance of a trunk main network in Bangkok, Thailand. *J. Am. Water Works Assn.* 2018, 110(7), E18–E27, doi:10.1002/awwa.1053.

Almandoz, J.; Cabrera, E.; Arregui, F.; Cabrera, Jr. E.; Cobacho, R. Leakage assessment through water networks simulation. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 2005, (131-6), 458–466. Available online: https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Arregui2/publication/248880132_Leakage_Assessment_through_Water_Distribution_Network_Simulation/links/5423c8b40cf238c6ea6e5123.pdf (accessed on 12 July 2018).

EC (European Commission). Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council on the indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products. (2010). Available online: <http://www.buildup.eu/en/practices/publications/directive-201030eu-european-parliament-and-council-19-may-2010-indication> (accessed on 12 July 2018).

SMC&EA (Strategic Management Consultants & Environment Agency). Environment Agency, Ofwat, Defra Review of the Calculation of Sustainable Economic Level of Leakage and Its Integration with Water Resource Management Planning; Strategic Management Consultants & Environment Agency: Bristol, UK, 2012.

Lambert, A.; Hirner, W. Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures, 2000. Available online: https://www.researchgate.net/publication/284884240_Losses_from_water_supply_systems_Standard_terminology_and_recommended_performance_measures (accessed on 12 July 2018).

Europump and Hydraulic Institute. Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems; Europump and Hydraulic Institute: Brussels, Belgium, 2001.

ABB. Technical note IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors, 2012. Available

online:[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/20a5783a8b31d05748257c140019cc05/\\$FILE/TM025+EN+RevC+01-2012_IEC60034-30.lowres.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/20a5783a8b31d05748257c140019cc05/$FILE/TM025+EN+RevC+01-2012_IEC60034-30.lowres.pdf) (accessed on 12 July 2018).

Kanakoudis, V.; Gonelas, K. Analysis and calculation of the short and long run economic leakage level in a water distribution system. *Water Util. J.* 2016, 12, 57–66.

Pearson, D.; Trow, S.W. Calculating economic levels of leakage. In proceedings of IWA Conference, Halifax, NS, Canada, 12-14 September 2005. Available online: <http://rash.apanela.com/tf/leakage/Calculating%20Economic%20Levels%20of%20Leakage.pdf> (accessed on 12 July 2018).

Acteon. Economic instruments for mobilizing financial resources for supporting IWRM, 2010. Available online: <https://www.oecd.org/env/resources/46228724.pdf> (accessed on 12 July 2018).

Apéndice VI

Improving energy efficiencies in WDN with EPANET based tools

Gómez, E.; del Teso, R.; Cabrera, E.; Estruch-Juan, E.

1st International WDSA / CCWI 2018 Joint Conference (July 23-25)

Congreso Internacional: Kingston, Ontario, Canada

Estado: presentado en julio de 2018.

A continuación, se expone la versión de
autor de este artículo adaptada al formato
de la tesis

ABSTRACT

In our understanding, initiatives to improve and update EPANET should address serious energy issues. The first action should be to correct the errors that can occur under certain circumstances. The second action, linked to energy issues, should be to increase the capabilities of EPANET in this aspect. In particular, in the last years we have developed some energy tools with a common item, the *EPANET* input data file of the network to be analysed. In this paper, we will describe these tools in some detail. However, in order to show the role of the different tools in the process, we will provide a brief description of the protocol to improve the energy efficiency of a WDN.

Keywords: EPANET; energy-water efficiency; losses

1. INTRODUCTION

With more than 2500 citations in ranked journals and hundreds of thousands of downloads, EPANET [1] is the benchmark software for analysis and design of pressurized water distribution networks (WDN). User-friendly, powerful, reliable and of public domain, it is widely used throughout the world. However, from an energy standpoint, the capacity of EPANET is limited, even under some certain circumstances, its results are erroneous. This is hardly surprising because when EPANET was conceived (last decade of the 20th century), energy was a minor issue and few people paid attention to the energy aspects of a WDN. However, since the first report quantifying the energy linked to water use [2] the situation began to change dramatically. Furthermore, there can be no doubt that efficient use of natural resources, water and energy, will drive the future.

The analysis of the weaknesses and limitations of EPANET as regards energy refers to the current version 2.0. It must be said, that from an energy standpoint, the second version of the software contained very few improvements compared to the original version, with the most important aspect being the inclusion of schedule patterns for energy costs. This improvement allowed the study of total energy expenditure, based on pumping schedule arrangements. A previous paper [3] describes and shows, through a case study, the weaknesses of EPANET in terms of energy aspects. To adapt the most widely used water network software in the world

to today's needs, some improvements were also suggested in the aforementioned paper.

The present paper does not aim to present the errors or shortcomings of the EPANET energy module, but rather to present a series of tools based on the powerful calculation algorithm of EPANET. All the tools presented below are programmed using either the EPANET data file as a starting data file or the EPANET Toolkit to solve the hydraulic equations. All of them are tools that allow implementation of the protocol to improve the efficiency of water pressure networks described by the authors in [4].

To better understand the objective and the usefulness of these tools, the efficiency improvement protocol is summarized in the following section.

1.1. Protocol to minimize energy requirements in water networks

The ultimate goal of any water network, no matter its final use, is to deliver adequate quantities of water to the different points of use at an adequate pressure established by the regulatory standards, currently 20 – 25 m [5]. The requirements must be met with the minimum amount of water and energy, avoiding any kind of losses.

Figure 1 presents the protocol to reduce both types of energy losses, structural and operational. The upper rectangle of the left side column corresponds to the analyzed eco-layout process. This strategy can be unpopular because it is not easy to convince users with a high service pressure that this value must be drastically reduced to the standard value in order to improve the efficiency. The lower left rectangle in Figure 1 summarizes the well-known pressure management strategy implemented with PATs and PRVs. The complete left column shows the three Rs actions (reduce, recover or remove). Topographic energy [3] can only be reduced by modifying the design of the system. Any energy surplus can be removed by dissipating the excess through pressure relief valves (PRV) or, better still, by substituting them for Pumps as Turbines (PAT) to recover that energy [6], if possible. Nevertheless, the optimum solution is to reduce topographic energy at origin.

The right side column is the protocol to minimize the operational losses. This process summarizes the term eco-management, a synthesis of the Eco-management and Audit Scheme process, EMAS [7]. In fact, the two first actions are the network audits (water and energy). Both columns are related because installing PATs and PRVs reduce leaks, modifying the water balance and therefore the energy balance as well. This diagram is an improved version of a former one [8].

Structural losses have been largely ignored until recently. Perhaps because reducing them involves complex, long-term actions that may even be seen as a Utopia and, therefore only applicable to new systems. However, it is important to underline that these actions can be gradually implemented in operating systems [3].

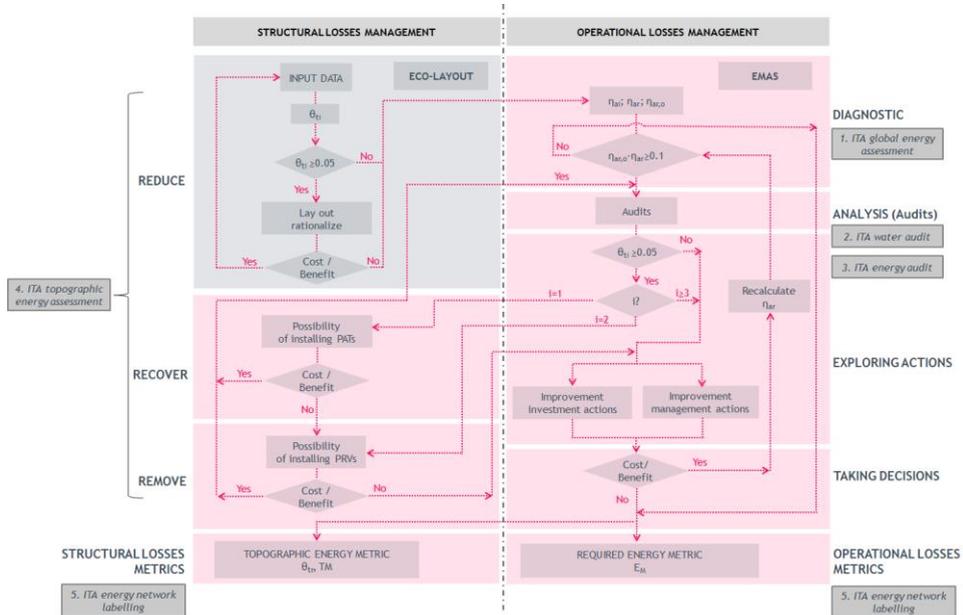


Figure 1. Protocol to reduce the energy requirements in water network

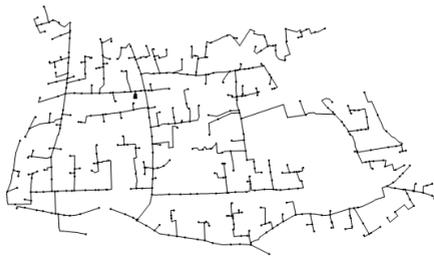
For the right implementation of the protocol, it is obvious that tools are needed. They must be capable of calculating values and indicators that will allow advancing from one stage to another. A brief summary of each of them is presented below in the context of the stage they belong to. In the following sections, these tools will be described in more depth. A case study is also presented.

- f) ITA global energy assessment: From the basic network characteristics (sources and consumption nodes with their corresponding demands and elevation), the tool calculates the ideal energy efficiency of a WDN, η_{ai} . If the system is operating, the real efficiency, η_{ar} can also be calculated from the energy consumed. The difference gives a clear idea about the available improvement margin. The tool is basically based on Cabrera et al. [3].
- g) ITA water audit: The aim of this software is to help the user to breakdown apparent and real water losses in a WDN from the amount of water losses and the characterized demand pattern. The tool is based on Almandoz et al. [9]. It increases the base demand (in each node) from the apparent losses value and iterates the emitter coefficient from leakage, pressure and weighted length node values until the inflow of the model equalizes the input flow measured in the network.
- h) ITA energy audit: This software breaks down the energy input in the system in its different terms. This is the energy required by users, excess of energy delivered to users, friction losses, pumping losses, energy embedded in leaks and compensation energy. This tool is based on the role of water network energy audits [10]. This one, together with the previous one, are basic tools for the auditing process. It is not only necessary to know the amount of water or energy lost, but to know where they are being lost.
- i) ITA topographic energy assessment: From the total energy losses of the system and the topographic characteristics of the network, the tool breaks down structural and operational losses. This tool is founded on an internal report by Del Teso et al. [11]. The layout design of the system is fundamental to reduce the topographic energy. Nevertheless, not all the topographic energy can be reduced. This tool allows calculating how much of the total topographic energy is inherent and how much is manageable, the latter being associated with structural losses.
- j) ITA energy network labelling: This tool calculates partial network operational efficiencies (pumping, leak losses and friction losses) and, at the same time, compares the resulting values with the different reference levels for each kind of loss. Later on, these partial efficiencies are combined

accordingly, in order to calculate a global final mark. This complex tool is in process and is discussed in Cabrera et al. [12] and Del Teso et al. [11].

2. EPANET BASED TOOLS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCIES

The tools described above are presented and detailed in this section. We have used a case study with the aim of showing how each of them works in an intuitive way. The relationship they have with EPANET is underscored. The case study is a real irrigation system, although all the tools described are equally valid for urban systems operating 24 hours with demand modulation. A tree irrigation network (Figure 2) is analyzed. Irrigation is scheduled for the eight off-peak hours (from midnight to 8 am). There are four similar shifts, each lasting for two hours, which permit static simulation because flow rates are practically constant (except at the smaller end branches). Basic data follows:



- Total network length: 55.37 km;
- Current diameter range: 63-800 mm (mainly 200 mm); PVC
- Volume registered: 21,778 m³/day
- Volume injected: 25,621 m³/day
- Operating hours: 1600 hours/year
- Network pressures: 22-63 mWc (average pressure 36 mWc)

Figure 2. Network skeleton and basic data case study

2.1. ITA global energy assessment

This is a simple tool that allows performing an energy diagnosis of a water pressure distribution network, either irrigation or urban. This tool is an MS Excel file that provides results of the energy diagnosis by entering the basic data of the system, which can be done via the inp file. These results will facilitate the decision-making process aimed at improving the energy efficiency of the drinking water or irrigation network.

The benefit of this tool mainly resides in its simplicity. The diagnosis offers three photographs of the system, which can be compared. The main differences between

them are the potential energy saving points in the system. The diagnosis consists of defining three efficiency states of the network. The first indicator corresponds to the ideal efficiency and will depend on the specific characteristics of the system. This ideal performance is unattainable because it is assumed that there is no type of loss in the network. The ideal efficiency value sets the upper efficiency limit. This value can only be improved if the layout of the network is modified.

The second indicator corresponds to the current and real state of the system. This second performance indicator can be compared with the first and the difference is the margin of improvement the network has. Obviously, the farther away real and ideal performance are, the worse the current state of the network will be. Moreover, in the proposed diagnosis, a third photograph of the system between the other two indicators is presented. Since the ideal performance is unattainable, a realistic target is needed: the objective performance. This one represents an improved and achievable state of the system. These optimum limits will be calculated in the last stage. Figure 3 shows the results of the diagnosis for the case study.

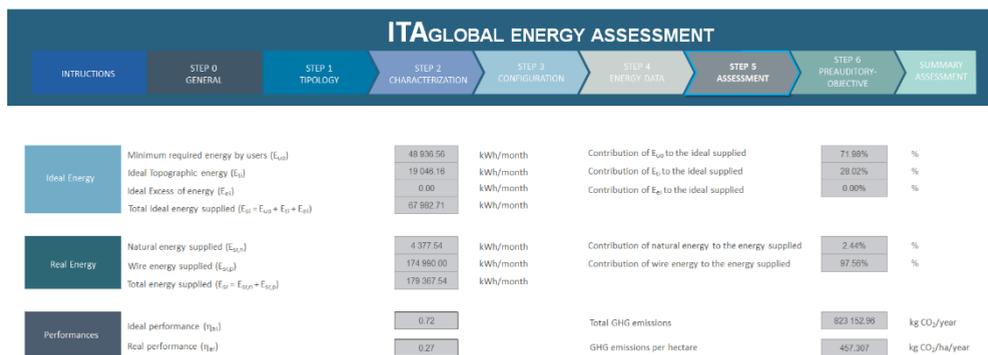


Figure 3. ITA global energy assessment (case study)

As can be seen in the previous screenshot, through minimum data input the calculations show that the ideal performance of the system is 0.72, while real performance is 0.27. Therefore, there is a wide margin for improvement. From the total ideal energy, 28% corresponds to topographic energy ($\theta_{t0}=0.28$) which means that unless the layout is modified, that energy cannot be reduced. As mentioned, this is a diagnosis, so, it does not look for precision, but rather gives an initial view of the state of the system and the possibilities for improving energy performance.

2.2. ITA water audit

ITA water audit is software for private use. This software was designed in view of the need to have a tool that allows entering leaks in the EPANET model in a relatively fast way, with leaks being dependent on pressure. Consequently, the calculation of the emitters of the model is required. This implies an iterative calculation process, given that the leakage flow depends on the pressure, and the pressure available at the nodes depends on the flow through the pipes.

This software is based on the evaluation of leaks from the simulation of the extended period network [9]. The objective of this methodology is to estimate the emitters of the nodes that model the leaks in a supply network. The only data required are, the network in EPANET (file.inp), the monthly injected volume (measured) and the volume billed consumption per month (read directly from the sum of the base demands defined in the EPANET file). The input file has no limitations regarding the size of the network to be analyzed. With modulation of the injected flow and the actual modulation of the customers, the software allows estimating the discretization of the losses. In other words, the software estimates the amount of the total non-revenue water (NRW) in the network corresponding to leaks and the amount that has been consumed but not billed. This can be estimated because their behavior is directly opposite.

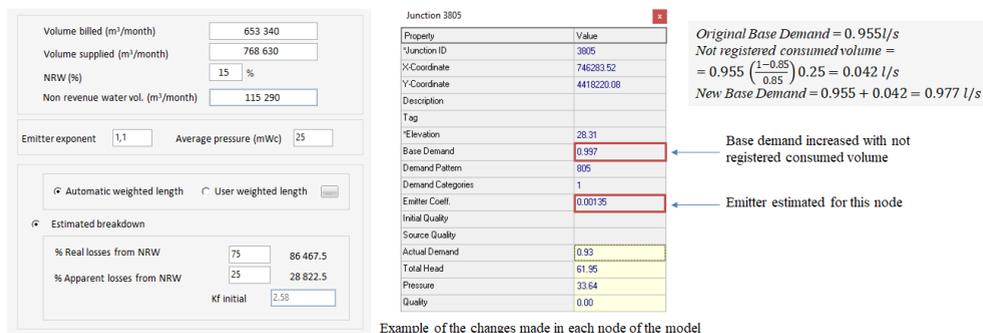


Figure 4. ITA Water audit (case study)

The previous screenshot, Figure 4, shows the input data to be entered into the software once the EPANET model is loaded and the properties of the nodes have been modified. As can be seen, it modifies the base demand to add the

unregistered consumed flow to each node. Then, it iterates the emitter coefficient associated to each node until the average flow injected in the model is equal to the average flow input measured.

2.3. ITA energy audit

The main purpose of this tool is to perform an energy audit of a pressurized water network, calculating the different terms of the audit energy. EPANET's model, compiled in a file.inp, is the input of the tool. It is important to underline that this software audit does not analyze the system. It just handles the results of the extended period simulation analysis provided by EPANET. This means that the validity of the audit depends on the validity of the mathematical model supporting the analysis. Therefore, before performing the energy audit the user must validate the model. As the energy is carried by water, the accuracy of the energy audit is highly dependent on the quality of the water balance. Water loss is a key term of that balance and, once determined, it must be modelled through emitters. The software runs EPANET, performs the simulation and saves all outcome variables, mainly flows in pipes and heights at nodes. The simulation outputs will allow the results of the audit to be calculated.

All the energies that participate in the network are grouped in total energy supplied and total energy consumed. Logically, both values must coincide, since all the energy that enters into the control volume must be the energy that comes out of it. The possible error between the two values will be due to the existence of tanks and will be lower when the calculation interval is smaller. The total energy supplied is the total energy that is injected into the system, i.e. the sum of the energy consumed by all the pumps and the natural energy (potential energy available in the reservoirs). The total energy consumed is all the outgoing energies of the network. This energy can be considered as useful energy when it is delivered to users in the form of flow and pressure or lost energy, not delivered to users (Energy lost through leaks, Energy dissipated in pipes or valves and wasted energy in pumping stations).

The tool also calculates context and performance indicators. Two context indicators are defined. The first one indicates the origin of the energy (natural, -gravitational-, or shaft) and the second one measures how irregular the profile of the system is.

Energy indicators determine how efficient the operation of the network is. With adequate actions and managing the system properly, these values can be improved significantly. The software produces five performance indicators. This tool is explained in full in Gomez et al. [13].

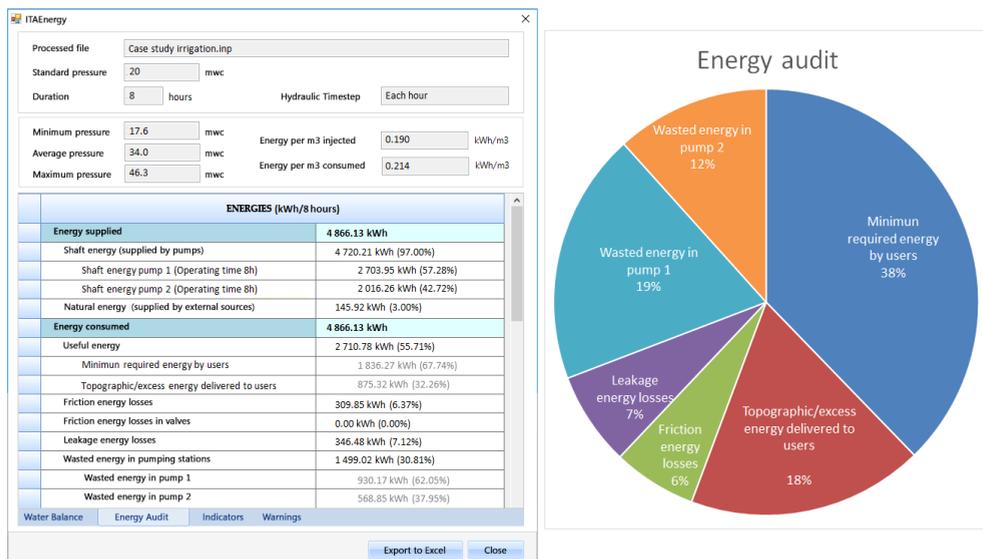


Figure 5. ITA Energy audit (case study)

The result of the audit shows where the energy that is injected into the system goes. Therefore, for this case, we can see that most of the injected energy is delivered to users (55.71%), but from all the energy delivered to them, 32% is above the minimum required pressure and could be reduced. On the other hand, 44.29% of the energy supplied is losses. The greater loss is produced at the pumping stations, being greater than the friction or leaks.

2.4. ITA topographic energy assessment

Energy efficiency in water networks is maximum if the total energy supplied is destined to satisfy the minimum energy required by the users. In other words, the total energy supplied is injected to satisfy the volume of water demanded by each user at the minimum service pressure. However, it is obvious that not all users are located at the same elevation. Therefore, part of the energy supplied is used to

overcome the existing differences in the topography of the system. In an ideal system, without losses, in order to supply the flow demanded at the highest node of the network with the minimum service pressure, the rest of the nodes located at lower levels, would have an excess of pressure, and therefore an excess of energy. This excess of energy, linked strictly to the topography of the network, is the topographic energy.

The topographic energy, although necessary to overcome the irregularities of the terrain, is still an inefficiency transformed into excess pressure supplied to users. Therefore, topographic energy is considered an energy loss classified as structural, since it depends on the structure of the system, and should be avoided as much as possible. Consequently, it is necessary to act from the design phase, trying to find routes and sources of supply that minimize the effects of the variability of elevations. In addition, to supply the minimum energy required by the users and the topographic energy linked to the unevenness of the terrain, it is necessary to provide extra energy to overcome the existing friction losses in the system. This extra energy is considered an excess of energy necessary to ensure that, at least, the service pressure is met at the most unfavorable consumption node at any time of the day. In addition to the structural energy losses linked to the topography of the system, there are energy losses that depend on the operation and management of the network. Therefore, they are not strictly necessary to meet the minimum service requirements. These losses are considered operational energy losses and are calculated through energy audits.

The tool presented in this section calculates the value of topographic energy and the proportion it represents of the total energy. The higher the topographic energy indicator, the lower the ideal performance of the network. However, not all topographic energy should be considered equal. Of the topographic energy introduced in a system, one part is manageable topographic energy, since it can be reduced in some way, while the rest is topographic energy inherent to the system's unevenness and cannot be modified without changing the layout of the network.

This inherent topographic energy is conditioned by the highest points of the network. This energy should always be supplied, even in ideal cases where there are no losses. For this reason, the inherent topographic energy is the same in an ideal and in a real system, since it does not depend on the losses, but only and

exclusively on the unevenness of the network. On the other hand, the manageable topographic energy changes throughout the day depending on the pressures of the network, which is why it is considered manageable, since it can be reduced if the pressure in the nodes is reduced. Pressure reducing valves (PRV) are traditionally used to dissipate pressure excesses, thus reducing the leakage of an installation and the risk of breakage due to overpressure. Something similar happens with PATs, studied in numerous articles in recent years and responsible for recovering some of the excess energy in a system.

This tool calculates all the terms of the topographic energy. To be able to calculate the difference between the inherent and manageable topographic energy, the first step is to calculate all the possible routes that the flow from a node can have to determine if this node has a higher or more critical node downstream.

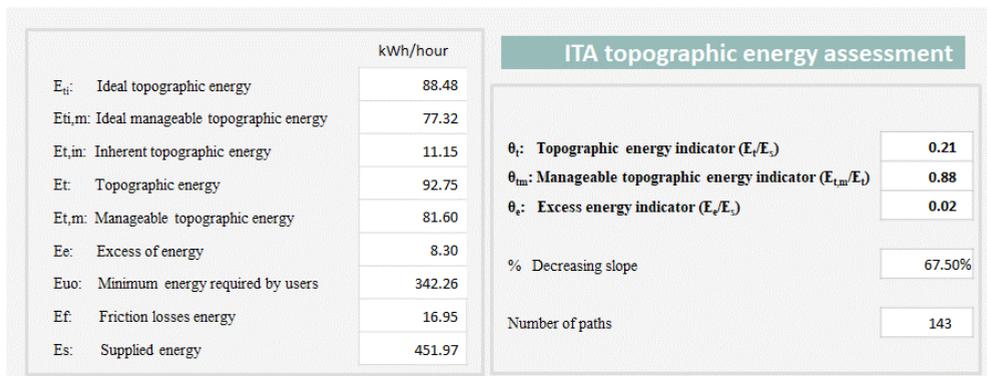


Figure 6. ITA Topographic energy assessment (case study)

2.5. ITA energy network labelling

Operational losses, as described before, are due to different causes. To evaluate these three operational inefficiencies, pumping stations, friction and leakage, we need the corresponding metrics that, although related, can be calculated independently. For example, water losses are energy losses, in themselves, moreover, as leaks increase the flow rates of the pipes, friction losses are also higher. On the other hand, leaks modify the point of operation of the pump and, therefore, its efficiency.

For these operational losses, different metrics are proposed [12]. The tool that is shown below calculates, among the rest of the metrics, the ELF (Economic Level of Friction) similar to the concept of the ELL (Economic Level of Leakage [14]). For structural losses, a combination of the previous indicators of inherent and manageable topographic energy is considered, with respect to the total energy supplied to the network.

For example, the ELF is a value based on the mathematical network model and on the current context and working conditions. This indicator establishes to what extent friction losses are reasonable in a water network. It also sets pipe renovation priorities based on the friction losses criterion. It defines the right diameter for new pipes (from J_o (the economical level of friction) and the average circulating flow). It assesses the impact of J_o on the other two inefficiencies (pumping energy losses and leaks). And it updates renewal policies to changing context conditions.

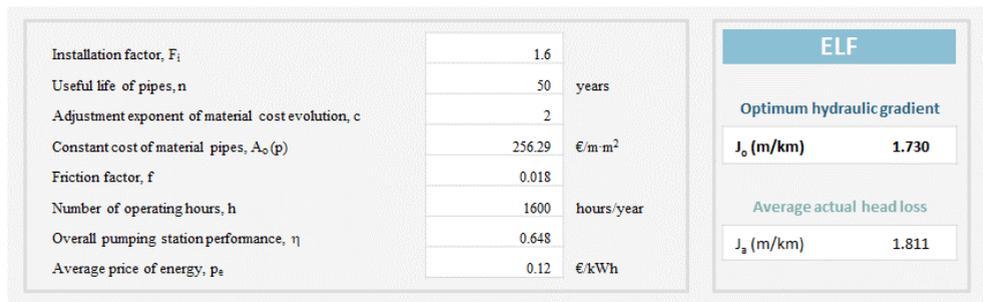


Figure 7. ITA energy network labelling (ELF calculation) (case study)

As can be seen in the previous figure, for this network, the value of the ELF (Economic Level of Friction) is 1.73 m/km. If we compare J_o with the actual value, J_a , 1.81 m/km (average head loss weighted with flow and length for the entire pipe network), we can conclude that, for the actual operating conditions at current prices, the network is slightly under-sized. Since the energy friction losses in the network represent 6%, it makes sense to try to reduce the friction in the system.

3. CONCLUSIONS

All these concepts developed in the last decade at the ITA, supported by the described tools, will be the main support of specific curricula (Efficient Water

Pressurized System Transport) we are developing. All the tools presented require EPANET, and we firmly believe that in a direct or indirect way (for example through initiatives such as those presented here) it is a fundamental tool in the efficient management of pressurized water systems.

References

- [1] Rossman, L. A. (2000). Epanet2 user's manual, US EPA, Cincinnati.
- [2] CEC (California Energy Commission), 2005, California's Water- Energy Relationship. Final staff report. CEC 700-2005-011 SF, California Energy Commission. State California. November 2005.
- [3] Gomez E, Cabrera E, Soriano J, Balaguer M.,2016. "On the weaknesses and limitations of EPANET as regards energy". *Water Science and Technology:Water Supply*. April 2016,16(2)369-377
- [4] Cabrera E., Gómez E., Cabrera E. Jr. Soriano J., Espert V., 2014. "Energy Assessment of Pressurized Water Systems". *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 141, Issue 8 (August 2015)
- [5] Ghorbanian V., Karney B.W., Guo Y., 2016 "Pressure Standards in Water Distribution Systems: Reflection on Current Practice with Consideration of Some Unresolved Issues". *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE. DOI: 10.1061 / (ASCE) WR. 1943 - 5452.0000665.
- [6] Fontana N., Giugni M., and Portolano D., 2012. "Losses reduction and energy production in water distribution networks". *Journal Water Resources Planning and Management*. 138-3. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943- 5452.0000179.
- [7] EC (European Communities), 2011. "The European Eco-Management and Audit Scheme. Improving your environmental and business performance". European Commission. Brussels.
- [8] Cabrera E., Gómez E., Espert V. and Cabrera Jr E., 2017. "Strategies to improve the energy efficiency of pressurized water systems". *Procedia Engineering* 186 (2017) 294 – 302.

- [9] Almandoz J., Cabrera E., Arregui F., Cabrera Jr. E., Cobacho R., 2005. Leakage assessment through water networks simulation. *J. Water Resour. Plann. Manage.* ASCE. Nov-Dec. 2005 pp 458-466.
- [10] Cabrera, E., Pardo, M., Cobacho, R., and E. Cabrera, J. (2010). Energy audit of water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(6):669–677.
- [11] Del Teso R., Gómez E., Cabrera E. and Estruch E., 2018 “Topographic energy management in water distribution systems”. Internal Report. Universidad Politécnica de Valencia.
- [12] Cabrera E., Gómez E., Del Teso R. and Estruch E., 2018 “Energy metrics to assess pressurized water transport efficiency”. WDSA/CCWI 2018. July 2018. Kingston (Canada).
- [13] Gomez E., Sanz F., Pérez-Palomar J.J, Soriano J., García R., Cabrera E. Cabrera E., 2016. “ITAEnergy, a tool to perform energy audits in water pressurized networks”. Water Ideas 2016.
- [14] ERM and Solventa. (2013). “Resource and Economic Efficiency of Water Distribution Networks in the EU” European Commission DG Environment, ENV.D.1/SER/2010/0029.