

El transporte de agua a presión y su certificación energética. La herramienta ENERGOS

Pressurised water transport and its energy certification. The ENERGOS tool

Enrique Cabrera^{a1}, Miguel Ortiz^{b1}, Elena Gómez^{ORCID iD a2}, Pascual Maximino^{b2}, Roberto del Teso^{ORCID iD a3*} y Carlos Marco^{b3}

^aGrupo de Ingeniería y Tecnología del Agua (ITA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n - Edificio 5C, 46022 Valencia, España.

^bFACSA. Castellón, España.

E-mail: ^{a1}ecabrera@ita.upv.es, ^{a2}elgosel@ita.upv.es, ^{a3}rodete@ita.upv.es, ^{b1}mortiz@facsa.es, ^{b2}pmaximino@facsa.es, ^{b3}cmarco@facsa.es.

*Autor para correspondencia

Recibido: 14/10/2022

Aceptado: 21/12/2022

Publicado: 31/01/2023

Citar como: Cabrera, E., Ortiz, M., Gómez, E., Maximino, P., del Teso, R., Marco, C. 2023. Pressurised water transport and its energy certification. The ENERGOS tool. *Ingeniería del agua*, 27(1), 13-28. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.18564>

RESUMEN

El presente trabajo analiza el comportamiento energético de los sistemas de transporte de agua a presión simples, en los que una tubería trasiega agua desde el punto origen hasta el final. El objetivo del análisis es evaluar la eficiencia energética del sistema y, a partir de ella, formular una propuesta de certificación energética. Para ello, se calculan tres valores representativos del indicador intensidad energética I_e , (kWh/m^3): la intensidad energética ideal I_{ei} ; la Intensidad energética real I_{er} , cociente entre la energía realmente consumida (kWh) y el volumen trasegado (m^3) en idéntico periodo de tiempo, y, por último, la Intensidad energética objetivo, I_{eo} , valor de la energía unitaria suponiendo un funcionamiento real óptimo. El resultado del cociente I_{er}/I_{eo} sintetiza el margen de mejora del sistema y, por tanto, es el utilizado para calificar su eficiencia energética. El trabajo concluye con un ejemplo real que reproduce el procedimiento establecido.

Palabras clave | eficiencia energética; intensidad energética; agua y energía; gestión de la presión; diseño de redes; sostenibilidad ambiental.

ABSTRACT

This paper analyses the energy performance of simple pressurised water transport systems, in which a pipe transfers water from the point of origin to the end. The aim of the analysis is to evaluate the energy efficiency of the system and, on this basis, to formulate a proposal for energy certification. To do this, three representative values of the energy intensity indicator I_e , (kWh/m^3) are calculated: the ideal energy intensity I_{ei} ; the real energy intensity I_{er} , the quotient between the energy actually consumed (kWh) and the volume transferred (m^3) in the same period of time; and, finally, the target energy intensity, I_{eo} , the unit energy value assuming optimal real operation. The result of the I_{er}/I_{eo} quotient summarises the margin for improvement of the system and is therefore used to qualify its energy efficiency. The work concludes with a real example that reproduces the established procedure.

Key words | energy efficiency; energy intensity; water and energy; pressure management; network design; environmental sustainability.

INTRODUCCIÓN

Al compás de la creciente preocupación por el cambio climático, en este siglo XXI la necesidad de descarbonizar la economía ha ido haciéndose más evidente. Con todo, el espaldarazo final ha llegado con la invasión rusa de Ucrania que ha disparado todas las alarmas, obligando a Europa, y por tanto a España, a reformular su política energética con el plan RePowerEU (CE, 2022). Su objetivo lo expresa con claridad “*reducir rápidamente nuestra dependencia de los combustibles fósiles rusos acelerando la transición hacia una energía limpia y uniendo fuerzas para lograr un sistema energético más resiliente y una verdadera Unión de la Energía*”.

Y de entre las acciones a adoptar, la primera que se destaca es el ahorro, porque “*es la forma más rápida y económica de hacer frente a la actual crisis energética*”. Pero, no conviene olvidarlo, la guerra de Ucrania sólo es un potente catalizador de unos objetivos ya establecidos. Sin ir más lejos, en el plano nacional, la también reciente Ley 7/2021 de cambio climático y transición energética (BOE, 2021a) establece la necesidad de “*Mejorar, antes de 2030, la eficiencia energética, disminuyendo el consumo de energía primaria en, al menos, un 39.5%, con respecto a la línea de base conforme a la normativa comunitaria*”. En síntesis, en todos los planes energéticos la eficiencia siempre es la primera prioridad.

Y, obviamente, cuanto más energía demande una actividad, más importa mejorar la eficiencia. Una de ellas, es el transporte de fluidos por tuberías, que en Europa representa el 10% del consumo energético total (Grundfos, 2014). No puede extrañar, pues, que una ecodirectiva de la Unión Europea (EC, 2012) exija a las bombas unos rendimientos mínimos. Pues bien, de entre los transportes de fluidos por tuberías, destaca el del agua, especialmente en áreas agrícolas como California donde supone el 6% del total de la energía consumida (Water in the West, 2013). Y lo mismo sucede en los estados agrícolas del oeste de los USA, con el riego representando el 4.5% del total (Tidwell *et al.*, 2014). En el mundo la historia se repite. En 2020, la demanda energética del transporte y distribución de agua alcanzó los 695 TWh (IEA, 2020), un 3.2% del total (IEA, 2021), un valor notable, aunque inferior al 6% de California, por el importante peso de los países no agrícolas. Y esta demanda energética seguirá creciendo alcanzando los 793 TWh (un 14% más) en el 2030 (IEA, 2022).

En España, sin datos oficiales y con diferencias notables en las estimaciones publicadas (Espinosa-Tasón *et al.*, 2020), nadie cuestiona su formidable peso. Y así, sólo el bombeo de agua subterránea supera el 1% del consumo total de energía del país. En efecto, suponiendo un volumen anual elevado de 7 km³ (Custodio, 2021), una altura de elevación media de 70 m y un rendimiento global del 50%, similar al de los bombeos californianos (Pérez Urrestarazu y Burt, 2012), el consumo anual es de unos 2700 GWh, sobre un total de 240 000 GWh. Por otra parte, un estudio pionero (Corominas, 2010) ya valoraba en un 3% el gasto energético de la conversión del riego tradicional a riego por goteo (no incluía, por tanto, la elevación de aguas subterráneas). Y a ello hay que añadir el transporte y distribución del agua urbana. Todo, pues, parece indicar que ese gasto total estará dentro de la horquilla 5-6%.

Un porcentaje que, o se mantendrá o, más probablemente, irá en aumento. De una parte, porque el riego tradicional está llamado a desaparecer y aún quedan miles de hectáreas por transformar. Y de otra, porque las aguas subterráneas habrá que elevarlas desde profundidades generalmente mayores. También la creciente escasez de recursos hídricos impulsará la demanda energética. La reutilización de agua depurada habrá que transportarla y elevarla hasta las tierras agrícolas, generalmente a mayor cota que las depuradoras origen. Igualmente, el mayor uso de agua desalada que, con independencia del gasto energético que conlleva el propio proceso, debe transportarse y elevarse hasta los puntos de consumo.

Sorprende que a una actividad energéticamente tan relevante se le preste, desde esta óptica, tan poca atención. Tan sólo ha habido un intento parcial de corto recorrido (IDAE, 2008). No es ese el caso de otros sectores, como la edificación, que están mereciendo gran atención. Es cierto que representa casi el 40% del total (EEFIG, 2015), pero con un gasto unitario (hay muchos edificios) muy inferior al de las estaciones de bombeo (bolsas de ahorro unitarias menores). Tanta importancia se le da que, desde 2013, su calificación energética es de obligado cumplimiento al comprar un inmueble, procedimiento recientemente actualizado (BOE, 2021b). Del mismo modo, la certificación energética de los elementos consumidores de energía (neveras, lavadoras...) se está potenciando desde hace más de una década (ECS, 2009). Tampoco escapan al control energético las actividades industriales y comerciales relevantes (más de 250 trabajadores o una facturación superior a los 50 millones de euros). Pero como sus procesos no se pueden tipificar (y, por tanto, tampoco certificar) deben auditarse energéticamente cada cuatro años (BOE, 2016). Porque para promover la eficiencia energética hay dos líneas de actuación: certificar, calificación dinámica sensible a las mejoras tecnológicas

(EC, 2021), y la auditoría, que (sin certificar) detalla cuánta, cómo y dónde se pierde la energía, información esencial para mejorar la eficiencia.

Sin embargo, un sistema simple que transporta agua a presión es, desde la óptica energética, una actividad tipificable y, por tanto, certificable. Su implantación mejoraría su eficiencia. El liderazgo de esta iniciativa le corresponde al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, responsable de promover las eficiencias hídrica y energética (acopladas por el nexo agua- energía). Sería una iniciativa pionera en Europa, lo que no debe extrañar porque, ya se ha visto, el consumo energético del transporte de agua en países agrícolas es muy elevado. La iniciativa aliviaría la factura energética de los agricultores, agobiados por la actual escalada de precios.

En una etapa posterior se debería abordar la certificación de las redes, sistemas en los que, al alimentar simultáneamente puntos ubicados en cotas distintas, aparece la energía topográfica, más compleja de tipificar (Cabrera *et al.*, 2015). De momento, la calificación propuesta se centra en los sistemas simples (como los bombeos de aguas subterráneas) y más adelante, tras esta experiencia, se haría una propuesta concreta para los sistemas complejos en los que la principal dificultad está en cómo ponderar la energía topográfica con las ineficiencias operacionales (Gómez *et al.*, 2018).

El presente trabajo comienza definiendo los tres tipos de sistemas de transporte de agua a presión que, desde la óptica energética, existen. Seguidamente se determina la energía mínima que, como máximo, debe consumir un sistema simple. El posterior cociente entre la energía realmente consumida y el valor de referencia calculado permite calificar el sistema. El trabajo incluye un análisis de sensibilidad que identifica la acción de mayor impacto para mejorar la eficiencia. Finalmente se presenta una herramienta, desarrollada por los autores, ENERGOS, que facilita todos los cálculos y propone la calificación del sistema.

CLASIFICACIÓN DESDE LA ÓPTICA ENERGÉTICA DE LOS SISTEMAS DEL TRANSPORTE DE AGUA A PRESIÓN

El análisis energético de los sistemas de transporte de agua aconseja agruparlos en:

- a. Sistemas simples: Una tubería con una entrada, una salida y, generalmente, una bomba. Un ejemplo es el bombeo de aguas subterráneas.
- b. Sistemas multi-escenario: Sistemas con varias entradas y salidas, y cambios constantes en su modo de operar (multi escenarios). A cada modo de operación le corresponde un layout diferente. Las denominadas redes en “alta”, generalmente sistemas metropolitanos de aducción (es decir, el transporte y entrega de agua a poblaciones desde fuentes de suministro), es el ejemplo más representativo.
- c. Sistemas complejos con una o más entradas y numerosas salidas. El modo de operación cambia en el tiempo (bombas que arrancan y paran, depósitos que se llenan y vacían, etc.) pero no así su configuración física (layout). Las redes son los sistemas complejos que más abundan. También lo son los sistemas de aducción metropolitanos cuyo layout no cambia.

La sencillez de los sistemas simples aconseja analizarlos con la ecuación de Bernoulli, mientras que los sistemas complejos de layout invariable conviene estudiarlos con la ecuación integral de la energía. De analizarse con Bernoulli, hay que seleccionar adecuadamente los nudos extremos. En general, la fuente de suministro se identifica con el nudo origen, mientras el nudo final es el más exigente energéticamente (nudo crítico), y el resultado se extrapola al resto de nudos (Cabrera *et al.*, 2021). Sin embargo, como Bernoulli ignora la topografía (cota) de los nudos restantes, no puede cuantificar los excesos de presión nodales, y la información obtenida es incompleta. Se puede subsanar aplicando repetidamente la ecuación de Bernoulli entre la fuente y cada uno de los nudos, pero es a costa de perder su mayor atractivo, la sencillez. Por ello, tanto en los sistemas complejos como en los multi escenario, la ecuación integral de la energía, cuya aplicación sí requiere las cotas de los nudos, es más adecuada (Cabrera *et al.*, 2015).

CONSUMO ENERGÉTICO MÍNIMO EN TUBERÍAS SIMPLES

La exigencia energética de una tubería simple depende del desnivel existente entre los nudos extremos y de la pérdida de carga de la tubería que los une. De ahí el interés de relacionar la altura (en fluidos incompresibles como el agua proporcional a la presión), con la intensidad energética (kWh/m^3), I_e , de idénticas unidades a la presión. La ecuación (1), (Cabrera *et al.*, 2019), resume la relación:

$$1 \text{ m} . \text{c} . \text{a} . (\text{con } \gamma = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}) = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0.002725 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad (1)$$

En consecuencia, la intensidad energética ideal, I_{ei} , sin pérdidas y considerando un desnivel geométrico (H_g) positivo entre la cota final z_f y la cota inicial z_i ($H_g = z_f - z_i > 0$), será:

$$I_{ei} = 9810 H_g \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0.002725 H_g \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 0.002725 (z_f - z_i) \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad (2)$$

Pero las pérdidas son inherentes a todo proceso físico real. Las incluye la intensidad energética real, I_{er} , el cociente entre la energía real suministrada (E_{sr}), en kWh, y el volumen entregado en el punto de suministro (V_d), en m^3 , en idéntico periodo de tiempo.

Para analizar el comportamiento del sistema conviene desagregar todas las pérdidas incluidas en I_{er} . Si el régimen es estacionario (en caso contrario hay que recurrir a valores medios), la intensidad energética I_{er} , expresada en función de las ineficiencias y de la altura de bombeo H_p , resulta:

$$I_{er} = \frac{E_{sr}}{V_d} = \frac{P_t}{Q_d} = \frac{1}{Q_p \eta_l} \frac{P_h}{\eta_e \eta_p} = \frac{1}{\eta_l \eta_e \eta_p} \frac{\gamma Q_p H_p}{Q_p} = \frac{1}{\eta_l \eta_e \eta_p} \gamma H_p \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{1}{\eta_l \eta_e \eta_p} 0.002725 H_p \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad (3)$$

con P_t y P_h , las potencias (la total requerida y la hidráulica entregada al agua); Q_p y Q_d , los caudales (bombeado y entregado); η_e , η_p y η_l , los rendimientos de los elementos que disipan energía: el motor eléctrico, η_m , el variador de velocidad (si lo hay), η_v , (con $\eta_e = \eta_m \eta_v$, eficiencia eléctrica), la bomba, η_p y la tubería, η_l , para contabilizar las fugas, si las hay, durante el transporte.

El desglose de las ineficiencias es más claro definiendo la relación de alturas r_h , cociente entre el desnivel geométrico H_g y la altura de bombeo H_p . Es decir:

$$r_h = \frac{H_g}{H_p} \quad (4)$$

De este modo I_{er} resulta ser:

$$I_{er} = \frac{1}{\eta_l \eta_e \eta_p} \frac{1}{r_h} I_{ei} = F_{Gl} I_{ei} \quad (5)$$

Siendo F_{Gl} el factor de pérdidas real global, compendio de todas las ineficiencias e igual a:

$$F_{Gl} = \frac{1}{\eta_e \eta_p \eta_l r_h} \quad (6)$$

La siguiente etapa es cuantificar el margen de mejora existente y para ello se define el factor global de pérdidas objetivo, $F_{Gl,o}$. Su expresión es idéntica a la real, pero con unos rendimientos mejorados o “rendimientos objetivo” como se verá más adelante. De este modo, se llega al factor de pérdidas global objetivo, $F_{Gl,o}$, con su intensidad energética objetivo inherente, I_{eo} , resultando:

$$F_{Gl,o} = \frac{1}{r_{ho}} \frac{1}{\eta_{lo} \eta_{eo} \eta_{po}} \text{ con } I_{eo} = F_{Gl,o} I_{ei} \quad (7)$$

Funcionando el sistema con estas eficiencias mejoradas, el ahorro energético ΔE (para un volumen anual trasegado, V) es:

$$\Delta E = I_{er} - I_{eo} = I_{ei} \left(F_{GI} - F_{GI,o} \right) V \frac{kWh}{a \tilde{n} o} \quad (8)$$

Sólo falta concretar los niveles de eficiencia objetivo, un asunto que no está cerrado. Por ejemplo, la Unión Europea (UE) exige a las bombas instaladas en Europa un rendimiento mínimo, pero tal valor no es el más elevado. La decisión de mejorarlo es económica, condicionada por el precio de la energía y las horas de utilización del sistema. Por ello los rendimientos objetivo que finalmente se adopten son decisiones hasta cierto punto técnico-económicas.

Eficiencia del bombeo

Suele ser la mayor ineficiencia y no siempre es debido a la bomba. Pueden ser varias causas, desde una mala selección, a un funcionamiento fuera del punto óptimo o, incluso, un desgaste por vejez. También conviene aclarar que la eficiencia objetivo mínima no es un valor universal, porque depende del tipo de bomba, que define su velocidad específica n_s , y de su tamaño, función del caudal Q . La velocidad específica es:

$$n_s = n \frac{\sqrt{Q_{BEP}}}{\left(\frac{1}{i} H_{BEP} \right)^{\frac{3}{4}}} \quad (9)$$

Siendo n la velocidad de giro (en rpm), i el número de rodets (en bombas multicelulares) y Q_{BEP} (m³/h) y H_{BEP} (m), el caudal y la altura en el punto de máxima eficiencia.

El punto de máximo rendimiento de la bomba (BEP), es decir, el de máxima eficiencia alcanzable, debe tener un valor mínimo (η_{BEP}) que garantice que la bomba va a trabajar por encima de dicho valor cuando funcione a máximo rendimiento. Este valor, función de n_s y Q , (EC, 2012) es:

$$(\eta_{BEP})_{min} = 88,59 \ln(n_s) + 13,46 \ln(Q) - 11,48 \ln(n_s)^2 - 0,85 (\ln(Q))^2 - 0,38 \ln(n_s) \ln(Q) - C \quad (10)$$

con la constante C función del tipo de bomba y de la calidad de su mecanización (AENOR, 2016), ligada al denominado MEI (Índice de eficiencia mínima). Un MEI=0.4 es el mínimo que hoy se exige, mientras un MEI=0.7 conduce a rendimientos un par de puntos superiores. El MEI es, pues, una apuesta ligada al uso de la bomba (a más horas de trabajo, mayor MEI). En definitiva, a partir de n_s , de sus dimensiones, de Q y del MEI adoptado, se determina el rendimiento objetivo, n_{po} .

Eficiencia de los elementos eléctricos de la estación de bombeo

La bomba es arrastrada por un motor, generalmente eléctrico y, si el punto de funcionamiento es variable (como un bombeo de aguas subterráneas con variaciones del nivel de agua notables), debe incluir un variador de velocidad. Estos elementos son muy eficientes, siempre que se seleccionen correctamente y operen donde les corresponde. La International Electrotechnical Commission (IEC) clasifica la eficiencia de los motores eléctricos en cinco clases: IE1, estándar; IE2, alta; IE3, premium; IE4, super premium e IE5, ultra premium. En cualquier caso, conviene advertir que, a día de hoy, esta última clase sólo la alcanzan los motores síncronos. De hecho, la IE5 no está incluida ni en los reglamentos europeos (UE, 2019) ni en los catálogos de los fabricantes (ABB, 2018).

Con el paso del tiempo las exigencias energéticas de la UE aumentan. Y así, hoy hay que utilizar motores IE3 pero, a partir de julio de 2023 se exigirá que los motores con una potencia entre 75 kW y 200 kW (con 2, 4 o 6 polos) sean ya IE4 (UE, 2019), lo que implica un nuevo n_{mo} .

Las ineficiencias máximas de los variadores de velocidad, cada vez más empleados (sus precios han bajado mucho), también están tipificadas (UE, 2019). En general se estiman en un 3% (DOE, 2012), un rendimiento alto (97%) pero que decrece, al igual que el del motor eléctrico, si trabaja a carga parcial. Hasta el 50% de la potencia nominal, el rendimiento del motor es prácticamente constante. Sin embargo, una reducción de carga por debajo del 50% hace caer el rendimiento del motor considerablemente

(Burt *et al.* 2008). No conviene regular la velocidad de giro del motor por debajo del 80%, pues este cambio de velocidad supone una reducción de carga próxima al 50%, ya que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad de giro del motor, es decir, si se disminuye la velocidad al 80%, se tendrá una disminución de carga de aproximadamente del 50% ($0.8^3=0.512$) y a partir de este punto disminuirá el rendimiento. En cuanto a la eficiencia de los variadores, la disminución del rendimiento con la carga aún es menos sensible que en el caso de los motores (U.S. Department of Energy, 2012)

En estos casos puede estar justificada la utilización de motores síncronos clase IE5+ que, a cargas parciales, se comportan mejor (Serrano y Martínez, 2017) aunque la mayoría siguen siendo, por más económicos, estables y sencillos, asíncronos.

En resumen, un motor de 110 kW, IE4 (obligatorio a partir de julio de 2023) y con un par de polos (velocidad de giro, 1460 rpm) tiene un rendimiento $n_{mo}=0.96$. Y si lo complementa un variador de frecuencia ($n_{vo}=0.97$) el rendimiento eléctrico objetivo resulta $n_{eo}=0.96 \times 0.97=0.93$.

Eficiencia hídrica de la tubería

Las fugas de la tubería, diferencia entre el volumen entregado y el bombeado en origen, son una clara ineficiencia. Con todo, una tubería simple no puede perder agua. Por tanto n_{10} . No es el caso de una red, con conexiones y acometidas, a la que no se le puede exigir estanqueidad.

Eficiencia física de la tubería

La altura manométrica de una bomba es la suma del desnivel (que define la intensidad energética ideal I_{ei}) y la fricción en la tubería, dependiente del diámetro y del caudal circulante. Por lo general, el diámetro se dimensiona a partir del balance entre la inversión que comporta y el gasto energético de su explotación, dependiente a su vez del coste del kWh (con el diámetro crece la inversión y disminuye el gasto energético). La pérdida de carga unitaria óptima J_o es el resultado de ese balance (Vasconcelos *et al.*, 2022) y, al tiempo, establece la relación de alturas objetivo: $r_{ho}=H_g/(H_g+J_o \times L)$, con J_o (m/m), H_g (m) y L (m).

Otras ineficiencias

Las ineficiencias anteriores son las que contempla en la expresión (7), pero pueden no ser las únicas del sistema. En la práctica puede haber otras pérdidas asociadas a su funcionamiento, como las derivadas de regular el caudal con una válvula (que disipa energía) o una rotura de carga en la tubería al llegar a un depósito. Estas deben evitarse.

LA CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL TRANSPORTE DE AGUA A PRESIÓN

La ecuación (7) facilita la calificación energética del sistema (ECS, 2009), una estrategia que Europa viene implementando desde 1995. Esta calificación es dinámica porque, al compás de la evolución tecnológica, su exigencia aumenta (EC, 2020). Una calificación que se ha extendido a los productos que utilizan los recursos naturales más valiosos, como el agua (Burton *et al.*, 2019).

Las certificaciones energéticas exigen definir un EEI, Índice de Eficiencia Energética, (OJEU, 2017). En nuestro caso el EEI es el cociente de los dos indicadores, I_{er} e I_{eo} , previamente definidos. Si el cociente es igual o inferior a la unidad, al sistema le corresponde la calificación más alta (A). En cuanto a la asignación del resto de etiquetas es, hasta cierto punto, subjetivo. En este caso se ha adoptado (Figura 1) el criterio seguido en la reciente actualización de los frigoríficos (OJEU, 2019).

Llegados a este punto conviene recordar que las dos pérdidas más significativas (las propias de la estación de bombeo y la fricción en la tubería) de los sistemas simples de transporte de agua a presión dependen del precio de la energía y de la utilización de la instalación (horas/año), parámetros variables a lo largo de la vida útil del sistema. Por ello el valor de I_{eo} puede cambiar en el tiempo. También la pérdida de prestaciones de las bombas (por envejecimiento) o por un cambio del punto de funcionamiento puede

afectar al EEI, pero en este caso a través del numerador I_{er} . En definitiva, la certificación del sistema puede cambiar en el tiempo y lo razonable sería evaluarla periódicamente.

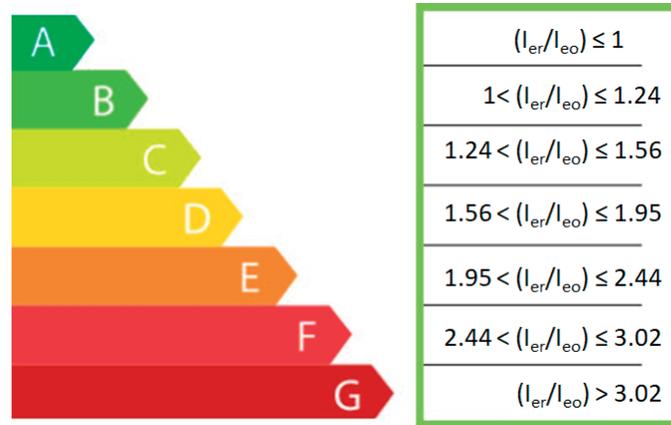


Figura 1 | Propuesta para calificar energéticamente los sistemas simples.

Especial interés tiene la certificación energética de los bombeos de aguas subterráneas, sistemas simples obligados, desde 2001, a contar con contadores de agua (BOE, 2001) requisito que, en general, se incumple en pozos agrícolas, bien por comodidad, bien para evitar posibles controles de la administración. Y, lo que es peor, la mayoría de los instalados incumplen los requisitos metrológicos (Arregui *et al.*, 2006). Pero claro, sin conocer los volúmenes elevados es imposible calcular la eficiencia energética del bombeo. El segundo dato necesario es el desnivel a superar (suma de la distancia entre el nivel del agua y la superficie, más el desnivel geométrico hasta el punto de descarga), por lo que a la obligación de instalar contadores debiera añadirse la de equipar los pozos con sondas de nivel, incluyendo el registrador que permita conocer su evolución temporal. El tercer dato clave es la energía consumida que, si la bomba es eléctrica (la gran mayoría), siempre se conocerá, pues es la base de la facturación. En el futuro este equipamiento (caudalímetro y medidor de nivel) debiera exigirse subrayando su parte positiva, es imprescindible para ahorrar energía y dinero. Hay, pues, que cambiar el discurso educando mejor a quienes explotan los pozos. No es posible ser eficiente sin medir.

EJEMPLO

Las ideas expuestas se aplican a un caso real (Figura 2) correspondiente a un bombeo en Jávea (Alicante). El sistema, construido en la década de los setenta, presenta desde la óptica energética dos notables inconvenientes. El primero, una rotura de carga en el depósito intermedio (Dep 4) y el segundo un bombeo simultáneo a dos depósitos (Dep 2 y Dep 3) situados a cotas distintas. Para que el agua llene el depósito superior, la altura del depósito inferior debe elevarse artificialmente (con una válvula reductora de presión, VRP). Un sistema energéticamente ineficiente con el que se pretendía evitar complejidades, derivadas de la aspiración en línea, en el cálculo del golpe de ariete. Para mejorar su eficiencia energética, el bombeo se remodeló hace unos años. El nuevo layout lo detalla la figura 3. Se trata de analizar y certificar energéticamente el sistema primitivo y el actual.

La intensidad energética real del primer sistema (Figura 2), datos de 2013, era $I_{er,g} = 0.880 \text{ kWh/m}^3$, cociente entre el volumen anual elevado, $1773637 \text{ m}^3/\text{año}$ y la energía consumida, 1560800 kWh/año . El sistema trabajaba casi en continuo (7425.25 horas/año). Los volúmenes elevados a cada depósito fueron 1304145 m^3 al superior y 469492 m^3 al inferior. Las pérdidas energéticas estaban mayormente en las VRP instaladas en las entradas de los depósitos 3 y 4.

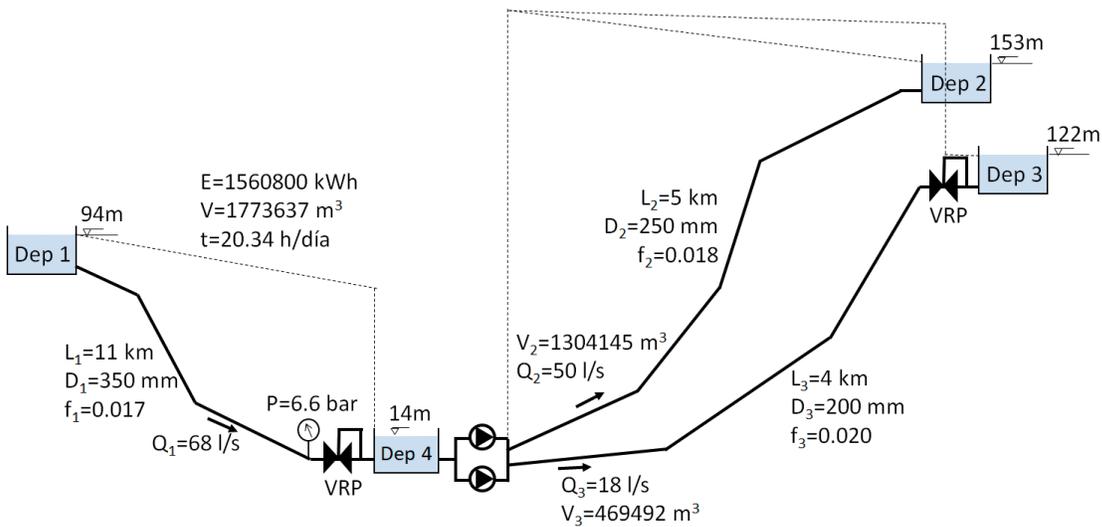


Figura 2 | Bombeo Adsubia – Cabanes tal cual se construyó a mediados de los setenta (layout 1).

El análisis del sistema remodelado (Figura 3) aconseja analizar el sistema desagregado en tres sistemas simples (1, 2 y 3). El primero, gravitatorio, desde el depósito de cabecera (Dep 1) hasta la estación de bombeo (excluida), incluye el tramo de tubería común. El sistema 2, desde la aspiración de la bomba hasta el depósito 2, incluyendo la tubería 2 que los une. El tercero, idéntico al segundo, acaba en el depósito 3. Los tres comparten la altura piezométrica, H_u (final del primer sistema y origen de los otros) igual a 14 m (cota) más la presión disponible, 6.6 bar, lo que proporciona $H_u = 80$ m.

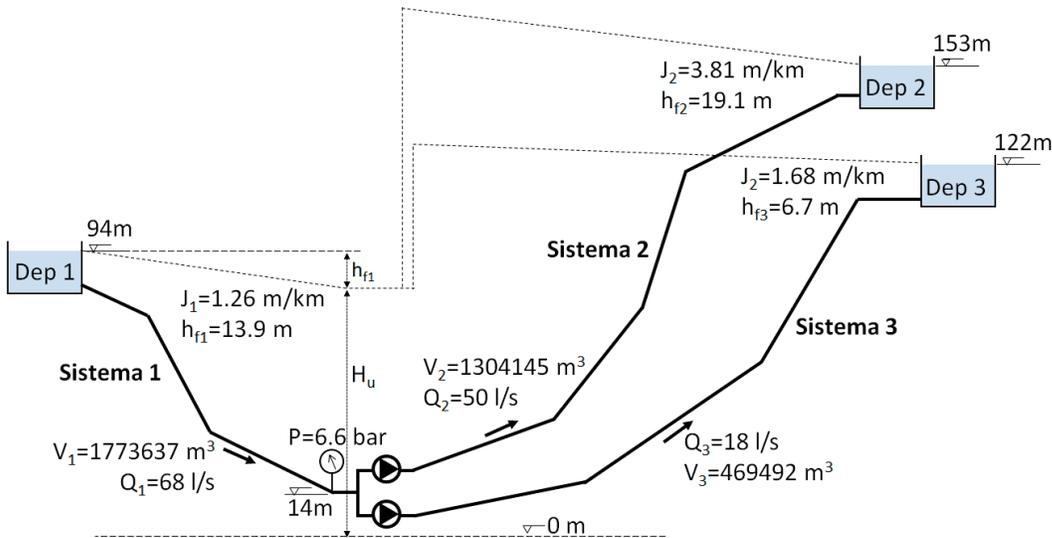


Figura 3 | El nuevo bombeo, remodelado en 2015, Adsubia – Cabanes (layout 2).

Las intensidades energéticas ideales para el sistema 2 y 3, $I_{ei,2}$ e $I_{ei,3}$ (Ecuación 2) son:

$$I_{ei,2} = 0.002725 \cdot H_{g,2} = 0.002725 \left[153 - (14 + 66) \right] = 0.002725 \cdot 73 = 0.199 = \frac{kWh}{m^3}$$

$$I_{ei,3} = 0.002725 \cdot H_{g,3} = 0.002725 \left[122 - (14 + 66) \right] = 0.002725 \cdot 42 = 0.114 \frac{kWh}{m^3}$$

Con estas dos intensidades energéticas ideales, $I_{ei,2}$ e $I_{ei,3}$, los valores reales ($I_{er,2}$ e $I_{er,3}$) se calculan admitiendo:

- La inexistencia de fugas en las tuberías, ($\eta_1=1$)
- Los valores mínimos de los rendimientos de las estaciones de bombeo, suponiendo un MEI=0.4 (AENOR, 2016) y motores clase IE3 (ABB, 2018).
- Sólo se ha modificado la estación de bombeo. Las tuberías son las mismas.

Con estas hipótesis, las relaciones de alturas (Figura 3), son:

$$r_{h,2} = \frac{73}{73 + 19.1} = 0.79 \quad r_{h,3} = \frac{42}{42 + 6,7} = 0.86$$

Los rendimientos de las bombas están referidos al punto de funcionamiento óptimo o BEP (Best Efficient Point). En el sistema 2 la altura $H_{BEP,2}$ es 92.1 m ($H_{g2}+h_{f2}=73+19.1$) y el caudal $Q_{BEP,2}$ 180 m³/h. Estos valores en el sistema 3 son $H_{BEP,3}=48.72$ m y $Q_{BEP,3}$ es 64.8 m³/h. La tipología de las dos bombas es ESCC (AENOR, 2016) y su velocidad de giro 2950 rpm. Para estas bombas y con un MEI=0.4, la constante C de la ecuación (10) es 130.72, resultando unos rendimientos iguales a 74.44 % (bombeo 2) y 69.49% (bombeo 3). De otra parte, los rendimientos de los motores IE3, para las potencias 60.7 kW y 12.4 kW (sistemas 2 y 3, respectivamente), son 94.8% y 91.4% (ABB, 2018). Conviene recordar que estos rendimientos eran los mínimos exigidos el año de la remodelación. Se pueden mejorar con un MEI 0.7 para las bombas y un IE4 para los motores. El primer sistema interviene a través de H_u , dependiente a su vez de la fricción en el primer sistema.

En estas condiciones, el resultado de aplicar la ecuación (5), a los dos sistemas, es:

$$I_{er,2} = \frac{0.199}{1 \cdot 0.948 \cdot 0.744 \cdot 0.79} = 0.356 \frac{kWh}{m^3} ; \quad I_{er,3} = \frac{0.114}{1 \cdot 0.914 \cdot 0.695 \cdot 0.86} = 0.209 \frac{kWh}{m^3}$$

Ponderando estas dos intensidades energéticas, con los respectivos volúmenes elevados, la intensidad global real, $I_{er,g}$, es 0.317 kWh/m³.

A partir de este nuevo valor global, el potencial ahorro energético del nuevo layout es:

$$Ahorro\ energético = \Delta I_{er} \cdot V = (0.880 - 0.317) \frac{kWh}{m^3} \cdot 1773637 \frac{m^3}{a\tilde{n}o} = 998896 \frac{kWh}{a\tilde{n}o}$$

Aunque cuando se hicieron estos cambios la energía era mucho más barata, hoy, con los costes energéticos disparados (el precio medio actual es de unos 0.25 €/kWh), el ahorro económico anual es de unos 250 000 €/año, pese a que las potencias son discretas. El año de la remodelación, 2016, el ahorro era de unos 150 000 €/año. Por ello, conviene referirse al ahorro energético (casi un millón de kWh), independiente del coste energético, ahorro confirmado en la práctica.

Finalmente procede calificar energéticamente el sistema inicial y el modificado, lo que exige, para cada uno de los tres sistemas, referir las intensidades energéticas reales a la intensidad energética objetivo I_{e0} , calculada con los más altos niveles de eficiencia (bombas con un MEI=0.7, EC, 2012 y motores eléctricos IE4). Finalmente (no hay fugas), solo falta calcular los gradientes energéticos óptimos, $J_{0,1}$; $J_{0,2}$ and $J_{0,3}$. La tabla 1 resume el proceso de cálculo.

Los datos complementarios necesarios para determinar $J_{0,i}$ (Vasconcelos et al., 2022) son:

Coste energético medio, 0.15 €/kWh.

Coste de la tubería de fundición montada $F_1 a_0(p) D^c = 1098.1 D^{1.0155}$ (en €/m). Obtenida a partir de datos de empresas instaladora de tuberías.

$h=7425.25$ h/año

$\eta_{p1}=1$ (sistema simple gravitatorio)

$\eta_{e1} = 1$ (sistema simple gravitatorio)

$\eta_{p2} = 77.41$ (MEI=0.7)

$\eta_{e2} = 95.6$ (motor IE4, P=50 kW)

$\eta_{p3} = 72.46$ (MEI=0.7)

$\eta_{e3} = 93.4$ (motor IE4, P=12 kW)

$n = 80$ años (ASCE, 2020)

Los valores de $J_{o,i}$ obtenidos constan en la columna 3 de la tabla 1, anexos a los valores actuales $J_{i,i}$, (columna 2). En dos de las tuberías (1 y 3) las diferencias son pequeñas, claro indicador del buen diseño inicial (la discontinuidad de los diámetros comerciales de las tuberías impide igualar valores reales y teóricos). Por ello, el diámetro de la tubería 1 y el valor de H_u no cambia.

Sin embargo, en el caso de la tubería 2, la diferencia entre $J_{i,i}$ y $J_{o,i}$ es relevante por lo que la intensidad energética objetivo I_{eo} se calcula con el nuevo diámetro de la tubería 2 (300 mm) con una pendiente energética de 1.52 m/km, el valor más próximo al teórico, 1.17 m/km. Las pérdidas de carga unitarias finales, $J_{f,i}$, columna 4 son, pues, las mismas en las tuberías 1 y 3, mientras que en la tubería 2 la disminución es significativa. El cálculo de la pérdida de carga total objetivo (columna 5) es, a partir de los valores unitarios, inmediato.

Dos comentarios finales conviene realizar. El primero, consecuencia del cambio de la altura $H_{BEP,2}$, por la disminución de la fricción en la tubería 2, que, *a priori*, impacta en η_{p2} y η_{e2} , que deben reevaluarse. En el caso del rendimiento de la bomba la diferencia es pequeña (78.83% en lugar de 77.41%) mientras que el rendimiento del motor, ahora con una potencia algo inferior, no cambia. El segundo, una reflexión ligada al imparable aumento del precio de la energía, que influye de manera muy directa en $J_{o,i}$. De hecho, el valor actual es muy superior al que tenía cuando se planteó la reforma, el valor de referencia en estos cálculos. Para actualizar la calificación energética, habría que recalcular los $J_{o,i}$ correspondientes al nuevo precio. Como son cambios menores se ha decidido mantener el valor de $J_{o,2}$ correspondiente al precio inicial.

Tabla 1 | Análisis económico de los tres escenarios considerados.

Sistema (i)	$J_{i,i}$ (m/km)	$J_{o,i}$ (m/km)	$J_{f,i}$ (m/km)	$h_{fo,i}$ (m)	$H_{g,i}$ (m)	$H_{po,i}$ (m)	$r_{ho,i}$	$\eta_{po,i}$ (%)	$\eta_{mo,i}$ (%)	$F_{Gl,o,i}$	$I_{eo,i}$ (kWh/m ³)
1	1.26	1.28	1.26	13.86	-	-	-	-	-	-	-
2	3.81	1.17	1.52	7.60	73	80.60	0.91	78.83	95.6	1.465	0.291
3	1.68	1.84	1.68	6.72	42	48.72	0.86	72.46	93.4	1.714	0.196

La intensidad energética objetivo del conjunto (calculada ponderando los sistemas simples 2 y 3) es $I_{eo} = 0.266$ kWh/m³. Conviene recordar que el sistema 1, interviene indirectamente a través de H_u en los sistemas 2 y 3. De haber cambiado el diámetro de la tubería 1, H_u hubiese aumentado, reduciéndose el valor de las intensidades ideales de los otros dos sistemas, transmitiéndose al valor final de I_{eo} . Cual se ve H_u interviene, bien que indirectamente, de modo notable.

Para calificar energéticamente los dos sistemas hay que comparar las intensidades reales con el indicador objetivo, I_{eo} . La relación I_{er}/I_{eo} para el layout 1 es $0.880/0.266 = 3.31$, correspondiendo a la clase G, la más baja (Figura 1). En el layout 2, ese cociente es $0.317/0.266 = 1.19$, clase B, una calificación energética mucho mejor. Con todo, el ascenso a la máxima categoría exige implementar tres cambios en el sistema, bombas MEI=0.7, motores eléctricos IE4 y un diámetro de 300 mm para la tubería 2. Dicho de otro modo, el sistema debe replicar las condiciones con las que I_{eo} se ha calculado.

Finalmente, con un análisis de sensibilidad, se puede determinar cuál de estas tres posibles mejoras (cambio de bomba y motor en las líneas 2 o 3, -ambos rendimientos, $\eta_{p2}\eta_{e2} = \eta_{pe,2}$ o $\eta_{p3}\eta_{e3} = \eta_{pe,3}$ englobados-, o aumentar el diámetro de la tubería 2) comporta una mejora energética mayor. En ausencia de fugas, las expresiones de partida son:

$$I_{er,2} = \frac{1}{r_{h2}\eta_{p2}\eta_{e2}} I_{ei,2} = \frac{1}{r_{h2}\eta_{pe,2}} I_{ei,2}; I_{er,3} = \frac{1}{r_{h3}\eta_{p3}\eta_{e3}} I_{ei,3} = \frac{1}{r_{h3}\eta_{pe,3}} I_{ei,3} \quad (11)$$

Cuyas derivadas son:

$$\frac{\partial I_{er,2}}{\partial \eta_{pe,2}} = -\frac{I_{ei,2}}{r_{h2} \eta_{pe,2}^2} ; \quad \frac{\partial I_{ei,3}}{\partial \eta_{pe,3}} = -\frac{I_{ei,3}}{r_{h3} \eta_{pe,3}^2} ; \quad \frac{\partial I_{ei,2}}{\partial r_{h2}} = -\frac{I_{ei,2}}{r_{h2}^2 \eta_{pe,2}} \quad (12)$$

La tabla 2 detalla el cálculo de cada impacto en I_{er} . En las cuatro primeras cuatro columnas se analizan las acciones de las mejoras en las estaciones de bombeo, las cuatro siguientes el cambio de diámetro en la tubería 2. La primera de las cuatro columnas muestra la sensibilidad inicial del sistema, la segunda la magnitud de la mejora (en el caso de la estación de bombeo la diferencia entre el rendimiento final y el inicial, $\Delta\eta_{pe}$), la tercera, producto de las dos columnas precedentes, el impacto en el I_{er} del subsistema y la cuarta, tras la ponderación de los volúmenes (V_i con V_T), el impacto en el sistema global.

Tabla 2 | Impacto de cada mejora en el ahorro total del sistema.

Sistema (i)	$\frac{\partial I_{er}}{\partial \eta_{pe}}$	$\Delta\eta_{pe}$	ΔI_{er}	$\Delta I_{er,g}$	$\frac{\partial I_{er}}{\partial r_h}$	Δr_h	ΔI_{er}	$\Delta I_{er,g}$
2	-0.506	0.048	-0.024	-0.018	-0.381	0.12	-0.046	-0.034
3	-0.329	0.042	-0.014	-0.004	-	-	-	-

Se puede llegar a las mismas conclusiones partiendo de las ecuaciones iniciales. La nueva relación de alturas, $r_{h,2}$, es 0.91 (antes 0.79). En consecuencia, el nuevo $I_{er,2}$ es:

$$I_{er,2} = \frac{0.199}{1 \cdot 0.948 \cdot 0.744 \cdot 0.91} = 0.310 \frac{kWh}{m^3}$$

Recordando que el valor inicial era, 0.356 kWh/m³, la mejora resulta -0.046 kWh/m³, igual a la que detalla la tabla 2. Con todo, la ventaja del análisis de sensibilidad es ofrecer una panorámica global de las mejoras. En este caso la mayor sensibilidad -0.506 corresponde a la estación de bombeo de la línea 2. Obviamente la decisión final debe tener en cuenta el coste de la acción frente al ahorro energético que de ella se deriva.

Finalmente comentar que el cambio del diámetro en el tramo común (no contemplado en este análisis) afectaría, a través de H_u , a $I_{ei,2}$ e $I_{ei,3}$. Por ello el impacto de esta acción se haría a través de $I_{er,2}$ e $I_{er,3}$ y la subsiguiente variación de las intensidades energéticas $I_{ei,2}$ e $I_{ei,3}$.

LA HERRAMIENTA ENERGOS

La Universitat Politècnica de València y FACSA han desarrollado de manera conjunta la herramienta ENERGOS. Soportada por un fichero Excel MS, facilita los cálculos de los tres sistemas que encontramos en el transporte de agua a presión, simples (al que este trabajo se refiere) complejos y multi escenario. Por razones obvias sólo se describe la parte relativa a los sistemas simples a los que, siguiendo lo expuesto y a partir de los datos básicos iniciales, se propone su calificación energética. La figura 4, incluye las cuatro tipologías más frecuentes de los sistemas simples, bombes desde depósito o desde pozo directos o a un depósito.

El primer paso es identificar la tipología del sistema simple en estudio. Los datos que se requieren dependen del tipo de sistema, siendo los más relevantes los volúmenes bombeados y entregados, y la energía consumida, todos referidos al periodo de análisis seleccionado. De otra parte, la determinación de intensidades objetivo requiere datos complementarios, como el MEI adoptado o la clase del motor eléctrico. ENERGOS organiza los cálculos en cuatro fases. La primera, ya comentada, es identificar la tipología para demandar los datos que convienen al caso. En la segunda se efectúa el diagnóstico del sistema tal cual está funcionamiento, en la tercera, se establecen los objetivos de eficiencia que se persiguen para finalmente en la cuarta calificar energéticamente el sistema y, al tiempo, valorar el margen de ahorro.

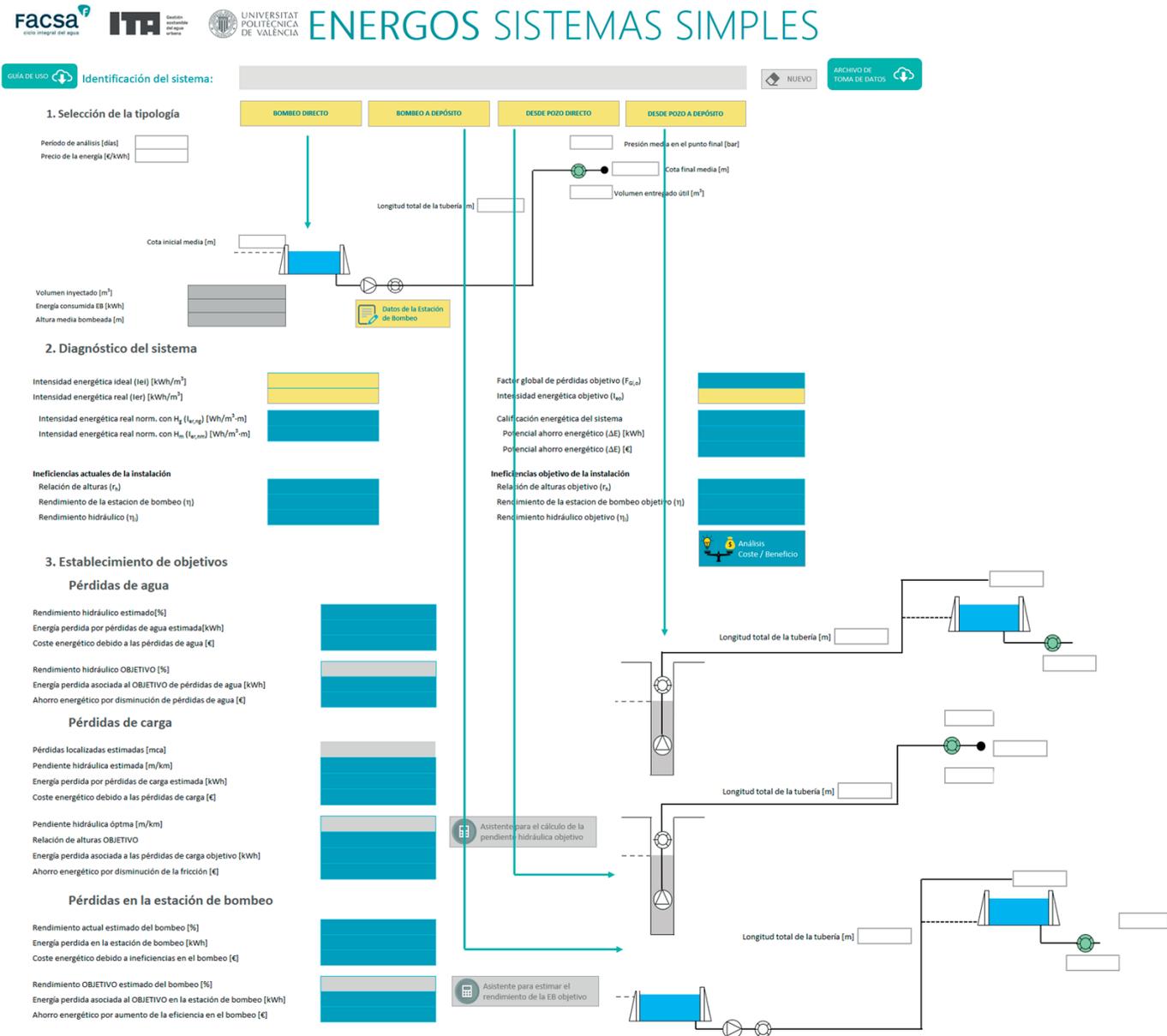


Figura 4 | Pantalla de entrada de ENERGOS correspondiente a un sistema simple.

La figura 5 muestra el resultado de las tres últimas etapas para el bombeo de un pozo real que, cual se ve, está trabajando razonablemente bien (calificación energética B). El último bloque de la cuarta etapa corresponde al análisis coste beneficio de cada medida, que determina el tiempo necesario para recuperar la inversión. La herramienta dispone de una biblioteca con costes de tuberías y bombas, lo que permite comparar el ahorro estimado con el gasto que comporta su corrección. Obviamente, siendo los costes aproximados, se trata de una primera estimación que permite decidir si merece la pena refinar el análisis.

tienen un peso notable y en la que la agricultura consume mucha energía. Y ya, con la experiencia de esta primera regulación, abordar la de las redes y los sistemas multi escenario, físicamente bien caracterizados, pero que requieren la ponderación de las pérdidas operacionales (presentes en todos los sistemas) y las estructurales (propias de los sistemas con múltiples nudos de consumo).

La implantación de la certificación energética y su posterior control podría ser una responsabilidad de la futura oficina de regulación del agua, institución que se viene reclamando de manera unánime por las empresas distribuidoras de agua. Una actividad que, además, contribuiría a evidenciar la relevancia del nexo agua y energía.

REFERENCIAS

- ABB (Asea Brown Boveri), 2018. Technical note: *IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors*. ABB Ltd. Switzerland.
- AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), 2016. *Eficiencia mínima requerida de las bombas de agua rotodinámicas*. Versión española de la Norma Europea EN 16480:2016. Madrid.
- Arregui, F., Cabrera, E., Pardo, M.A., Martínez, C. 2006. *Convenio de colaboración para asesorar técnicamente a la Confederación Hidrográfica del Júcar en la elaboración de directrices relativas a la instalación, utilización y mantenimiento de equipos de medida en captaciones de agua subterránea y su adecuación al uso final*. Confederación Hidrográfica del Júcar. Valencia.
- ASCE (American Society of Civil Engineers). 2020. *The Economic Benefits of Investing in Water Infrastructure. How a Failure to Act Would Affect the US Economic Recovery*. 2020. ASCE. US.
- BOE (Boletín Oficial del Estado). 2001. *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas*. Madrid.
- BOE (Boletín Oficial del Estado). 2016. *Real Decreto 56/2016, de 12 de febrero, por el que se transpone la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, en lo referente a auditorías energéticas, acreditación de proveedores de servicios y auditores energéticos y promoción de la eficiencia del suministro de energía*. Madrid.
- BOE (Boletín Oficial del Estado). 2021a. *Ley de Cambio climático. Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética*. Madrid.
- BOE (Boletín Oficial del Estado), 2021b. *Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios*. Madrid.
- Burt, M., Piao, X., Gaudi, F., Busch, B. Taufik, N.F.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))
- Burton, A., Bent, C., Horne, B., Grossman, C., Wai Cheng, W., Orgill, Y., Philpot, C., Schein, J., Xue, B. 2019. *Review of international water efficiency labelling*, report prepared by the International Water Association Efficient Urban Water Management Specialist Group.
- 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>
- 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*, 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., del Teso, R., Gómez, E., Cabrera, Jr E., Estruch-Juan, E., 2021. Deterministic Model to Estimate the Energy Requirements of Pressurized Water Transport Systems. *Water*, 13, 345. <https://doi.org/10.3390/w13030345>
- Gómez, E., Cabrera, E., Cabrera, E. Jr., Soriano, J. 2018. Labeling water transport efficiencies. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w10070935>

- CE (Comisión Europea). 2022. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité Europeo de las Regiones del Plan REPowerEU. COM (2022) 230 final. Bruselas.
- 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>
- Custodio, E. 2022. Consideraciones sobre el pasado, presente y futuro de las aguas subterráneas en España. *Ingeniería del Agua*. 26(1), 1-17. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.16245>
- DOE (Department of Energy). 2012. *Energy Efficiency & Renewable Energy. Adjustable Speed Drive Part-Load Efficiency*. Washington, DC. USA.
- EC (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. Official Journal of the European Union 26.6.2012.
- EC (European Commission). 2020. In focus: A new generation of EU energy labels. Energy Department of the European Commission. Brussels.
- EC (European Commission), 2021. In focus: A new generation of EU energy labels. <https://ec.europa.eu/info/news>. Visitado el 27 de septiembre de 2022.
- ECS (Energy Charter Secretariat). 2009. Introducing Energy Efficiency Standards and Labels for Appliances and Equipment. 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.
- Espinosa-Tasón, J., Berbel, J., Gutiérrez-Martín, C., 2020. Energized water: Evolution of water-energy nexus in the Spanish irrigated agriculture, 1950–2017. *Agricultural Water Management*, 233, April 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106073>
- Grundfos. 2014. *High efficiency motor technology that reduces energy waste in pump applications*. Grundfos. Dinamarca.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), 2008. *Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes*. IDAE. Madrid.
- IEA (International Energy Agency), 2020. *Energy Efficiency Indicators highlights* (2020 edition). IEA. Paris.
- IEA (International Energy Agency), 2021. *World Energy Outlook. 2021*. IEA. Paris.
- IEA (International Energy Agency), 2022. *Electricity consumption in the water sector by process*, 040, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-consumption-in-the-water-sector-by-process-2014-2040>. Visitada el 26 de septiembre 2022.
- OJEU (Official Journal of the European Union). 2017. Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of the Council of 4 July 2017 setting a framework for energy labelling and repealing Directive 2010/30/EU. *Official Journal of the European Union*. 28/7/2017.
- OJEU (Official Journal of the European Union). 2019. Supplementing Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of refrigerating appliances and repealing Commission Delegated Regulation (EU) No 1060/2010. *Official Journal of the European Union*. 5/12/2019
- Pérez Urrestarazu, L. and Burt, C., 2012. Characterization of Pumps for Irrigation in Central California: Potential Energy Savings. Journal of irrigation and drainage engineering. *ASCE*. September 2012, pp 815-822. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000463](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000463)
- Serrano, L., Martínez, J.A. 2017. *Máquinas eléctricas*. Universidad Politécnica de Valencia.

Tidwell, V.C., Moreland, B. and Zemlick, K., 2014. Geographic Footprint of Electricity Use for Water Services in the Western U.S. *Environmental Science & Technology. American Chemical Society*. <https://doi.org/10.1021/es5016845>

UE (Unión Europea), 2019. Reglamento (UE) 2019/1781 de la Comisión de 1 de octubre de 2019 por el que se establecen requisitos de diseño ecológico para los motores eléctricos y los variadores de velocidad de conformidad con la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, se modifica el Reglamento (CE) n° 641/2009. *Diario Oficial de la Unión Europea* de 25 de Octubre de 2019. Bruselas.

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.

Vasconcelos, J., Cabrera, E., Gómez, E. and Del Teso, R., 2022. Optimal Energy Gradient for Pumping Systems Supplying Variable Flow Demands. *Water Resources Planning and Management*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001600](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001600)

Water in the West, 2013. *Water and energy nexus: A literature review*. Stanford University. CA. USA.