
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