

GESTIÓN DEL AGUA EN EL MEDITERRANEO Y ENERGÍAS RENOVABLES

Valencia, 18 de octubre de 2016

Eficiencia energética y transporte del agua

Enrique Cabrera
ITA, Universidad Politécnica de Valencia



**GENERALITAT
VALENCIANA**

CONSELLERIA DE AGRICULTURA, MEDIO AMBIENTE,
CAMBIO CLIMÁTICO Y DESARROLLO RURAL

DIRECCIÓ GENERAL DEL AGUA



**CPMR
CRPM**



CPMR
INTERMEDITERRANEAN
COMMISSION

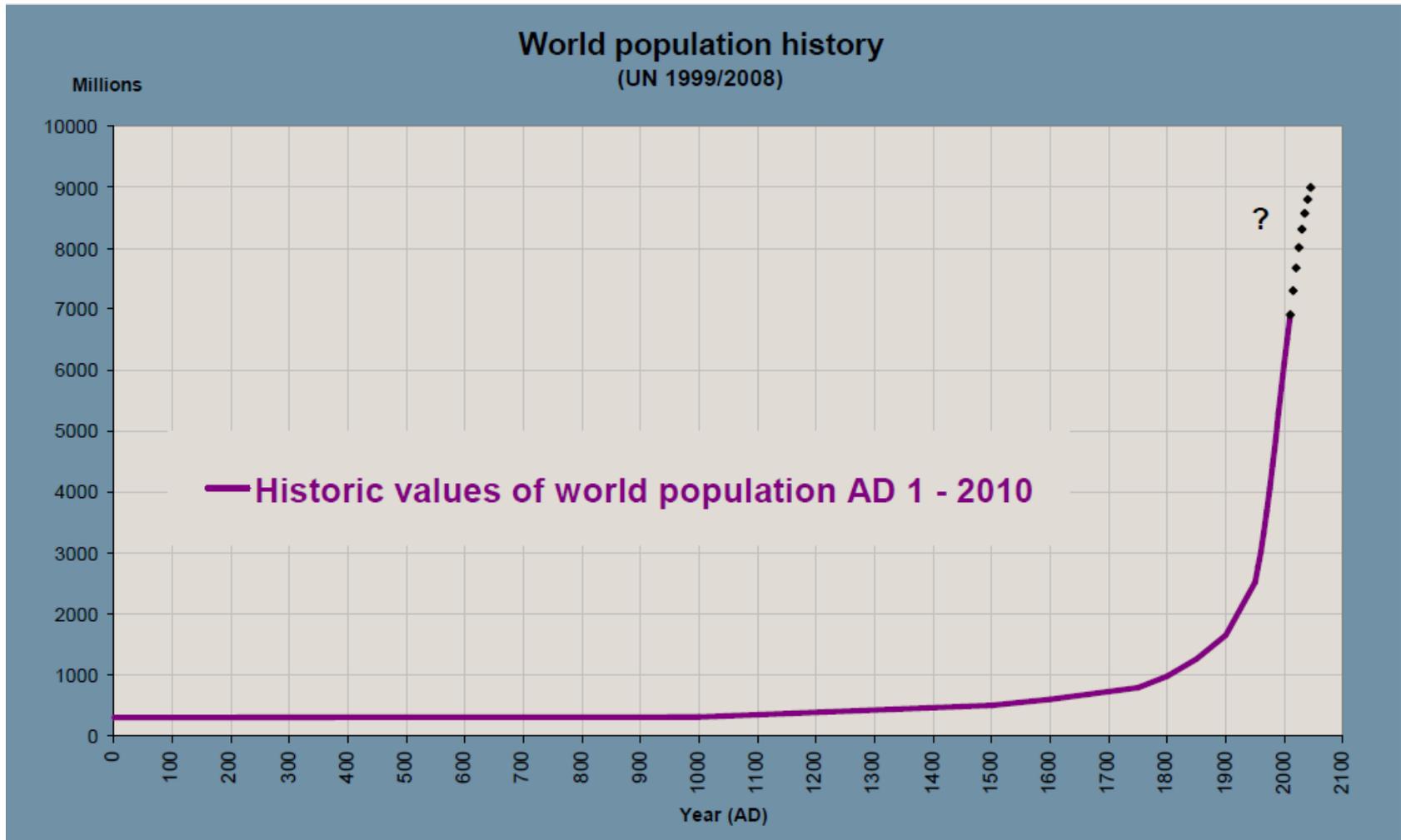


Gestión
sostenible
del agua
urbana

ÍNDICE

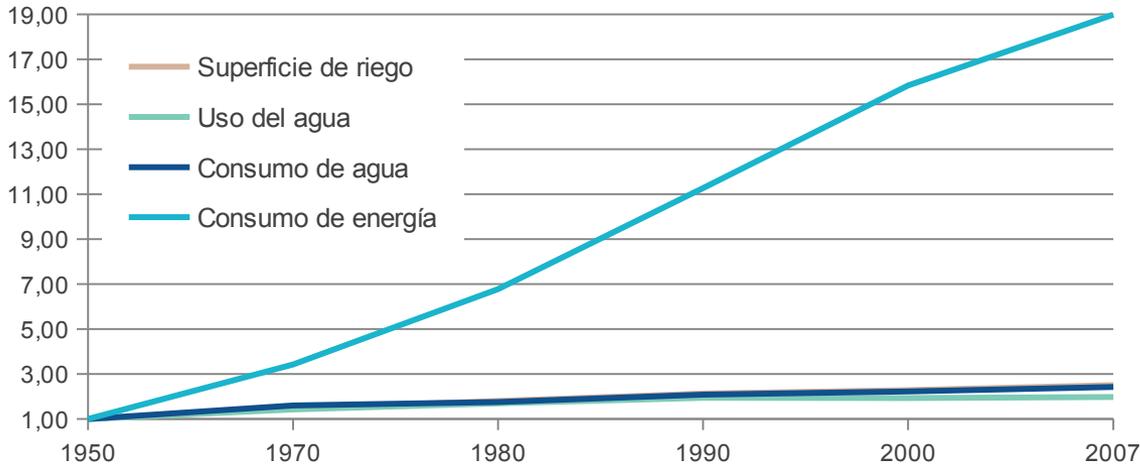
1. Motivación – introducción
2. Metodología para mejorar la eficiencia energética en PWTS
3. Fase de diagnóstico energético
 - La herramienta Eagle
4. Fase de análisis
 - Auditoría hídrica
 - Auditoría energética
 - La herramienta ITAEnergy
5. Propuestas de mejora
 - Acciones operacionales y estructurales
 - Ejemplos
6. Desarrollos futuros
7. Conclusiones

Evolución de la población mundial en los dos últimos milenios. Muchas más necesidades humanas



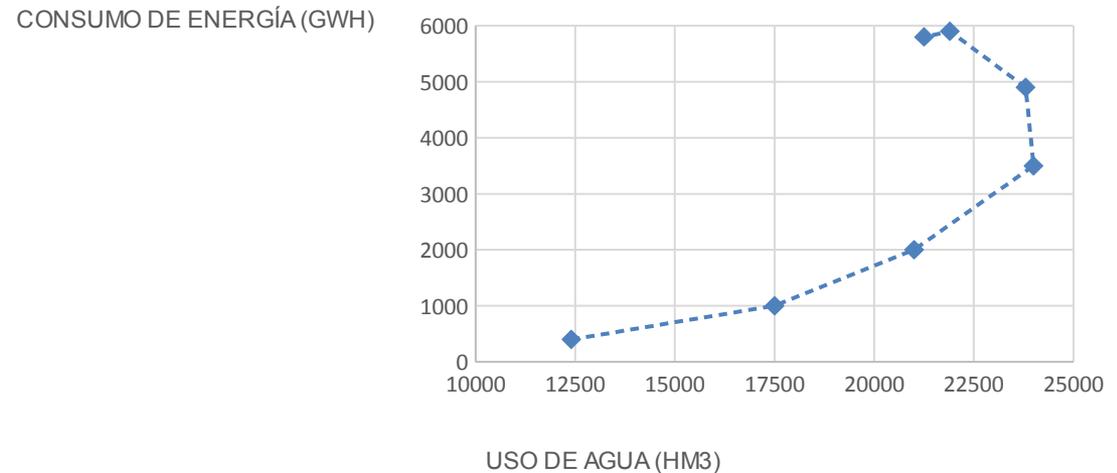
Evolución del agua y de la energía en el regadío español (Corominas, 2010)

EVOLUCION DEL CONSUMO DE ENERGIA PARA RIEGO EN ESPAÑA				
AÑO	SUPERF. (MILES HA)	USO DE AGUA (HM3.)	CONSUMO DE AGUA (HM3)	CONSUMO DE ENERGIA
1900	1000	9000	5400	0
1930	1350	12150	7594	18
1940	1500	12750	8288	19
1950	1500	12375	8353	30
1970	2200	17600	12320	105
1980	2700	20925	14648	209
1990	3200	24000	17400	348
2000	3410	23870	18499	489
2007	3760	24440	20163	586
2007/1950	2,5	2,0	2,4	19,



Evolución del consumo de agua y energía para riego en España con respecto al año 1950. (adaptada Corominas, 2010)

CONSUMO DE ENERGÍA EN LOS REGADÍOS ESPAÑOLES (1950-2013)

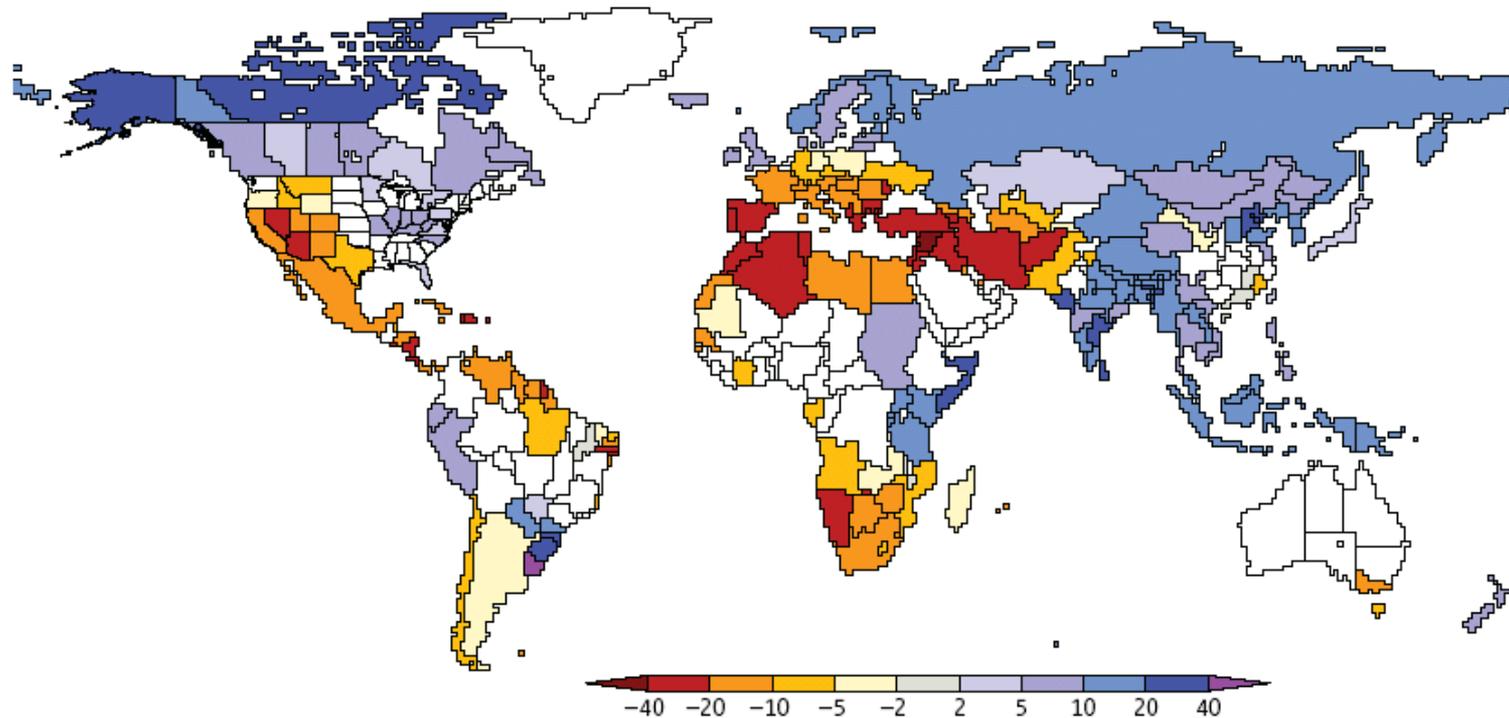


Evolución del consumo de energía en los regadíos Españoles (1950-2013) (Berbel et al., 2014)

USO	CONSUMO	Intensidad	ENERGIA
Urbano e Indus.	5000 Hm ³	5 kWh/m ³	25000 GWh
Riego	24500 Hm ³	0.30 kWh/m ³	7350 GWh
TOTAL			32350 GWh

- Consumo total de España: 230.000 GWh
- Primera estimación total $\approx 14\%$ (total, incluyendo usos finales)
- Transporte (riego $\approx 3\%$ del total, urbano e industrial $\approx 2,5\%$) $\approx 5,5\% = 12650$ GWh

Energía para el agua en España. Estimación personal



Human influences. Dramatic changes in runoff volume from ice-free land are projected in many parts of the world by the middle of the 21st century (relative to historical conditions from the 1900 to 1970 period). Color denotes percentage change (median value from 12 climate models). Where a country or smaller political unit is colored, 8 or more of 12 models agreed on the direction (increase versus decrease) of runoff change under the Intergovernmental Panel on Climate Change's "SRES A1B" emissions scenario.

ÍNDICE

1. Motivación – introducción
2. Metodología para mejorar la eficiencia energética en PWTS
3. Fase de diagnóstico energético
 - La herramienta Eagle
4. Fase de análisis
 - Auditoría hídrica
 - Auditoría energética
 - La herramienta ITAEnergy
5. Propuestas de mejora
 - Acciones operacionales y estructurales
 - Ejemplos
6. Desarrollos futuros
7. Conclusiones

METODOLOGÍA

REFLEXIONES PREVIAS SOBRE EL TRANSPORTE DE AGUA A PRESIÓN

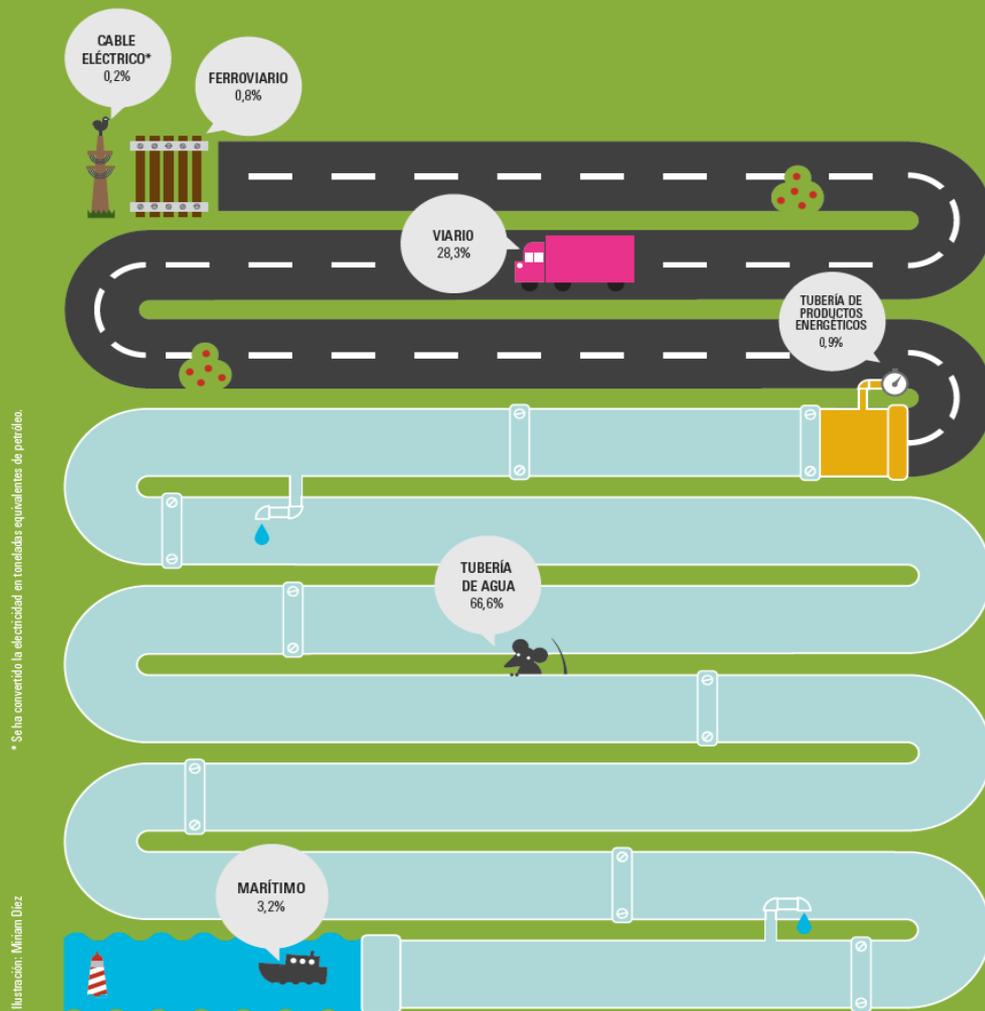
EL TRANSPORTE POR TUBERIA (medido en Tm x km) supone el 66% del total en España

Y aunque a los regantes les puede llegar a suponer un 30% de los gastos corrientes, es extremadamente barato (1 m³ pesa una Tm!!)

EL EJEMPLO QUE SIGUE LO EVIDENCIA

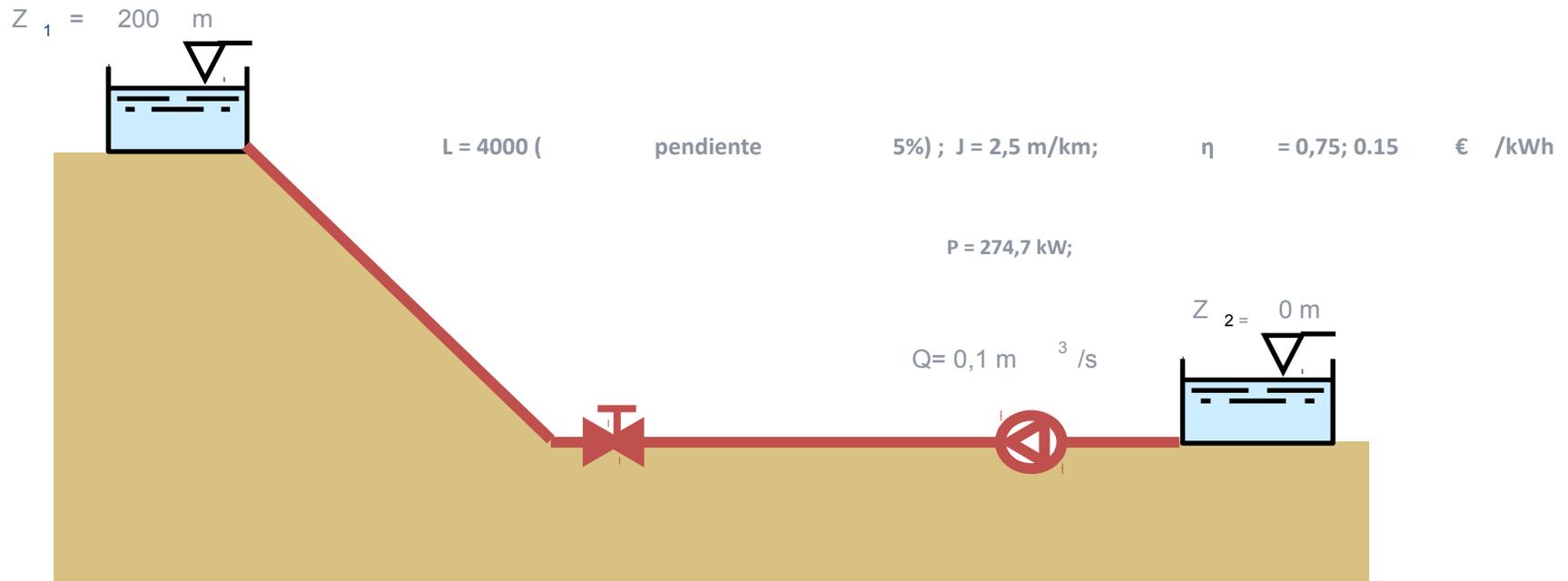
El principal transporte: la tubería

Cuando uno piensa en transporte de mercancías se imagina sobre todo camiones, trenes, barcos, pero hay otros desplazamientos mucho más comunes: los del agua dentro de las tuberías. De acuerdo con el informe *Cuentas ecológicas del transporte* (2014), de Ecologistas en Acción, por dentro de las tuberías de agua se desplazan dos terceras partes de todas las toneladas-km movidas en el interior del país, mucho más que en el transporte por carretera (28,3%), marítimo (3,2%) o ferroviario (0,8%).



REFLEXIONES PREVIAS SOBRE EL TRANSPORTE DE AGUA A PRESIÓN

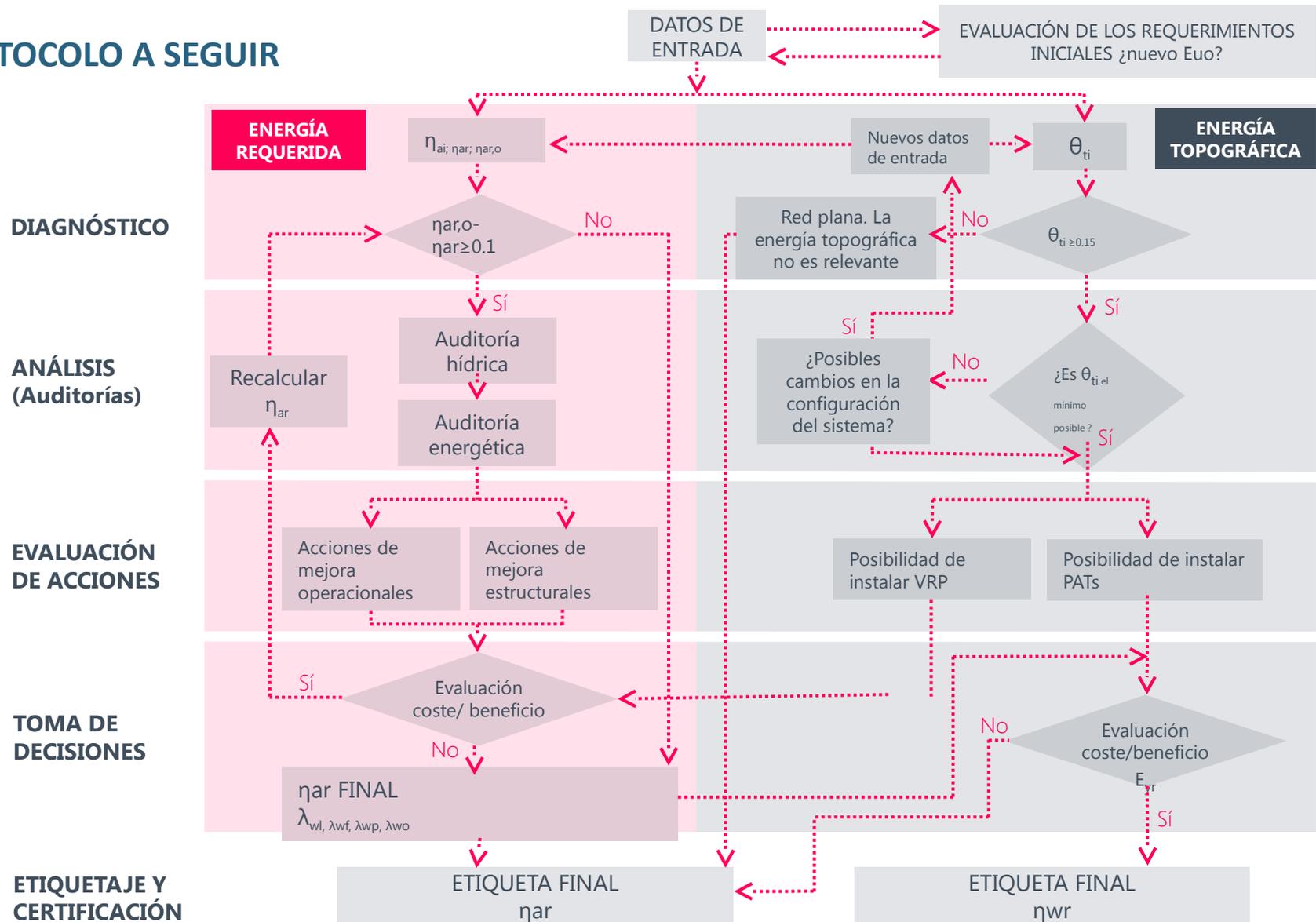
¡¡ transportar 1000 kg, 4 Km con 200 m de desnivel, 0,11 €!!



¡¡PERO HAY UN GRAN MARGEN DE MEJORA!! (del orden del 50 %)

METODOLOGÍA

PROTOCOLO A SEGUIR

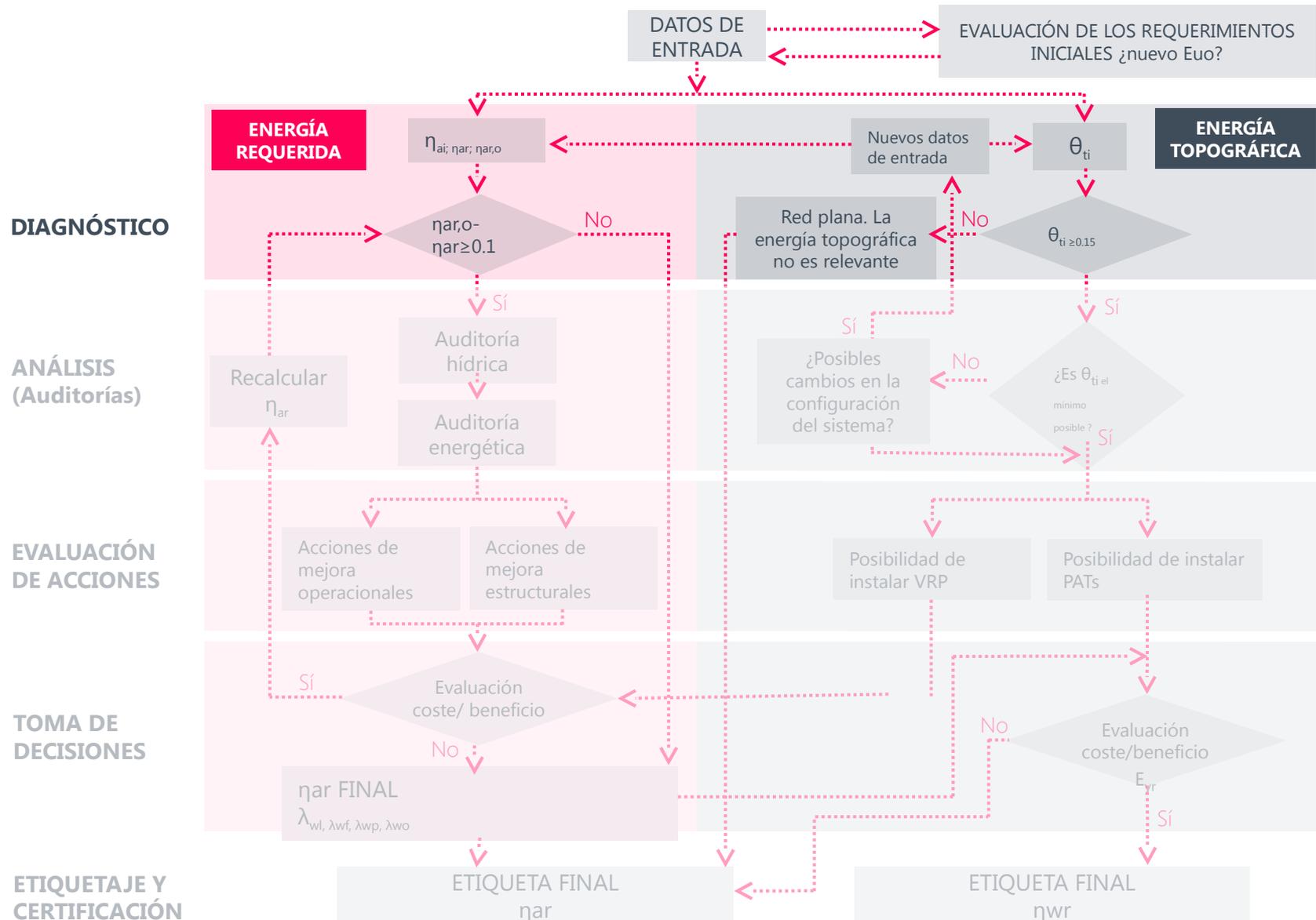


ÍNDICE

1. Motivación – introducción
2. Metodología para mejorar la eficiencia energética en PWTS
3. Fase de diagnóstico energético
 - La herramienta Eagle
4. Fase de análisis
 - Auditoría hídrica
 - Auditoría energética
 - La herramienta ITAEnergy
5. Propuestas de mejora
 - Acciones operacionales y estructurales
 - Ejemplos
6. Desarrollos futuros
7. Conclusiones

METODOLOGÍA PROPUESTA

Diagnóstico energético de una red de agua a presión



EL EJEMPLO MÁS SENCILLO

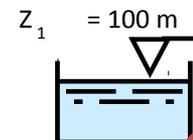
Datos de partida : Caudal y altura de la figura

Potencia necesaria mínima : $P_u = 9,81 \times 0,1 \times 100 \text{ kW} = 98.1 \text{ kW};$

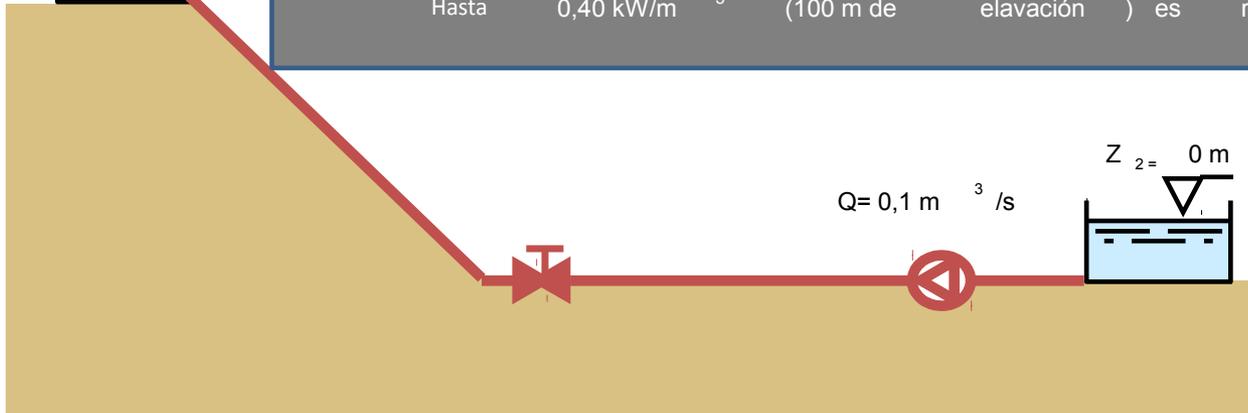
En 1 hora el volumen bombeado es : $V = 0,1 \times 3600 \text{ m}^3$

Trabajo realizado : $E_u = 98.1 \text{ kWh}$

Intensidad energética mínima (100 m) = $0,27 \text{ kWh/m}^3$



Considerando la fricción de las tuberías y el rendimiento de las bombas
Hasta $0,40 \text{ kW/m}^3$ (100 m de elevación) es razonable



EN REDES, AUNQUE EL CÁLCULO ES MÁS COMPLEJO, LA PRECISIÓN DEL DIAGNÓSTICO ES ABSOLUTA

Energy Assessment of Pressurized Water Systems

E. Cabrera, M.ASCE¹; E. Gómez²; E. Cabrera Jr.³; J. Soriano⁴; and V. Espert⁵

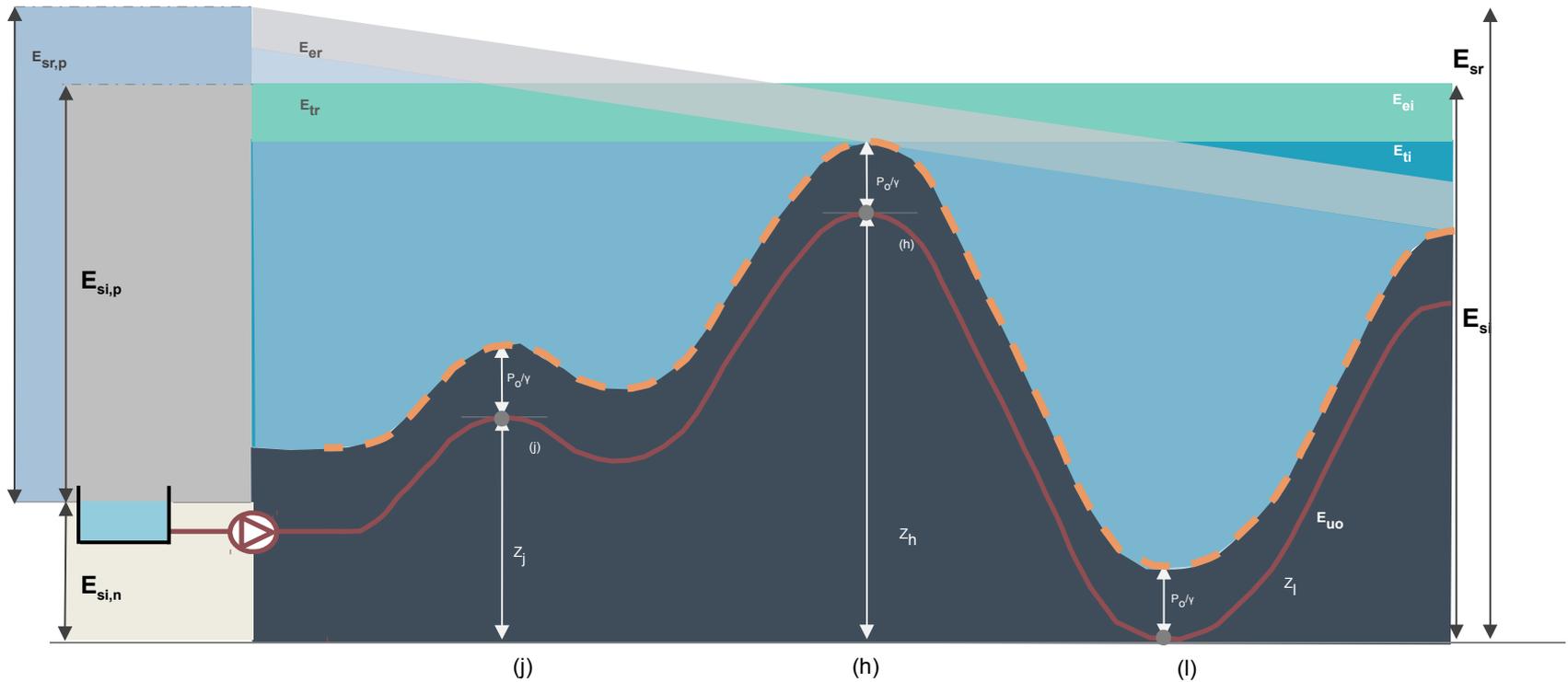
Abstract: This paper presents three new indicators for assessing the energy efficiency of a pressurized water system and the potential energy savings relative to the available technology and economic framework. The first two indicators are the ideal and real efficiencies of the system and reflect the values of the minimum energy required by users—the minimum amount of energy to be supplied to the system (because of its ideal behavior) and the actual energy consumed. The third indicator is the energy performance target, and it is estimated by setting an ambitious but achievable level of energy loss attributable to inefficiencies in the system (e.g., pumping stations, leakage, friction loss). The information provided by these three key performance indicators can make a significant contribution towards increasing system efficiency. The real efficiency indicator shows the actual performance of the system; the energy performance target provides a realistic goal on how the system should be performing; and finally, the ideal efficiency provides the maximum and unachievable level of efficiency (limited by the topographic energy linked to the network topography). The applicability and usefulness of these metrics will be demonstrated with an application in a real case study. DOI: [10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000494](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000494). This work is made available under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license, <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Introduction

A growing population needs more water, more food, and therefore more irrigation. Streamlining these processes is thus essential and especially important in those agricultural countries that are shifting from traditional to pressurized irrigation to save water. However, this transformation process entails a heavy cost: namely, the energy that pressurized water transport systems (PWTS) consume. In California, such consumption accounts for up to 6% of the total

improvement margins, which is precisely the main contribution of this paper.

More specifically, three new indicators are presented to achieve this holistic efficiency assessment. The first two indicators are based on an energy balance of the system, using the values of the energy required by users, the minimum amount of energy to be supplied to the system (because of an ideal behavior), and the actual consumed energy. As a result, a real efficiency and an



$$\eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}}$$

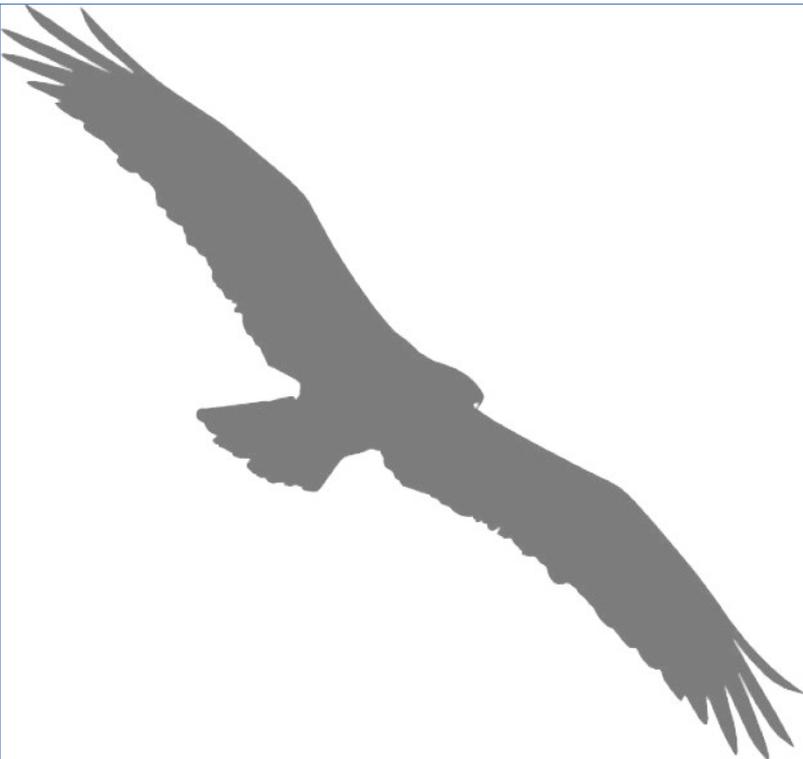
Sistema ideal

$$?? \eta_{ai} - \eta_{ar} ??$$

$$\eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{sr}}$$

Sistema real

1. ¿Qué es EAGLE (Energy Assessment of Global Pressurized Water System) ?
2. Datos que requiere



¿QUÉ ES EAGLE?

Es una herramienta que facilita el diagnóstico energético de una red de agua a presión

Primer paso hacia la mejora de la eficiencia energética en redes urbanas y de riego a presión



EAGLE

Energy Assessment of Global Pressurized Water Systems



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Gestión
sostenible
del agua
urbana

VISIÓN GENERAL

La siguiente herramienta permite obtener una visión general del estado de una red de distribución de agua a presión desde el punto de vista de su eficiencia energética. A partir de la introducción de unos pocos datos, EAGLE ofrece el diagnóstico de la red.

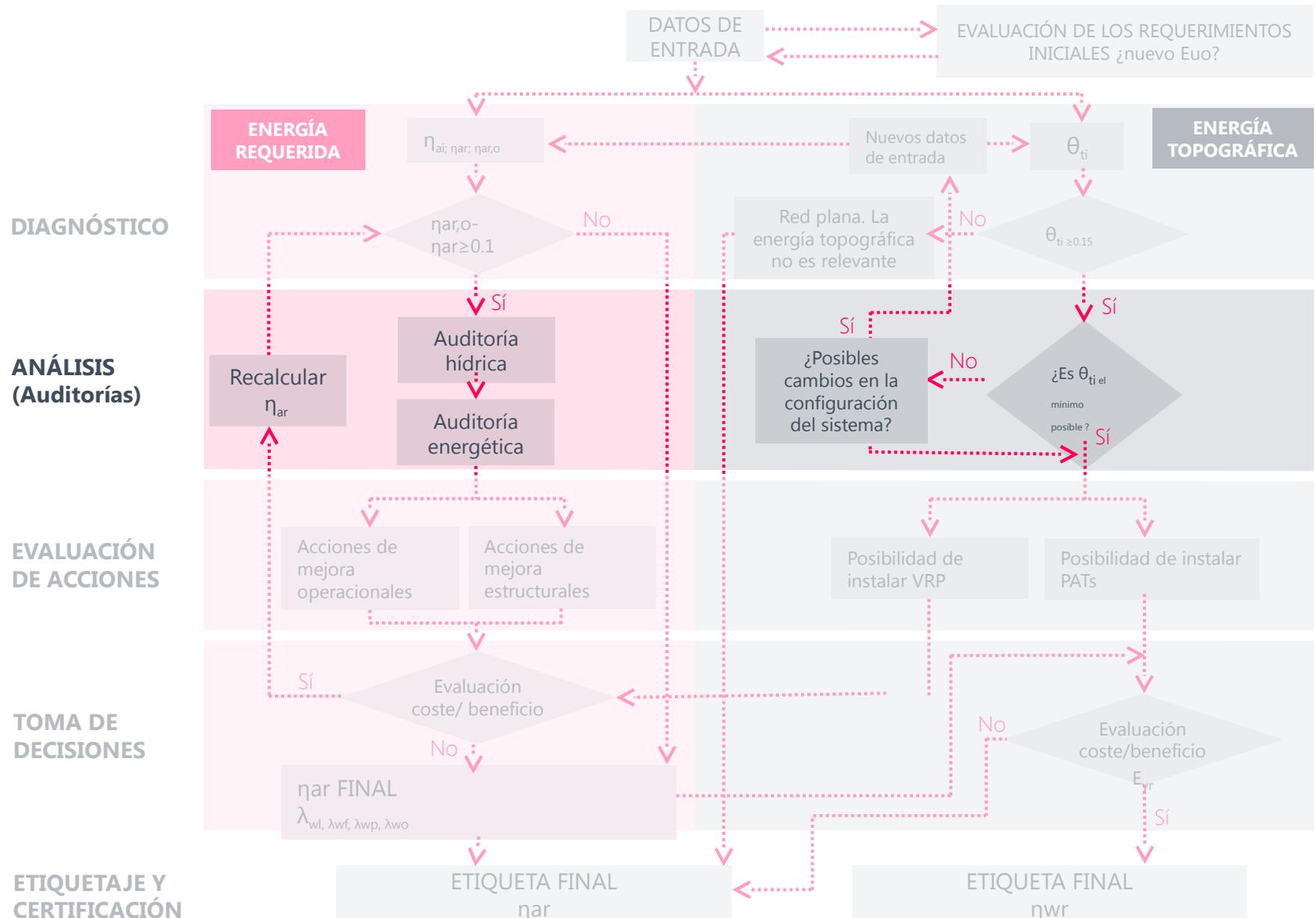
Los resultados del DIAGNÓSTICO ofrecen una valoración del estado actual del sistema desde el punto de vista energético. La comparación de la energía y el consumo de agua actual con los requisitos mínimos de energía aportan una medida de los márgenes de mejora existentes,

Los resultados de la PREAUDITORÍA estiman cómo se distribuyen las pérdidas de energía en el sistema. La estimación de la energía objetivo permite establecer puntos de referencia para la eficiencia energética del sistema de abastecimiento de agua potable o de riego, mediante la definición de requerimientos energéticos mínimos realistas que tienen en cuenta las circunstancias particulares del sistema.

COMENZAR

ÍNDICE

1. Motivación – introducción
2. Metodología para mejorar la eficiencia energética en PWTS
3. Fase de diagnóstico energético
 - La herramienta Eagle
4. Fase de análisis
 - Auditoría hídrica
 - Auditoría energética
 - La herramienta ITAEnergy
5. Propuestas de mejora
 - Acciones operacionales y estructurales
 - Ejemplos
6. Desarrollos futuros
7. Conclusiones



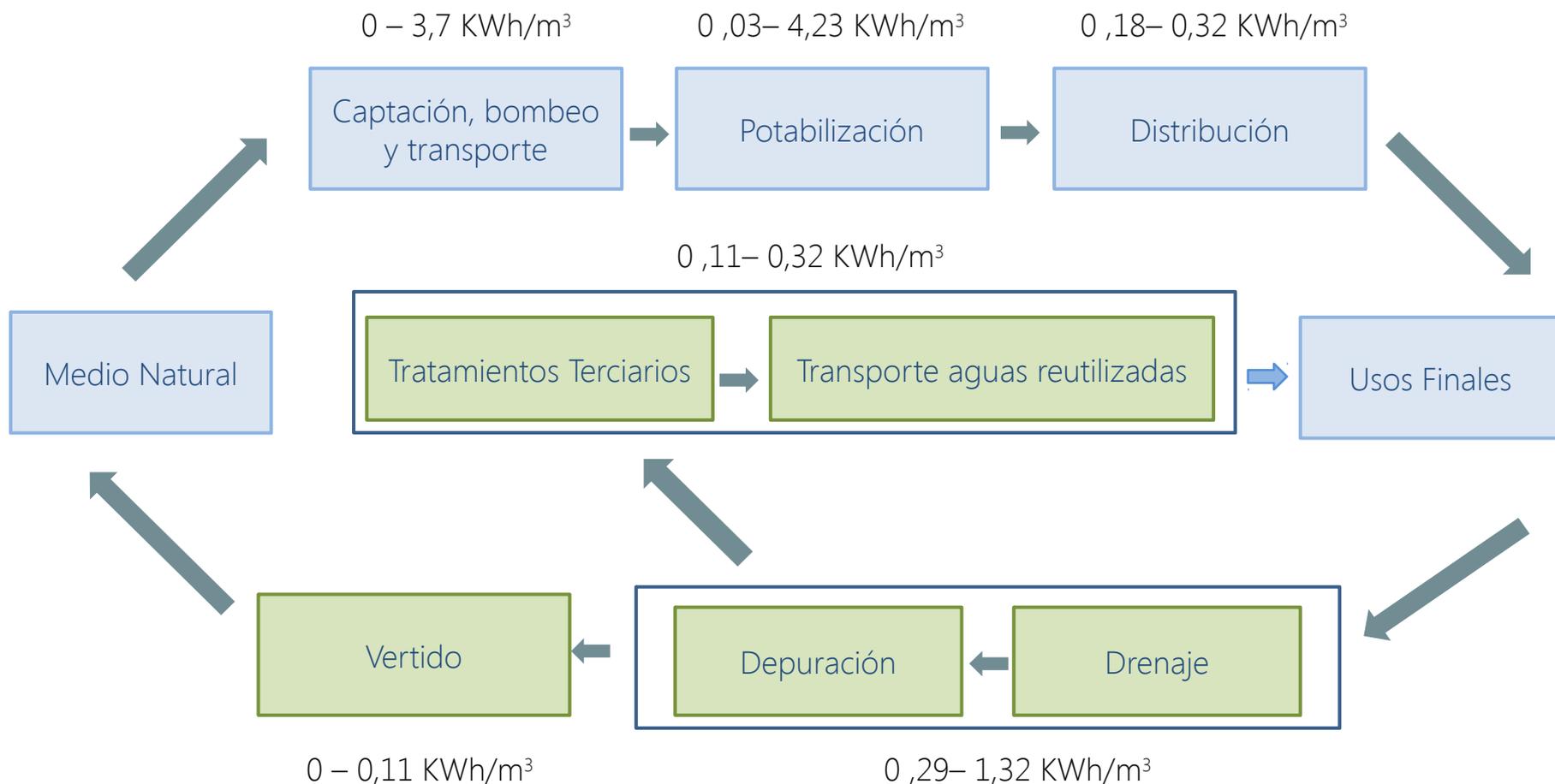
Efectuado el diagnóstico, hay que intervenir:



Conocer el destino del agua es fundamental

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

Auditoría energética



Auditoría energética (Cabrera et al., 2010)

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

ITAEnergy

VOLÚMENES m3/día	
Volúmenes del sistema	
Volumen inyectado total	
Volumen inyectado embalse 4	
Volumen inyectado embalse 6	
Volumen consumido	
Volumen fugado	
Volumen almacenado en los depósitos	
Indicadores del sistema	
Rendimiento volumétrico	
Fugas por unidad de longitud	
Error	
Error en el balance volumétrico	

ENERGÍAS kWh/día	
Energía total aportada	3.513,790 kWh
Energía aportada por las bombas	1.873,936 kWh (53,33%)
Energía de la bomba 2655 (Tpo. func. 6,02 h)	595,031 kWh (31,75%)
Energía de la bomba (Tpo. func. 7,02 h)	1.224,097 kWh (65,32%)
Energía de la bomba 2752 (Tpo. func. 3,08 h)	54,808 kWh (2,92%)
Energía natural	1.639,854 kWh (46,67%)
Energía del embalse 4	888,098 kWh (54,16%)
Energía del embalse 6	751,757 kWh (45,84%)
Energía total consumida	3.506,546 kWh
Energía entregada a los usuarios	1.393,192 kWh (39,73%)
Energía mínima requerida	1.128,149 kWh (80,98%)
Energía topográfica	268,561 kWh (19,28%)
Energía de exceso	0,000 kWh (0,00%)
Energía disipada por fricción	1.078,882 kWh (30,77%)
Energía disipada en las válvulas	21,741 kWh (0,62%)
Energía perdida a través de las fugas	764,285 kWh (21,80%)
Energía perdida en las bombas	390,812 kWh (11,15%)
Energía perdida en la bomba 2655	148,758 kWh (38,06%)
Energía perdida en la bomba 2743	228,353 kWh (58,43%)
Energía perdida en la bomba 2752	13,702 kWh (3,51%)
Energía de compensación	-142,365 kWh (-4,05%)
Error	
Error en la auditoría energética	0,21 %

Balance hídrico Auditoría energética Indicadores Avisos

Balance hídrico Auditoría energética Indicadores Avisos

Exportar a Excel

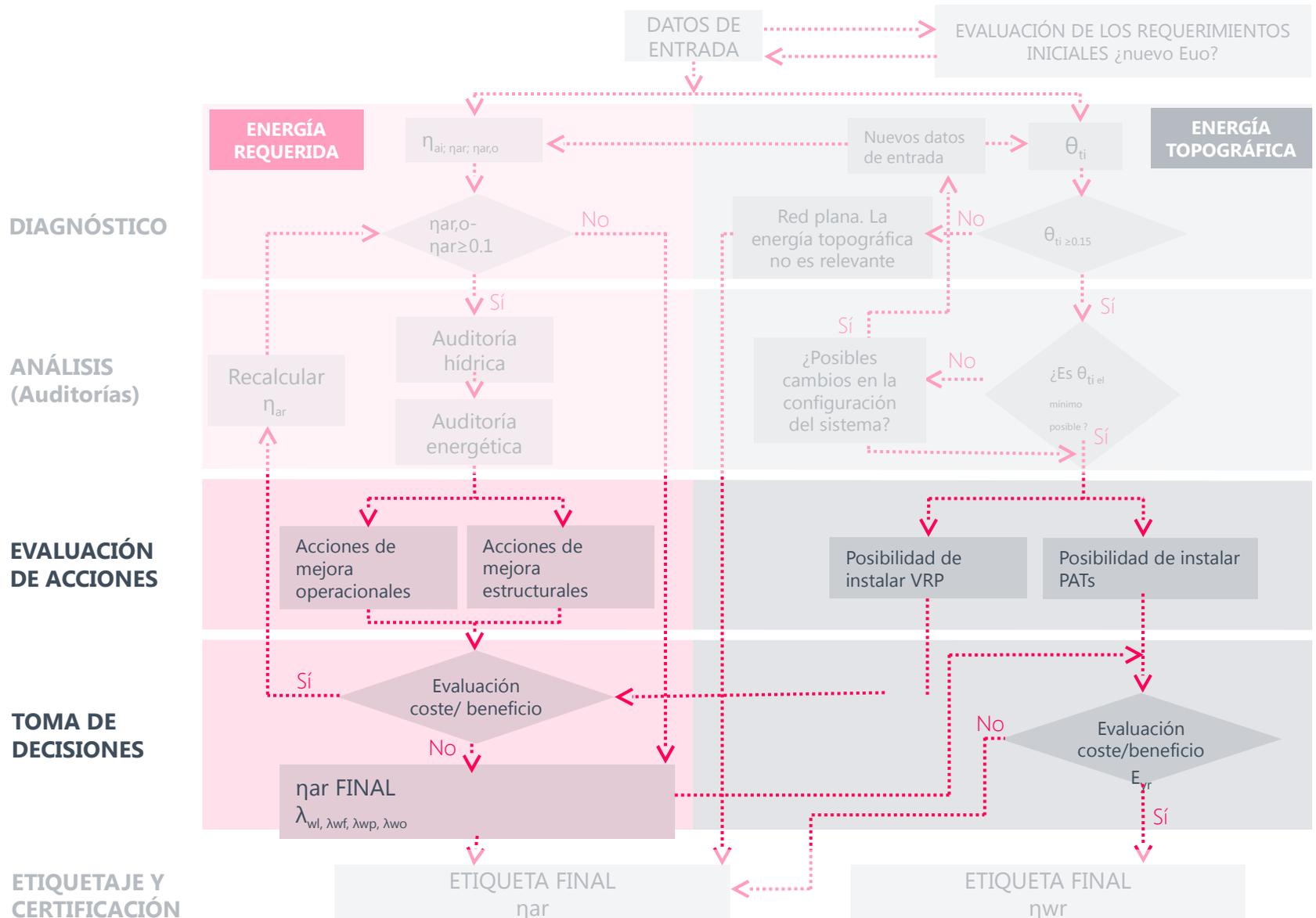
Cerrar

ÍNDICE

1. Motivación – introducción
2. Metodología para mejorar la eficiencia energética en PWTS
3. Fase de diagnóstico energético
 - La herramienta Eagle
4. Fase de análisis
 - Auditoría hídrica
 - Auditoría energética
 - La herramienta ITAEnergy
5. Propuestas de mejora
 - Acciones operacionales y estructurales
 - Ejemplos
6. Desarrollos futuros
7. Conclusiones

METODOLOGÍA PROPUESTA

Estrategias de mejora y evaluación de acciones



ESTRATEGIAS DE MEJORA Y EVALUACIÓN DE ACCIONES

Estrategias de mejora

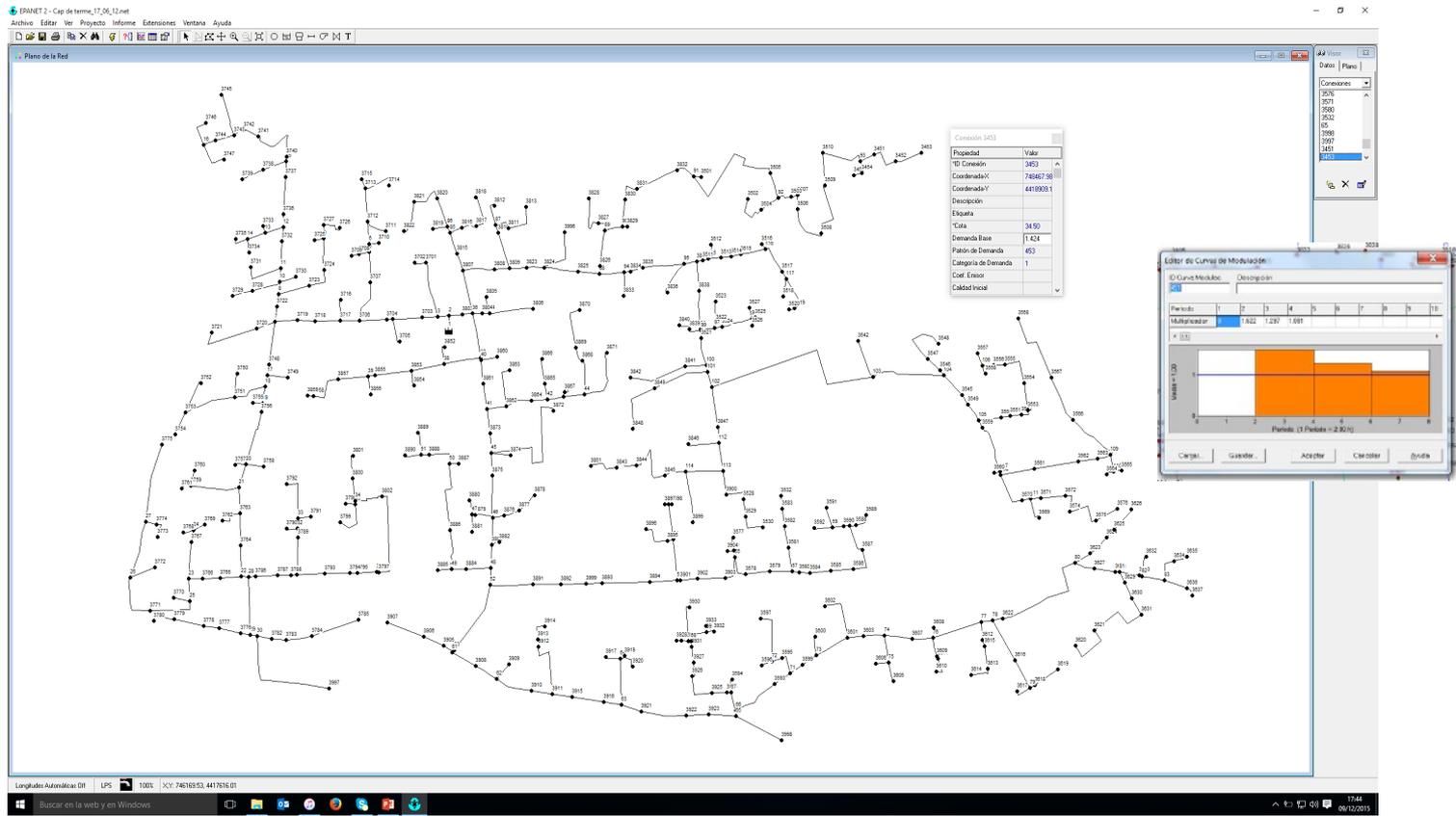
Medidas Operacionales

- OP1. Operar el sistema en su punto de funcionamiento óptimo (BEP)
- OP2. Evitar cualquier excedente de energía
- OP3. Reducir al mínimo las fugas
- OP4. Minimizar las pérdidas por fricción

Medidas Estructurales

- EST1. Utilizar bombas más eficientes
- EST2. Recuperar o reducir la energía topográfica:
- EST3. Mejorar viejos diseños de distribución y suministro
- EST4. Evitar las pérdidas no incluidas en los apartados anteriores

CABEZAL DE RIEGO CAP DE TERME (VILA REAL)



CABEZAL DE RIEGO CAP DE TERME (VILA REAL)

EL DISEÑO NO HA SIDO CONCEBIDO
DESDE LA ÓPTICA DE LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA

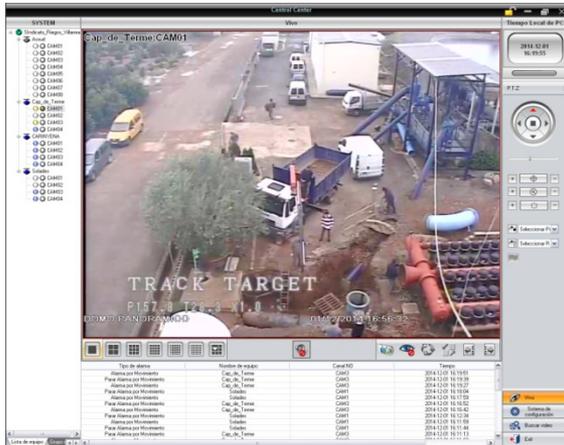
¡¡ Y Sobraba energía, mucha energía!!

Presión
20.00
30.00
40.00
50.00
m

CABEZAL DE RIEGO CAP DE TERME (VILA REAL)

- Tras las auditorías hídrica y energética, y a partir de los resultados del modelo matemático, se implementaron un conjunto de actuaciones:
 - Reordenación de los turnos de riego
 - Parada de una bomba de las cinco que funcionaban en paralelo.
 - Remodelación de la estación de bombeo (sistema de tuberías)
 - Desacoplamiento del cabezal en tres niveles, dando a cada uno de los sectores la energía que necesita.
 - Adecuación de las bombas al nuevo escenario
 - Reformulación del contrato con la empresa de suministro
 - LOS RESULTADOS, se resumen en lo que sigue, han sido EXCELENTES.
- Y QUEDA AÚN BASTANTE MARGEN DE MEJORA.

CABEZAL DE RIEGO CAP DE TERME (VILA REAL)



Tres conceptos principales:

- 1.- Trabajo de gabinete, análisis, estudios y puesta a punto
- 2.- Infraestructuras
- 3.- Montaje

Durante 4 ejercicios. (**TRES CABEZALES, no sólo Cap de Terme**)
Coste global de 355.000 € (*)

La partida más importante la reforma de los cabezales

(*) Se incluyen las horas (Estimación de 2990 h) empleadas por la plantilla de la Comunidad, lo que supone una ventaja considerable. No se ha alterado el normal funcionamiento.



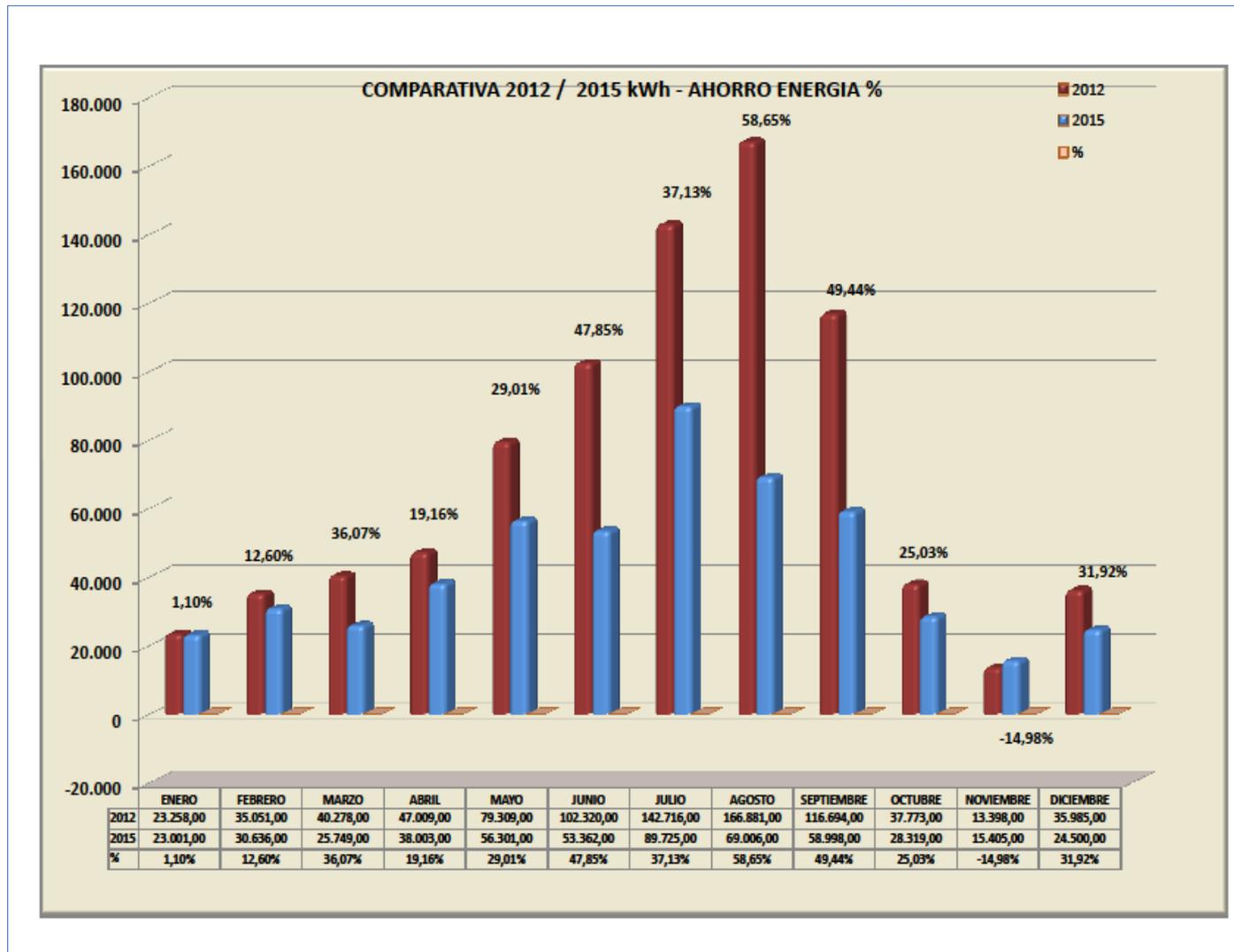
Tiempo de recuperación estimado de la inversión

Inversión total 355.819,00 € (incluida la renovación de filtros)

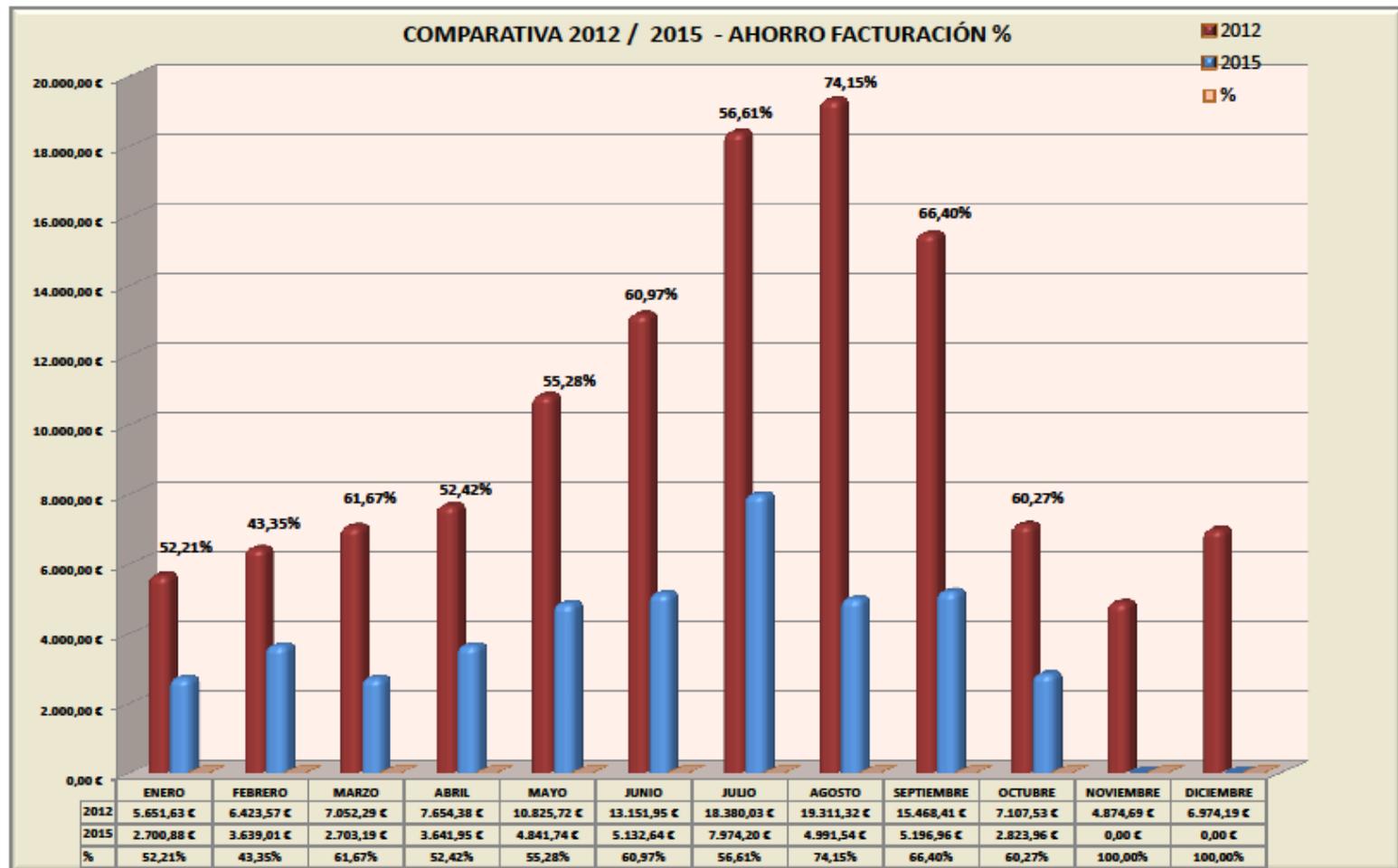
Ahorro anual estimado 158.000,00 €/año

Inversión/Ahorro= 2.25 años

CABEZAL DE RIEGO CAP DE TERME (VILA REAL)

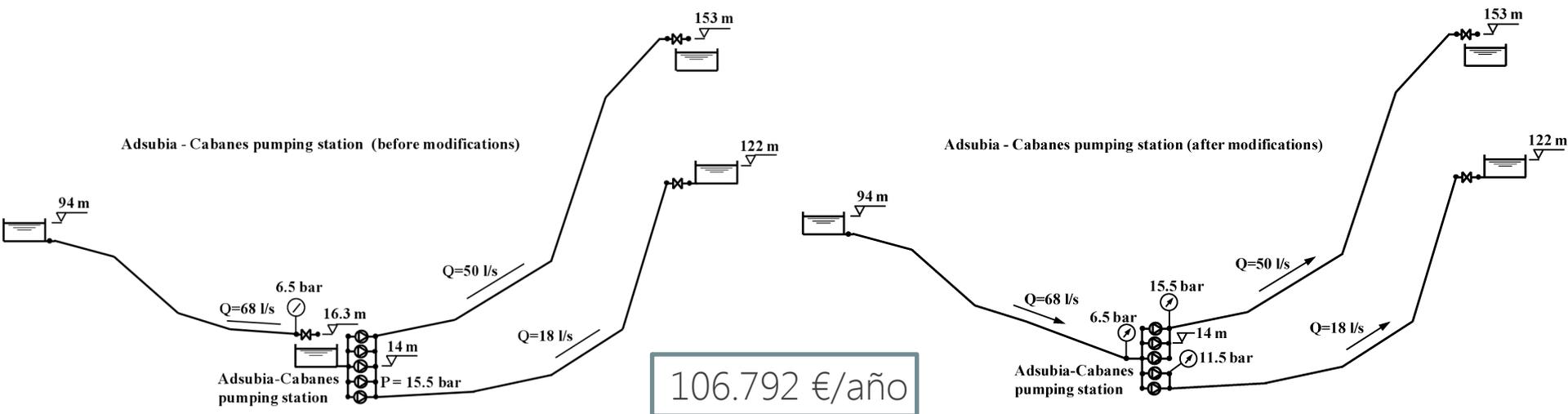


CABEZAL DE RIEGO CAP DE TERME (VILA REAL)



EST4. Evitar las pérdidas no incluidas en los apartados anteriores

Por ejemplo, la sustitución de bombes que aspiran de depósitos de rotura de carga por bombes con aspiración directa de red



Eliminación del depósito de rotura de carga por aspiración directa de la estación de Adsubia-Cabanes (Espert et al., 2015)

	Escenario 1	Escenario 2
Potencia eléctrica contratada (kW)	320 kW	190 kW
Consumo energético medio (kWh/día)	3.664 kWh/día	1.857 kWh/día
Coste medio energético (€/día)	593,26 €/día	300,68 €/día

Entrada en servicio de la nueva EB: Julio de 2014

Mes	Año 2013	Año2014	año 2015
enero	102.065	102.519	47.820
febrero	93.330	91.367	42.339
marzo	105.902	109.636	54.911
abril	115.388	128.031	61.945
mayo	130.033	138.692	81.319
junio	146.812	148.655	106.014
julio	202.118	125.680	107.378
agosto	207.568	106.166	92.191
septiembre	120.557	71.924	59.752
octubre	128.250	45.208	42.695
noviembre	108.528	38.860	37.793
diciembre	105.869	46.436	39.963
Total	1.566.420	1.153.174	774.120

Aumento consumo de agua (entre 2013 y 2015) 15%

Entrada en servicio de la nueva EB: Julio de 2014

Mes	Año 2013	Año 2014	Año 2015	AHORRO ₁₃₋₁₅
enero	14.239,66	13.374,01	6.590,65	
febrero	12.568,38	12.213,24	5.836,62	
marzo	10.984,02	14.149,40	6.870,14	
abril	10.884,98	19.384,09	7.728,28	
mayo	16.689,29	19.399,42	9.442,27	
junio	17.888,33	20.212,03	12.672,43	
julio	28.509,63	17.097,06	13.030,33	
agosto	27.329,58	13.715,59	10.646,98	
septiembre	15.080,56	7.666,88	7.454,99	
octubre	18.278,87	8.079,31	5.848,14	
noviembre	14.079,50	6.178,78	5.401,48	
diciembre	13.936,16	7.359,11	5.651,46	
Total	200.468,96 €	158.828,92 €	97.173,77 €	- 103.295,19 €

Gasto energético €/mes

Con un aumento consumo de agua (entre 2013 y 2015) 15%

RECUPERACIÓN INVERSIÓN < 2,5 AÑOS

(≈ 2,5 años sintener en cuenta el aumento de consumo de agua)

ÍNDICE

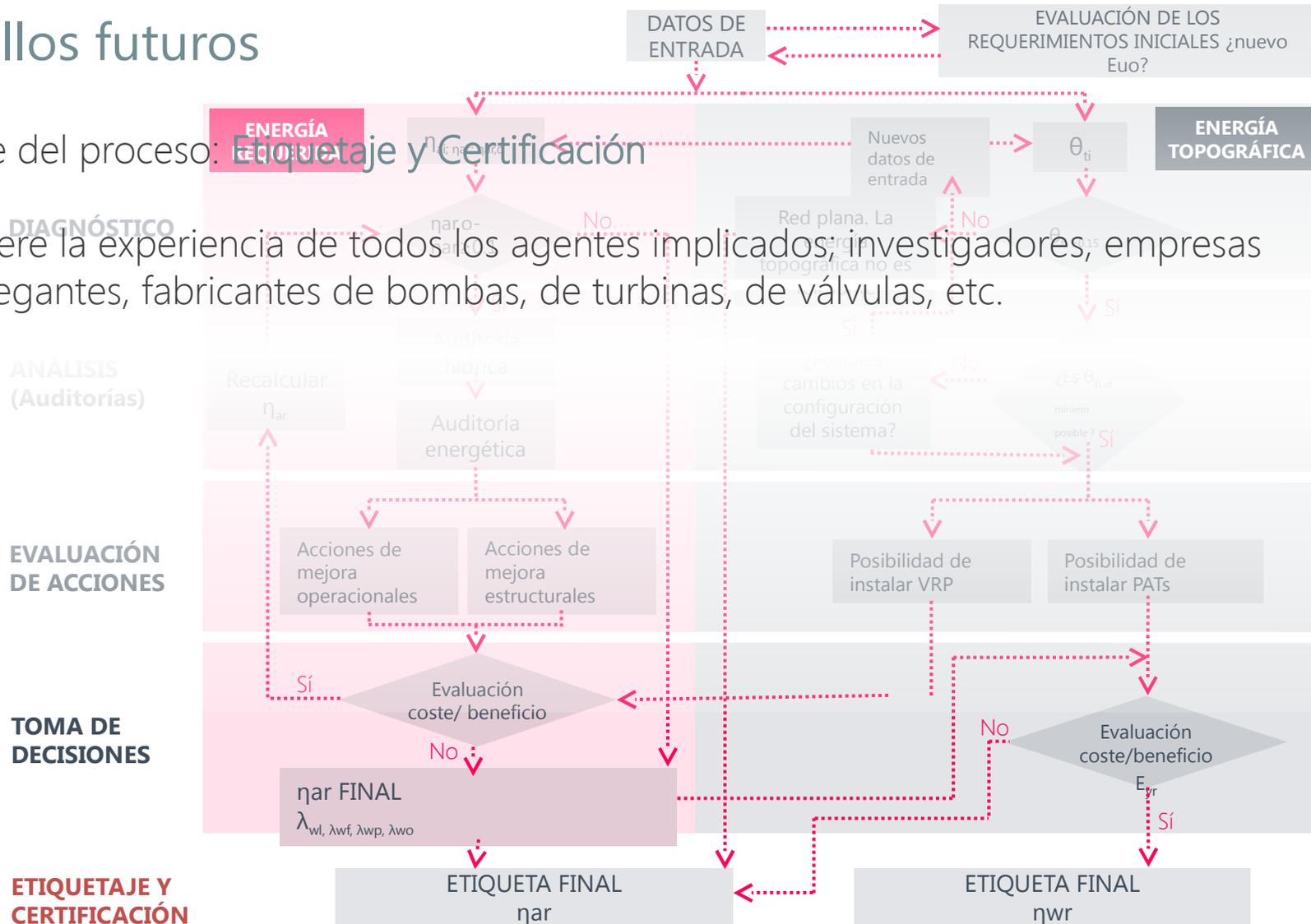
1. Motivación – introducción
2. Metodología para mejorar la eficiencia energética en PWTS
3. Fase de diagnóstico energético
 - La herramienta Eagle
4. Fase de análisis
 - Auditoría hídrica
 - Auditoría energética
 - La herramienta ITAEnergy
5. Propuestas de mejora
 - Acciones operacionales y estructurales
 - Ejemplos
6. Desarrollos futuros
7. Conclusiones

DESARROLLOS FUTUROS

Desarrollos futuros

Última fase del proceso: **Etiquetaje y Certificación**

Requiere la experiencia de todos los agentes implicados; investigadores, empresas de agua, regantes, fabricantes de bombas, de turbinas, de válvulas, etc.

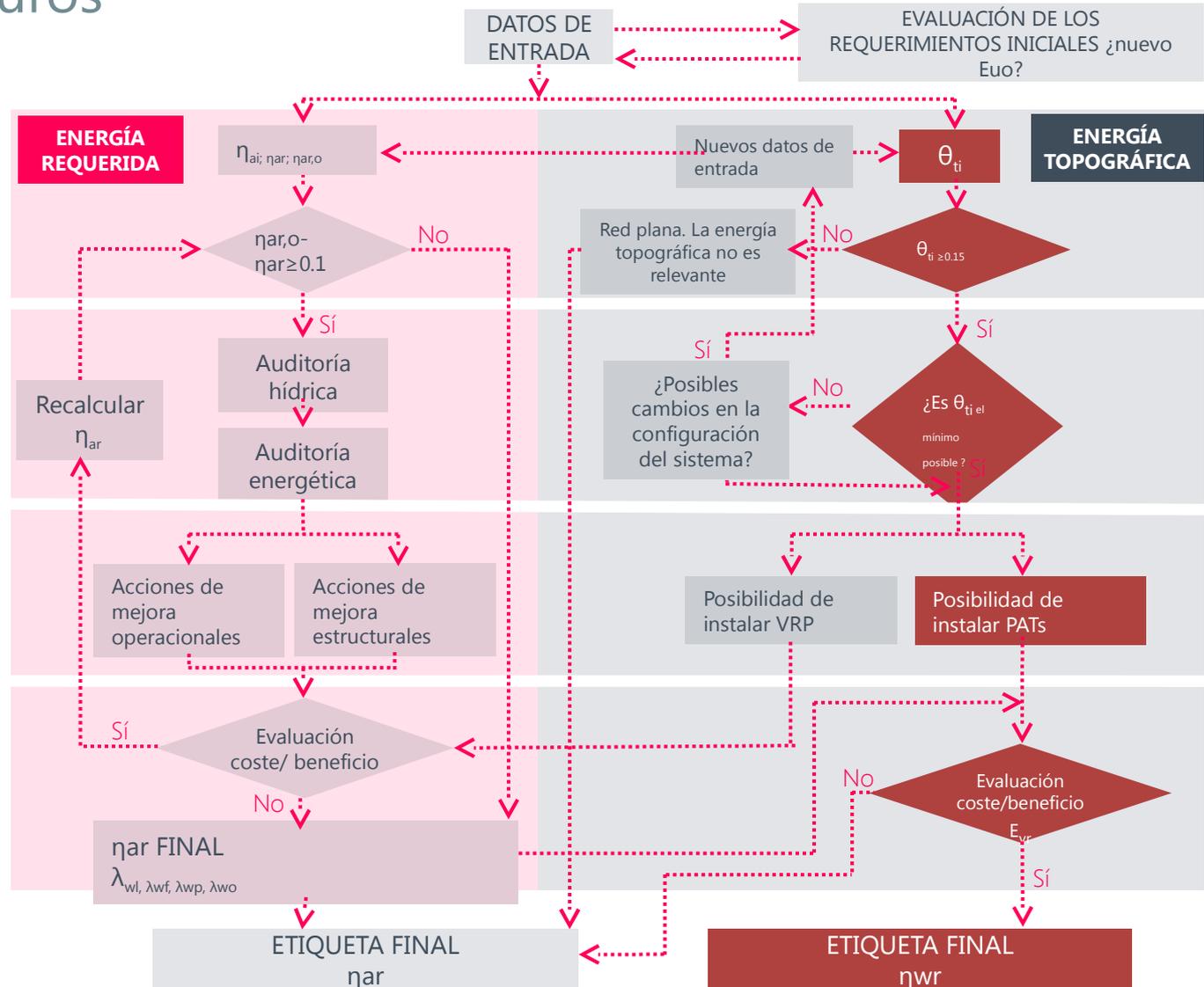


DESARROLLOS FUTUROS

Desarrollos futuros

Recuperación de la energía topográfica:

- Modificación de la red (desacoplar sectores, replantear bombeos, ej. Sagunto)
- Cálculo del potencial de recuperación de energía de una línea
- Instalación de PATs



ÍNDICE

1. Motivación – introducción
2. Metodología para mejorar la eficiencia energética en PWTS
3. Fase de diagnóstico energético
 - La herramienta Eagle
4. Fase de análisis
 - Auditoría hídrica
 - Auditoría energética
 - La herramienta ITAEnergy
5. Propuestas de mejora
 - Acciones operacionales y estructurales
 - Ejemplos
6. Desarrollos futuros
7. Conclusiones

CONCLUSIONES

Conclusiones

La necesidad de mover agua a presión ha ido en aumento (la población requiere agua de calidad y los sistemas de riego necesitan mejorar la eficiencia en el consumo)

- Mayor flexibilidad en el suministro
- Control mayor de la calidad del agua
- Más seguridad
- Más eficientes que el transporte por gravedad

- Enorme cantidad de energía requerida

- Los diseños han buscado el ahorro en la inversión (regadío) y la fiabilidad (urbano). **SE HAN REALIZADO A ESPALDAS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.**
- Le experiencia evidencia que los ahorros energéticos superan ampliamente el 50%
- Hay que analizar globalmente el problema (no sólo una parte del mismo, p.e. bombeo)
- Se ha presentado una metodología general. El reto es desarrollar herramientas amigables que pongan al alcance de todos los técnicos estos análisis.



EFICIENCIA ENERGÉTICA Y TRANSPORTE DEL AGUA