

Huella energética del agua en función de los patrones de consumo en redes de distribución

Energy footprint of water depending on consumption patterns in pressurized water networks

Pérez-Sánchez, M.^{a1}, Sánchez-Romero, F.J.^b y López-Jiménez, P. A.^{a2*}

^aDepartamento Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera S/N. 46022 Valencia.
E-mail: ^{a1} mopesan1@upv.es, ^{a2} palopez@upv.es

^bDepartamento Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia.
E-mail: ^b fcosanro@agf.upv.es

Recibido: 11/01/2017

Aceptado: 17/06/2017

Publicado: 31/07/2017

Citar como: Pérez-Sánchez M., Sánchez Romero F.J., López-Jiménez P.A. 2017. Energy footprint of water depending on consumption patterns in pressurized water networks. *Ingeniería del agua*, 21(3), 197-212. <https://doi.org/10.4995/la.2017.7096>

RESUMEN

Las auditorías energéticas son herramientas que permiten analizar la situación de las redes de distribución, donde el consumo energético depende del patrón de caudal anual (RQ). En este trabajo se desarrolla una metodología para poder comparar la huella energética del agua (HEA) a través de un balance energético con diferentes RQs. El objetivo es determinar el comportamiento energético de una red en base a RQ. El estudio analiza cuatro redes (dos de abastecimiento y dos de riego) mostrando que aquellas que presentan un RQ menos variable tienen un menor consumo de energía total (5.22, 3.21, y 4.01%) y de fricción (28.57, 21.42 y 25%) frente a la red con un RQ más variable. Como novedad, el trabajo define el parámetro HEA adimensional, el cual permite comparar la HEA entre diferentes redes, pudiendo ser introducido como índice de sostenibilidad en el dimensionado junto a los criterios técnicos y económicos.

Palabras clave | huella energética (HEA); patrón de consumo; eficiencia energética; redes de distribución presurizadas.

ABSTRACT

The energy audits are tools which allow to analyse the state of the water distribution network where the energy consumption depends on annual flow pattern (RQ). The present research develops a methodology to compare the energy footprint of water (EWF) through an energy balance with different RQs. The aim is to determine the energy behaviour of a network based on RQ value. The study analyses four networks (two drinking and two irrigation networks), showing a lower total energy consumption (5.22, 3.21, and 4.01%) and a lower friction energy (28.57, 21.42, and 25%) those networks with RQ less variable when these networks are compared with the network with more variability RQ. As novelty, the research defines a non-dimensional EWF parameter, which allows comparing EWF between different networks. This parameter can be introduced as sustainability index in the networks sizing jointed to technical and economic criteria.

Key words | energy footprint of water (EWF); consumption pattern; energy efficiency; water pressurized distribution networks.

INTRODUCCIÓN

El incremento de la eficiencia en el ciclo del agua, en cualquiera de sus fases (captación-distribución-uso final), es un objetivo primordial para conseguir el desarrollo de sistemas sostenibles (Corominas, 2010). La búsqueda de la mejora de la eficiencia ha sido desarrollada en un primer término, buscando un aumento de la mejora eficiencia hidráulica, y en segundo término y ligado a ésta directamente, un incremento de la eficiencia energética (Cabrera *et al.*, 2014). La mejora de la eficiencia energética se ha convertido en un objetivo primordial en los sistemas de distribución, consecuencia directa del aumento de los costes energéticos. Por ello, el análisis energético de redes mediante el desarrollo de auditorías se ha convertido en una técnica habitual de uso por parte de los gestores de los diferentes sistemas de distribución (Gómez, 2016).

En un principio, estos estudios estaban centrados en los sistemas de distribución de abastecimiento (Cabrera *et al.*, 1998), pero el desarrollo de la modernización de regadíos ha provocado un mayor consumo de energía también en dichas redes (Abadia *et al.*, 2008). Este incremento de la energía consumida, junto al incremento del coste, justifican junto al desarrollo de auditorías para mejorar la eficiencia de la red y la necesidad de desarrollar estrategias que reduzcan el consumo energético en la misma. Esta necesidad queda justificada si se tienen en cuenta que, desde 1950 hasta 2013, el consumo de agua de riego se ha incrementado un 172%, con una mejora de la eficiencia hidráulica del 23%. Mientras tanto, en el mismo periodo, el consumo de energía ha crecido un 1450% (Berbel *et al.*, 2014).

Las auditorías son prioritarias para poder centrar los objetivos de actuación en el sistema analizado y una vez desarrolladas estas actuaciones, mejorar la eficiencia de la red (Cabrera *et al.*, 2010; Pardo *et al.*, 2013). Estos objetivos principalmente son: reducción de las fugas en el sistema (Araujo *et al.*, 2006), mejora de los equipos de bombeo (Cabrera *et al.*, 2014) y desarrollo de metodologías que minimicen las alturas de inyección (Jiménez-Bello *et al.*, 2015; Moreno *et al.*, 2010) si la red es inyectada. A estos objetivos, se puede sumar la recuperación energética de la energía disipada por las válvulas reguladoras de presión mediante la instalación de sistemas de recuperación energética (p.e. bombas trabajando como turbinas) (Carravetta *et al.*, 2014, 2013a, 2013b; Ramos y Borga, 1999). El desarrollo de estos últimos sistemas permiten generar energía renovable sostenible (McNabola *et al.*, 2014; Ramos *et al.*, 2010), reduciendo la huella energética en la distribución del ciclo del agua, bien como indicador ecológico directo en el uso del agua o bien como indicador indirecto en la producción de procesos industriales o producción agrícola (Vanham y Bidoglio, 2013).

Establecer umbrales de eficiencia energética en los sistemas de distribución es una tarea compleja. Esta dificultad es debida a que los condicionantes inherentes de cada una de las redes (p.e. topografía, criterios de diseño, patrones de consumo y requerimientos mínimos de presión) son diferentes. Así pues, en un principio solamente se podría comparar una red con sí misma, siendo una dificultad el comparar diferentes sistemas hidráulicos. En este sentido, la presente investigación tiene por objetivo, por un lado, buscar un indicador energético que permita proponer estrategias de comparación de redes de distribución en base a parámetros adimensionales que considere la energía disipada por fricción. Por otro lado, y como segundo objetivo, desarrollar un balance energético en cuatro redes sintéticas, con una topografía y demanda base idéntica, pero con un patrón de consumo diferente (dos patrones de riego y dos de abastecimiento). Se consigue así, mostrar la diferencia de consumo energético debida a la diferencia de los patrones de consumo (abastecimiento y riego), analizando las implicaciones energéticas en cuanto a variación de pérdidas por fricción que ello conlleva. A partir del análisis desarrollado, la presente investigación propone un índice energético de sostenibilidad a partir de la huella energética del agua (HEA) en la distribución. Este índice pretende poder ser incluido dentro de los criterios de diseño y análisis de redes de distribución para tener en cuenta las pérdidas energéticas por fricción en las redes tal como se consideran otro tipo de criterios (p.e. presión, velocidad, económicos), para el estudio y dimensionado de redes.

MATERIAL Y MÉTODOS

Metodología. Caracterización y diseño de redes sintéticas (Fases 1 a 4)

La metodología desarrollada en esta sección describe las fases necesarias para realizar un balance energético sobre redes de distribución con condiciones de diseño y funcionamiento similares. La Figura 1 recoge las fases propuestas. Las cuatro primeras

fases desarrollan la red sintética de conducciones, mientras que la última (Fase 5) contempla el balance energético del sistema. El objetivo de la metodología es obtener la caracterización de redes sintéticas con unos mismos criterios de diseño basados en el patrón de consumo de cada una de las redes. Esta caracterización es necesaria para poder desarrollar los balances energéticos en cada una de ellas de forma inherente al sistema, pudiendo comparar los valores energéticos atendiendo únicamente a la variable objeto de estudio, en este caso, el patrón de consumo.

Los datos necesarios, los cuales deben ser medidos o estimados, para poder caracterizar las redes son:

- Entrada de Datos 1: caudales medidos en la cabecera de la red objeto de estudio. En este caso los caudales son discretizados en intervalos de una hora.
- Entrada de Datos 2: toponimia de la red base, sobre la cual se caracterizan las cuatro redes sintéticas, definiendo los nudos de consumo, cotas topográficas, demanda base y longitudes de líneas que conforman dicha red, así como demanda base de los nudos de consumo que conforman la red objeto de análisis.

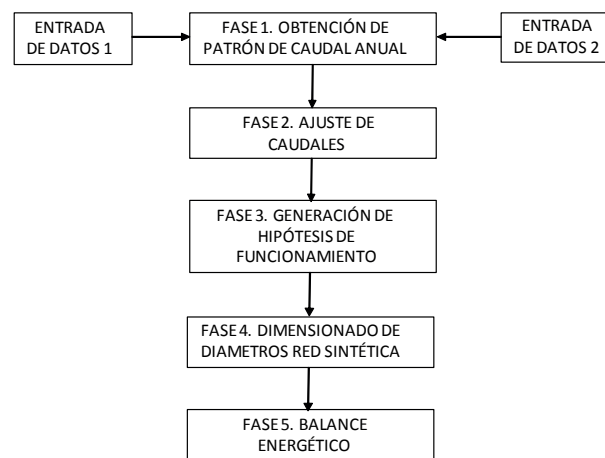


Figura 1 | Metodología de caracterización de red sintética y balance energético para cada caso de estudio analizado.

Enumerados los datos necesarios para la caracterización de las redes, a continuación, se describe la metodología aplicada a cada uno de los patrones de consumo comparados:

1. *Obtención del patrón de caudal anual (RQ)*: Para cada entrada de datos registrados de caudal (Entrada de Datos 1; Figura 1), se obtiene el patrón de funcionamiento anual horario en la red sintética. Este patrón se calcula consecutivamente para cada intervalo de tiempo según la Ecuación (1):

$$RQ_j = \frac{Q_j}{Q_{100\%}} \quad (1)$$

donde Q_j es el caudal circulante por la línea de cabecera de la red en el instante j en m^3/s ; $Q_{100\%}$ es el caudal cuyo valor es igual a la suma de las demandas totales de los nudos de consumo en m^3/s . $Q_{100\%}$ según la Ecuación (2):

$$Q_{100\%} = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i \quad (2)$$

donde i son los diferentes nudos que conforman la red variando de 1 hasta n , siendo n el número total de nudo de consumo; Q_i es la demanda total de cada nudo de consumo en la red objeto de estudio en m^3/s . La demanda de los nudos de consumo en esta red viene establecida por la Entrada de Datos 2 (Figura 1).

Una vez obtenido el patrón de consumo a lo largo del año, se aplica a cada uno de los nudos de consumo de la red sintética, obteniendo la curva de caudales anuales para la línea de cabecera de la red sintética. La curva de caudales en la línea de cabecera tiene la misma forma geométrica que la curva introducida en los nudos de consumo.

2. *Ajuste a caudal superior.* Los valores de los caudales obtenidos en la línea de cabecera son ajustados a un caudal superior. El objetivo de este ajuste es poder comparar en las mismas situaciones de consumo en cada uno de los patrones analizados. Este ajuste se lleva a cabo ajustando a un valor entero de caudal superior, el caudal circulante por la línea. En el caso de estudio presentado, el ajuste se ha realizado en múltiplos de 5 para evitar incrementar el número de generación de hipótesis de funcionamiento a estudiar. Una vez los valores de caudales de la línea de cabecera son ajustados, se obtiene la distribución de frecuencias horarias anuales en cada uno de los casos de estudio.
3. *Generación de hipótesis de funcionamiento.* Para cada caudal ajustado, se generan diferentes hipótesis de funcionamiento (en el caso de estudio desarrollado son igual a 31348). En cada hipótesis de funcionamiento, los nudos de consumo son abiertos o cerrados aleatoriamente, incrementando el número de nudos abiertos hasta que el caudal de cabecera coincide con el caudal ajustado estudiado (p.e. 5, 10, 15 L/s). En algunas situaciones, es necesario que la apertura del último nudo de consumo sea parcial para obtener el caudal ajustado superiormente exacto.

Para determinar el nudo de apertura, se generan números enteros aleatorios (entre 1 y el número total de nudos de consumo), siendo el número generado el que establece el nudo de apertura. Esta generación aleatoria continua consecutivamente hasta conseguir el caudal fijado en la línea de cabecera, sin considerar los nudos abiertos previamente. Este conjunto de nudos de consumo abiertos da lugar a una distribución de caudales en la red y cada una de las líneas, pudiendo determinar el caudal ajustado y altura piezométrica en cabecera, una vez los diámetros sean determinados.

4. *Dimensionado de los diámetros de la red sintética.* El hecho de comparar los balances energéticos muestra la necesidad de que todas las redes comparadas sobre la red sintética tengan unos mismos criterios de diseño. Por ello se lleva a cabo el dimensionado de conducciones de la red sintética. Previamente a la fijación de diámetros es necesario conocer el caudal de dimensionado.

4.1. *Cálculo de los caudales de dimensionado:* La distribución de caudales en cada una de las líneas depende de la localización de los nudos de consumo abiertos. Para obtener esta distribución, se desarrollan diferentes situaciones anuales de apertura de nudos de consumo, las cuales presentan la misma frecuencia anual de caudales ajustados que la línea de cabecera del apartado 2 (en este caso de estudio se han desarrollado 100 por cada red analizada). Estos patrones anuales se crean a partir del conjunto de hipótesis de funcionamiento desarrolladas en el apartado 3. La elección de la hipótesis de funcionamiento se realiza generando números enteros aleatorios (entre 1 y el número total de hipótesis de funcionamiento calculadas para cada caudal ajustado), seleccionando la hipótesis correspondiente y continuando consecutivamente hasta conseguir el número total de hipótesis de funcionamiento para ese caudal ajustado (definido en el patrón de consumo anual). En cada elección, todas las hipótesis vuelven a ser consideradas, aunque ya hayan sido seleccionadas previamente.

Para cada patrón generado, se determina el caudal de dimensionado de cada una de las líneas en función del número de nudos de consumo aguas abajo (Q_{dc}), atendiendo al criterio expuesto en la Tabla 1 (Granados García, 2013).

Tabla 1 | Criterios de dimensionamiento.

Número de nudos de consumo	Caudal (Q_{dc})
De 1 a 5	Correspondiente al caudal acumulado de las tomas
De 6 a 25	Correspondiente al percentil del 99%
>25	Correspondiente al percentil del 95%

De todos los patrones generados y para cada línea, se elige el máximo caudal obtenido de acuerdo al criterio recogido en la Tabla 1. El caudal de cálculo de dimensionado final (Q_{dim}) será el mayor valor entre el caudal calculado anteriormente y el caudal obtenido en la línea siguiente conectada aguas abajo (Q_{dl}), definido en la Ecuación (3):

$$Q_{dim} = \max(Q_{dc}; Q_{dl}) \quad (3)$$

- 4.2. *Determinación de diámetros.* El dimensionado de la red se lleva a cabo mediante una hoja Excel programada en Visual Basic (Walkenbach, 2010). Esta aplicación determina el conjunto de diámetros y altura resistente de la instalación, minimizando el coste de amortización anual a través del método de la serie económica (Munizaga, 1976; Pérez-García, 1993), teniendo en cuenta las restricciones de diseño en términos de presión y velocidad. La presión mínima fijada en los nudos de consumo es 20 mca, siendo 10 mca para nudos de la red que no tienen consumo. En cuanto a los criterios de velocidad, se establece una velocidad máxima en 2.5 m/s y la mínima en 0.5 m/s. En cada red analizada con esta metodología propuesta, se establece un escenario único de caudales por línea y su correspondiente solución de diámetros.

Metodología. Balance energético (Fase 5)

Determinación de alturas resistente de la instalación

Particularmente en este caso, al tratarse de una red sintética inyectada, antes de realizar el balance energético debe determinarse la altura resistente de la instalación necesaria para garantizar la presión mínima de servicio en cada una de las hipótesis de funcionamiento. Para un mismo caudal (en este caso ajustado), las necesidades de presión son distintas, dependiendo de la situación de los nudos de consumo abiertos. Esta variación implica el estudio de las alturas resistentes necesarias para el conjunto de hipótesis generadas, determinando así su variabilidad en función del nudo más desfavorable. Para cada caudal se obtienen los diferentes pares de valores caudal (Q) y altura (H), asignándose el percentil 95% (López-Cortijo *et al.*, 2007; Pulido-Calvo *et al.*, 2003) del conjunto de pares de datos determinados. Este valor representa la presión de consigna que el grupo de bombeo debe proporcionar para dar servicio a la red, en función del caudal circulante en la línea de cabecera (Planells y Ortega, 2006).

Balance energético

Para realizar matemáticamente la aproximación a la resolución del problema, debe aplicarse la ecuación de la integral de la energía a un determinado volumen de control (red de distribución), a través de la aplicación del Teorema de Arrastre de Reynolds (White, 2008). Para un sistema de distribución (Figura 2) con un único punto de suministro (depósito, si la red es por gravedad o grupo de bombeo, si la red es inyectada), la ecuación integral de la energía puede simplificarse en la Ecuación (4):

$$\gamma Q_0 H_0 \Delta t = \sum_{i=1}^n \gamma Q_i H_i \Delta t + \rho \left(\sum_{i=1}^n (Q_i u_i - Q_{0i} u_{0i}) \right) \Delta t \quad (4)$$

donde γ es el peso específico del fluido en kN/m³; Q_0 es el caudal total demandado por la red en m³/s; H_0 es la altura piezométrica de la lámina de agua en el depósito en mca; Q_i es el caudal demandado por cada punto de consumo en m³/s; H_{0i} altura piezométrica del nudo de consumo i en mca, la cual está formada por la presión en el nudo (P_i) y altura geométrica del mismo (z_i); el producto $\gamma Q_0 H_0 \Delta t$ es la energía total (E_T) que el depósito o bomba aporta al sistema en kW; Δt es el intervalo de tiempo considerado en segundos; $\sum_{i=1}^n \gamma Q_i H_i \Delta t$ es la energía en kW, la cual es consumida por cada uno de los n nudos que forman el sistema (E_{TA}); y $\rho \left(\sum_{i=1}^n (Q_i u_i - Q_{0i} u_{0i}) \right) \Delta t$ es el intercambio de energía interna. En un sistema adiabático, ésta equivale a las pérdidas por fricción (E_{FR}) en kW. Como el objetivo de la metodología es comparar el balance energético atendiendo al patrón de consumo, no se consideran las fugas, analizando únicamente el efecto del patrón de consumo. Sin embargo, dicho volumen de fugas sí debería tenerse en cuenta en caso de realizar una auditoría energética de una red real (Pardo *et al.*, 2013; Cabrera *et al.*, 2014).

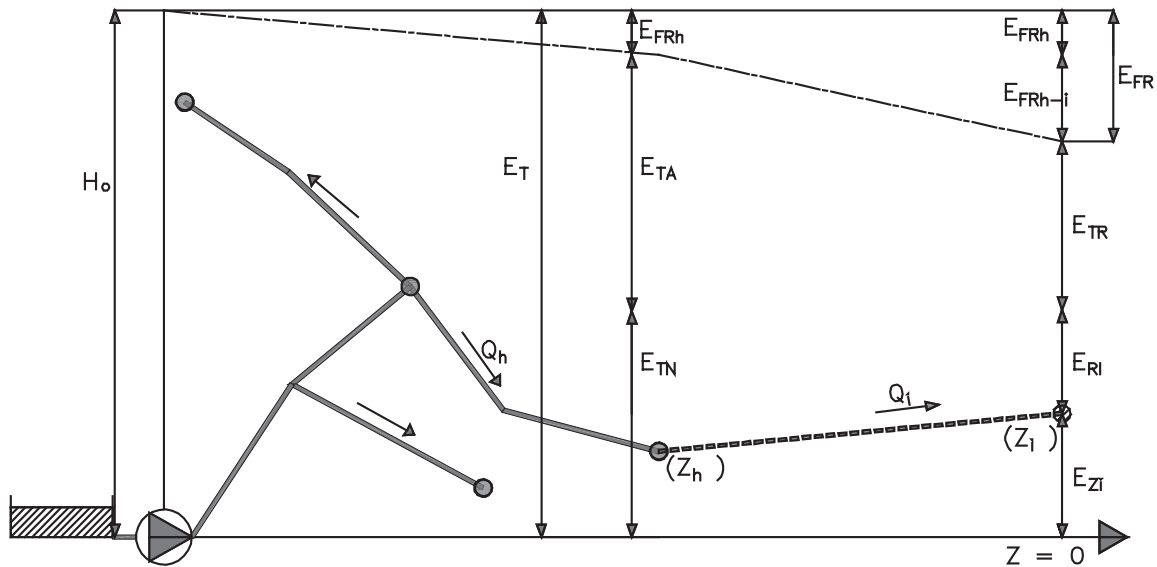


Figura 2 | Esquema de Energías en un sistema de distribución (adaptado de (Pérez-Sánchez *et al.*, 2016)).

En el trabajo de Pérez-Sánchez *et al.* (2016) se discretizó a partir del balance global del sistema de la Ecuación (4) en diferentes términos de energía para cada línea y tipo de nudo de consumo (hidrante o acometida final de usuario) a través de la Ecuación (5) generalizada:

$$E_{Ti} = E_{FRi} + E_{TNi} + E_{TAi} \quad (5)$$

donde E_{Ti} es la energía aportada al sistema para cada uno de los nudos de consumo (i) en kWh; E_{FRi} es la energía disipada por fricción en la red desde el origen hasta un nudo de consumo en kWh; E_{TNi} es la energía mínima necesaria para garantizar en una línea o nudo de consumo el suministro en el punto más desfavorable situado aguas abajo del punto de estudio en kWh. Esta energía tiene en cuenta la energía geométrica (cota topográfica del punto más desfavorable; z_i), la presión mínima requerida para dar servicio en el nudo más desfavorable (P_{Ri}) y las pérdidas de carga desde el punto de estudio al nudo más desfavorable; E_{TAi} es la energía disponible en un nudo de consumo o línea que no es necesaria para consumir en ese punto en kWh. Así, la energía disponible en una línea o hidrante puede ser clasificada a su vez en energía teórica recuperable (E_{TRi}) y energía teórica no recuperable (E_{NTRi}). En este caso E_{TRi} y E_{NTRi} no son definidas numéricamente mediante expresiones porque no son utilizadas en el estudio planteado en este documento. En el caso de una acometida final de usuario toda la energía disponible es teóricamente recuperable. Las diferentes energías descritas (E_{Ti} ; E_{FRi} ; E_{TNi} ; E_{TAi}) son definidas por las Ecuaciones de (6) a (9):

$$E_{Ti}(\text{kWh}) = \frac{9.81}{3600} Q_i H_0 \quad t \quad (6)$$

$$E_{FRi}(\text{kWh}) = \frac{9.81}{3600} Q_i (H_0 - H_i) \quad t \quad (7)$$

$$E_{TNi}(\text{kWh}) = \frac{9.81}{3600} Q_i H_{\min_i} \quad t \quad (8)$$

$$E_{TAi}(\text{kWh}) = \frac{9.81}{3600} Q_i (H_i - H_{\min_i}) \quad t \quad (9)$$

donde H_0 es la altura aportada por el sistema (depósito o grupo de bombeo) en mca; H_{\min_i} es la altura piezométrica mínima en una línea o nudo de consumo para garantizar la presión mínima requerida en el nudo más desfavorable aguas abajo en mca.

Aunque la huella energética del agua engloba diferentes términos (p.e., captación, distribución, consumo y reutilización) (Klein *et al.*, 2005), el balance energético anteriormente expuesto, permite también determinar la huella energética del agua en la distribución (en adelante *HEA*). En algunos casos, la distribución de caudales en una red implica una elevada pérdida de energía debida a la fricción, como consecuencia de dimensionados erróneos que pueden conducir a la falta de presión en los puntos de suministro, así como al consumo innecesario de energía, máxime si la red es inyectada. Por tanto, un análisis de la *HEA* permite establecer redes más sostenibles desde el punto de vista del consumo energético en su distribución en función del patrón de consumo. La *HEA* en la distribución es definida como la energía disipada por fricción (E_{FR}) por unidad de volumen distribuido en la red (kWh/m³) (Klein *et al.*, 2005; Cabrera *et al.*, 2014).

Esta huella energética puede ser analizada para cada una de las redes, en función del caudal normalizado circulante. En el análisis de la *HEA*, deben ser considerado que:

1. El documento analiza únicamente la variación de la *HEA* en la fase de distribución en función del patrón de consumo. En ningún caso analiza la *HEA* existente en el punto de consumo, la cual depende del tipo de consumo (p.e., aspersión, riego por goteo, abastecimiento). Por lo tanto, el balance no considera las pérdidas que se producen una vez el caudal es entregado al punto de consumo, puesto que no es el objeto de estudio del presente documento y el balance considera la energía mínima requerida en la acometida H_{min_i} .
2. El resto de pérdidas que existen en una red de distribución (p.e. pérdidas en estaciones de filtrado y/o estaciones de bombeo) no son consideradas en los casos de estudio analizados, al igual que las fugas, puesto que el documento analiza únicamente la influencia de los patrones de consumo en la huella energética en la distribución. El caso concreto de las pérdidas singulares es tenido en cuenta como una longitud equivalente del 10%. En el análisis de un caso de estudio concreto, las pérdidas que pudiesen existir complementarias (p.e. estación de filtrado) deberán ser computadas en el balance energético como un sumando adicional que contabilice dichas pérdidas.

En todos los casos analizados se ha supuesto un mismo valor de H_{min_i} para que la elección de un valor u otro no afecte en los resultados obtenidos de *HEA* en la distribución. No obstante, la información que aporta *HEA* en la distribución no permite comparar entre sistemas, debido a que cada red presenta distribuciones de caudales y diámetros diferentes y, por lo tanto, valores de energía de fricción distintos. Para poder comparar estos valores, se define la huella energética adimensional (HEA_A) de la distribución mediante la Ecuación (10):

$$HEA_A = \frac{HEA}{HEA_d} \quad (10)$$

donde *HEA* es la huella energética para cada valor de caudal normalizado en kWh/m³ y HEA_d es la huella energética obtenida para un escenario único de caudales por línea, escogiéndose el escenario de caudales para el dimensionado de la red en kWh/m³.

La determinación de HEA_A permite tener una ratio de huella energética, la cual es inherente al diseño de la red. Esto permite comparar los resultados obtenidos entre diferentes redes ya diseñadas. HEA_A puede determinarse para cada valor de caudal ajustado en cada una de las hipótesis de funcionamiento. Para poder comparar las mismas situaciones en las diferentes redes, para cada valor de HEA_A se asocia a un caudal adimensional (Q_A), según la Ecuación (11):

$$Q_A = \frac{Q_{Ni}}{Q_d} \quad (11)$$

donde Q_A es la ratio de caudal adimensional; Q_{Ni} es el caudal ajustado analizado en m³/s; Q_d es el caudal de dimensionado de la línea de cabecera atendiendo al criterio establecido en la Tabla 1 en m³/s.

Caso de Estudio

El caso de estudio presentado analiza el comportamiento de cuatro patrones de consumo diferentes, aplicando la metodología previamente descrita. Se dispone de los datos registrados por el caudalímetro instalado en la línea de cabecera de cada una de

dichas redes. Estas lecturas reales se corresponden con dos redes de riego (denominadas red A y B) y dos redes de abastecimiento (denominadas C y D). La red A y B se corresponden con redes de riego dimensionadas a la demanda, siendo los cultivos diferentes entre las redes en cuanto a necesidades y técnicas culturales de riego. La red C se corresponde con una red de distribución de un municipio donde la población se mantiene constante a lo largo del año, mientras que la red D se corresponde con el abastecimiento de una ciudad turística que tiene una mayor presencia estacional del turismo entre los meses de junio y octubre. En cuanto a la topología de la red sintética (Figura 3), está compuesta por una red ramificada inyectada por grupos de presión. La red está formada por 155 líneas y 154 nudos, de los cuales 47 son nudos de consumo. La cota de la red varía entre 543.9 y 620.2 m, siendo la cota del grupo de inyección la 567 m.

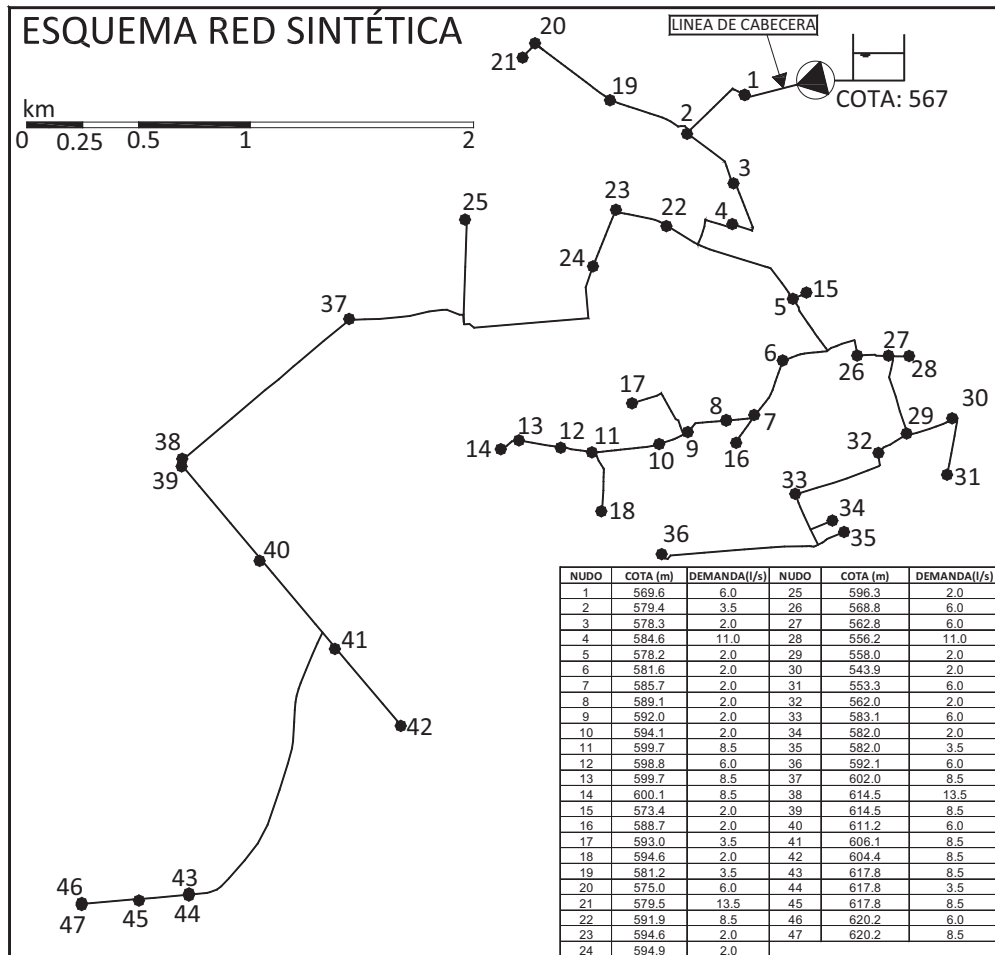


Figura 3 | Topología de la red sintética a utilizar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Patrones de Caudales Anuales y Redes Sintéticas

Los patrones de caudales anuales obtenidos para cada red analizada (A, B, C y D) son los reflejados en la Figura 4. En esta figura se observa los valores de RQ para los caudales medios diarios a lo largo del año.

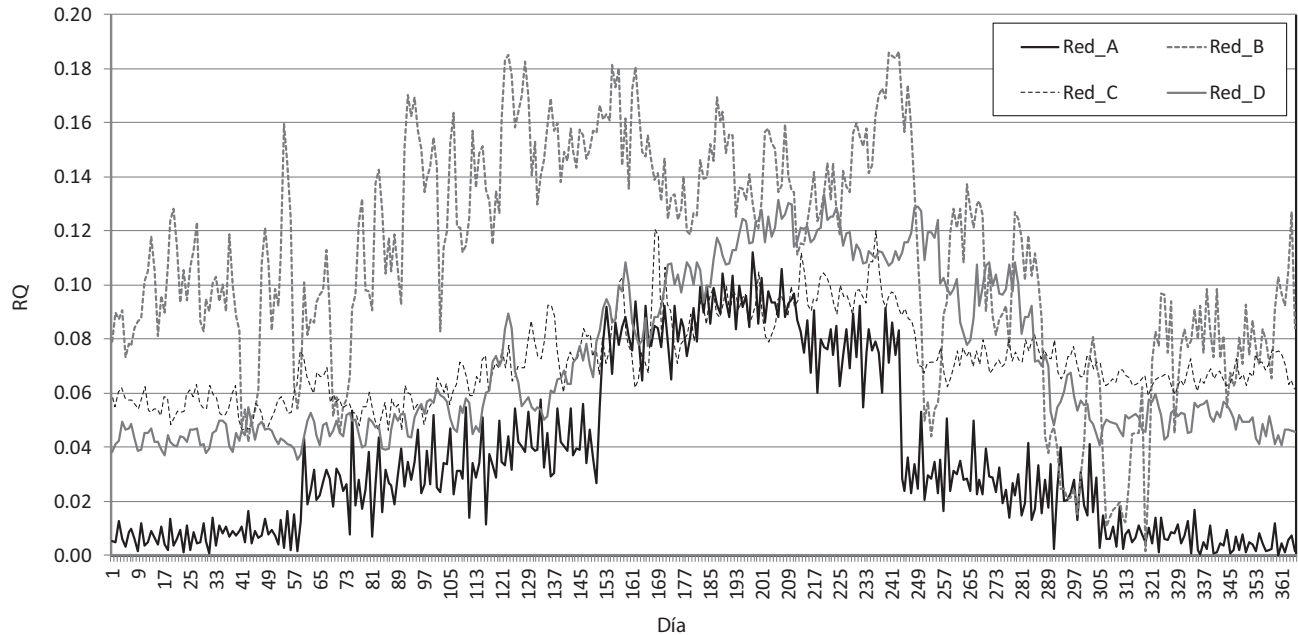


Figura 4 | Patrones de caudal medio diario correspondientes a la red A, B, C y D.

Visualmente la figura muestra que los cuatro patrones horarios son diferentes, los cuales han sido aplicados sobre un $Q_{100\%}$ igual a 254 L/s. La red A, de riego, presenta un patrón de caudal que sigue una tendencia similar a las de necesidades teóricas de un cultivo, siendo mínima en los meses de invierno y máximas en los meses de verano. En esta red, RQ varía entre 0 y 0.290 en el mes de julio. El valor de la mediana anual es 0.015. La red B, también de riego, presenta un patrón anual típico de una red de riego en la cual se aplican técnicas culturales de riego que promueven riegos de alta frecuencia fuera de los meses centrales del año. En esta red, RQ oscila entre 0 y 0.459 en el mes de febrero, siendo el valor promedio anual de 0.095. La red C, ya de abastecimiento, presenta un patrón con una gran uniformidad. Esta red pertenece a una red de un municipio no turístico, en el cual la población se mantiene constante a lo largo del año. En la red C, RQ oscila entre 0.015 y 0.206 para el mes de agosto. El valor de la mediana de RQ para esta red es 0.069. Finalmente, la red D corresponde a un sistema de abastecimiento de un municipio turístico, con una alta ocupación entre los meses de junio a octubre. RQ varía entre 0.004 y 0.258. El valor de la mediana de RQ es 0.065.

Determinado RQ en cada una de las redes, teniendo en cuenta la demanda base de cada uno de los 47 nudos de consumo, se desarrolla la frecuencia de caudales ajustados para cada una de las redes. La frecuencia relativa (FR) y acumulada (FA) para cada una de las redes se representa en la Figura 5.

En la Figura 5 se observa que las frecuencias relativas en las redes A y B son diferentes. La red A tiene una frecuencia del 70.75% de caudales bajos entre 0 y 10 L/s, mientras que la red B presenta una frecuencia del 18.21% en este rango de caudales, mostrando una frecuencia del 52.04% de caudales entre 10 y 35 L/s. Esta diferencia de valores establece un comportamiento diferente en los caudales demandados, justificándose de este modo la diferencia de comportamiento entre los patrones analizados. En cambio, las redes C y D presentan una frecuencia de caudales similar (tanto relativa como acumulada), con frecuencias acumuladas del 65.35 y 68.16% respectivamente para rangos de caudal entre 0 y 20 L/s. En todos los casos se observa que para valores de caudal ajustado igual a 60 L/s la frecuencia acumulada es del 100% para las redes A, C y D, y del 91.50% para la red B. Esta diferencia de frecuencias relativas de caudales en cada una de las redes como consecuencia del patrón de consumo, tiene implicaciones directas en los caudales máximos y por tanto en su dimensionado.

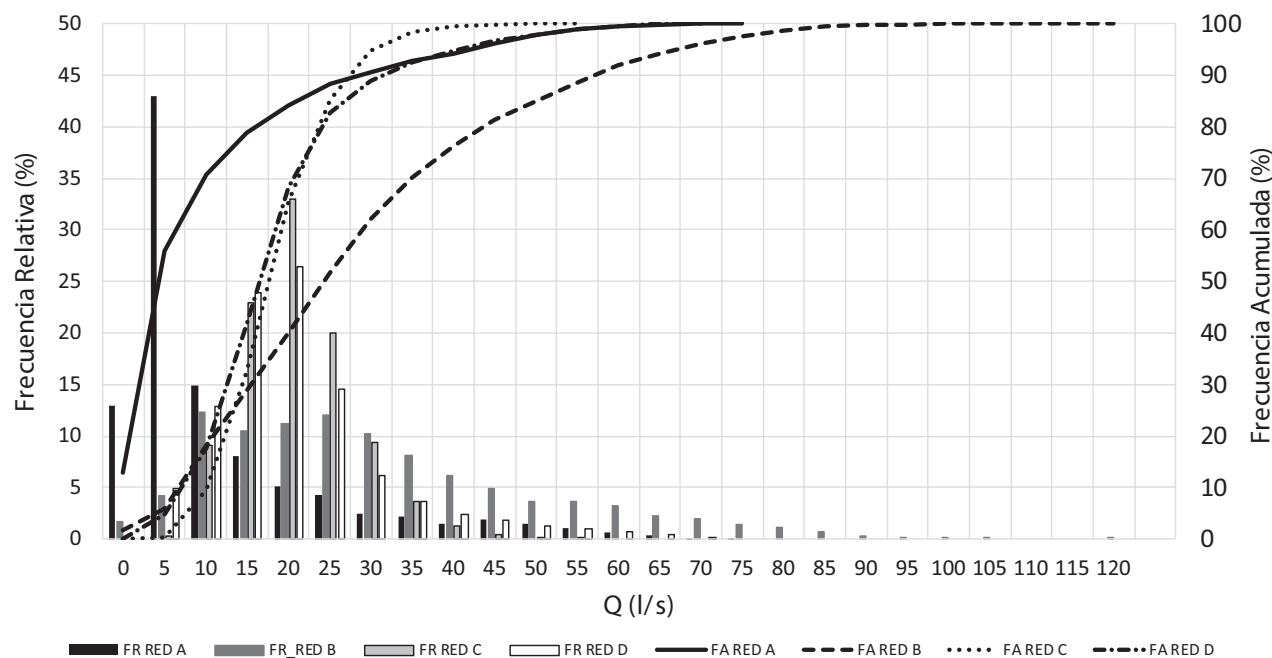


Figura 5 | Frecuencia relativa (*FR*) y acumulada (*FA*) de caudales ajustados para las redes A, B, C y D.

La Tabla 2 resume los caudales de dimensionado y alturas de inyección en cabecera obtenidas en el dimensionado de cada una de las redes, así como las longitudes de cada uno de los diámetros seleccionados en función del tipo de la red.

Tabla 2 | Diámetros seleccionados en cada una de las redes sintéticas.

	RED A	RED B	RED C	RED D
Caudal en cabecera (L/s)	44.98	69.97	35.00	45.00
Altura de inyección en cabecera (mca)	101.55	102.36	101.60	101.30
Diámetro (mm)	RED A	RED B	RED C	RED D
	Longitud (m)	Longitud (m)	Longitud (m)	Longitud (m)
DN40	0.00	0.00	0.00	0.00
DN50	2902.99	2902.99	3178.49	3178.49
DN63	782.00	782.00	506.50	506.50
DN75	334.63	334.63	334.63	334.63
DN90	1965.38	1965.38	1965.38	1965.38
DN110	1639.30	1267.06	1844.49	1844.49
DN125	433.33	435.73	369.84	369.84
DN150	1836.43	2400.93	1762.69	1562.03
DN200	2407.80	2109.14	2003.95	2204.61
DN250	2717.53	2821.53	4912.95	3053.42
DN300	2717.87	2387.57	893.86	2753.39
DN350	35.52	365.82	0.00	0.00
DN400	0.00	0.00	0.00	0.00

En cuanto a los parámetros de diseño, los caudales oscilan entre 35 y 69.97 L/s en función de la red y las alturas de inyección entre 101.30 y 102.36 mca. El rango de diámetros seleccionados oscila entre 50 y 350 mm en todos los casos, aunque las longitudes son diferentes entre las redes dimensionadas.

Balance energético

Tal y como se desarrolla en la metodología, en primer lugar, deben determinarse las alturas piezométricas de inyección en función del caudal circulante por cabecera. La Figura 6 muestra los valores obtenidos (p.e. 31348 casos para la red B) para cada una de las redes analizadas y caudales ajustados. La figura recoge la envolvente que cumple con el percentil del 95% de valores de altura resistente, así como el punto de óptimo de inyección de la red con el cual se ha dimensionado, teniendo en cuenta los costes energéticos. En la Figura 6 se observa que la altura resistente de la instalación en función del caudal (considerando el percentil del 95% de los valores obtenidos en las hipótesis analizadas) oscila entre 75 y 100 mca para caudales entre 5 y 70 L/s en los patrones A, C y D (excepto para la Red C que el caudal máximo ajustado es 55 L/s). Como consecuencia de que por la red B circulan mayores caudales, ésta presenta mayores alturas resistentes, alcanzando valores próximos a 120 mca para caudales de 120 L/s. Si se analiza el rango de caudales ajustados entre 5 y 70 L/s, la red B presenta una altura resistente inferior a las obtenidas en los patrones A, C y D, debido a que la red B presenta una mayor longitud de diámetros de dimensionado superiores. Para caudales mayores que 70 L/s, ya no se puede comparar con el resto de redes.

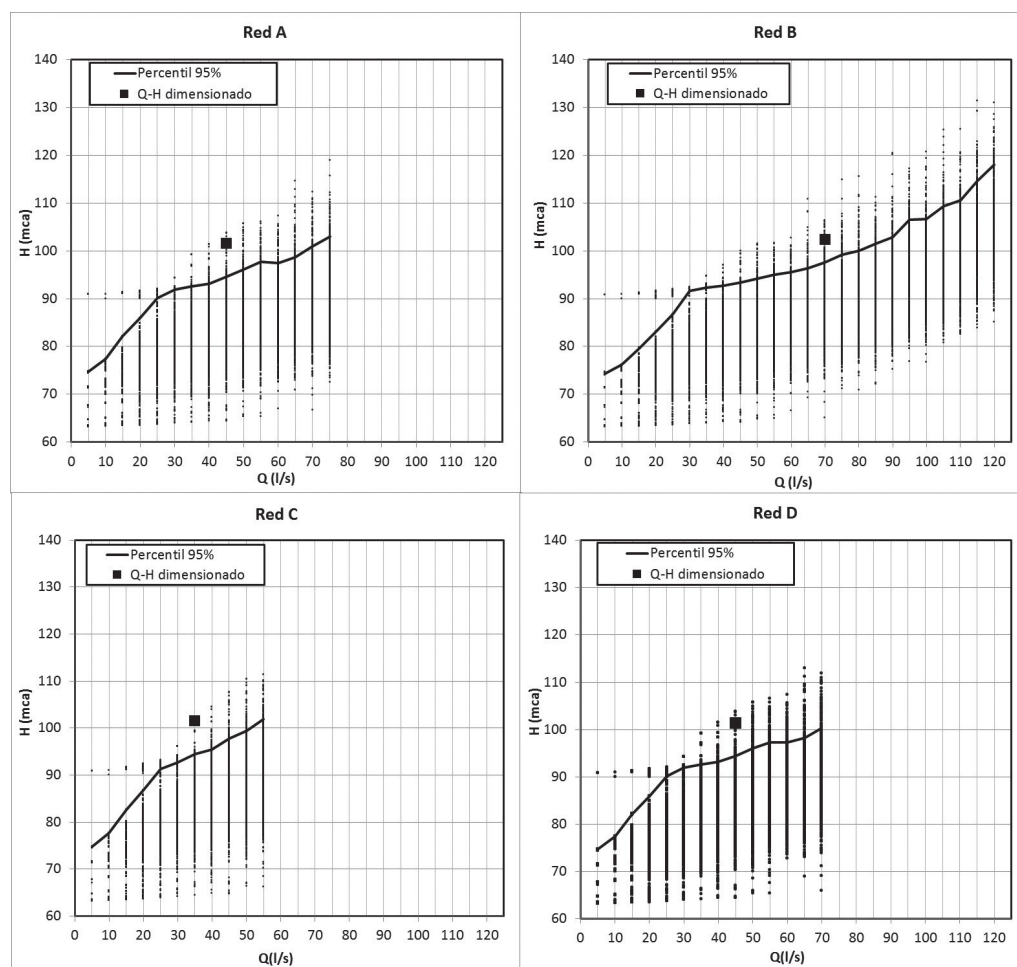


Figura 6 | Altura resistente en función del patrón de consumo (A, B, C y D), del caudal ajustado y conjunto de hipótesis de funcionamiento.

Determinados los diámetros de las redes sintéticas (considerando los mismos criterios de dimensionamiento) y la altura resistente de la instalación (en función del caudal ajustado y conjunto de hipótesis de funcionamiento), puede realizarse el balance energético para cada uno de los patrones de consumo analizados. Los resultados anuales de energías totales (E_T), de fricción (E_{FR}), total necesaria (E_{TN}) y teórica disponible (E_{TA}) son los mostrados en la Tabla 3. Estos valores anuales han sido obtenidos mediante las Ecuaciones de (6) a (9), en función de las horas de funcionamiento anuales para cada caudal ajustado y atendiendo a su patrón de consumo.

Tabla 3 | Balance energético desarrollado para los cuatro patrones de consumo.

RED	ET		EFR		ETN		ETA	
	kWh	kWh/m ³	kWh	kWh/m ³	kWh	kWh/m ³	kWh	kWh/m ³
A	89026.27	0.236	7544.26	0.020	65519.40	0.173	15962.61	0.042
B	240568.50	0.249	27056.72	0.028	154812.11	0.160	58699.68	0.061
C	157302.41	0.241	14106.92	0.022	116161.61	0.178	27033.89	0.041
D	156978.42	0.239	13598.27	0.021	114421.45	0.175	28958.70	0.044

Los resultados anuales de dicho balance son mostrados de forma global para cada uno de los términos energéticos y patrón de consumo analizado (Redes A, B, C y D) en la Tabla 3. Sin embargo, cada red tiene un volumen distribuido total diferente, por lo que para poder comparar los valores de energía, éstos han sido reducidos a la unidad de volumen distribuido. Según la Tabla 3, la red B es la que mayor energía total necesita en total 240568.5 kWh (0.249 kWh/m³). La ratio de E_T oscila entre 0.236 kWh/m³ para la red A y 0.249 kWh/m³ para la red B. Los términos de E_{FR} varían entre 0.020 kWh/m³ para la red A y 0.028 kWh/m³ para la red B. La E_{TN} varía entre 0.160 kWh/m³ para la red B y 0.178 kWh/m³ para la red C. Finalmente, la E_{TA} varía entre 0.041 kWh/m³ en la red C y 0.061 kWh/m³ en la red B.

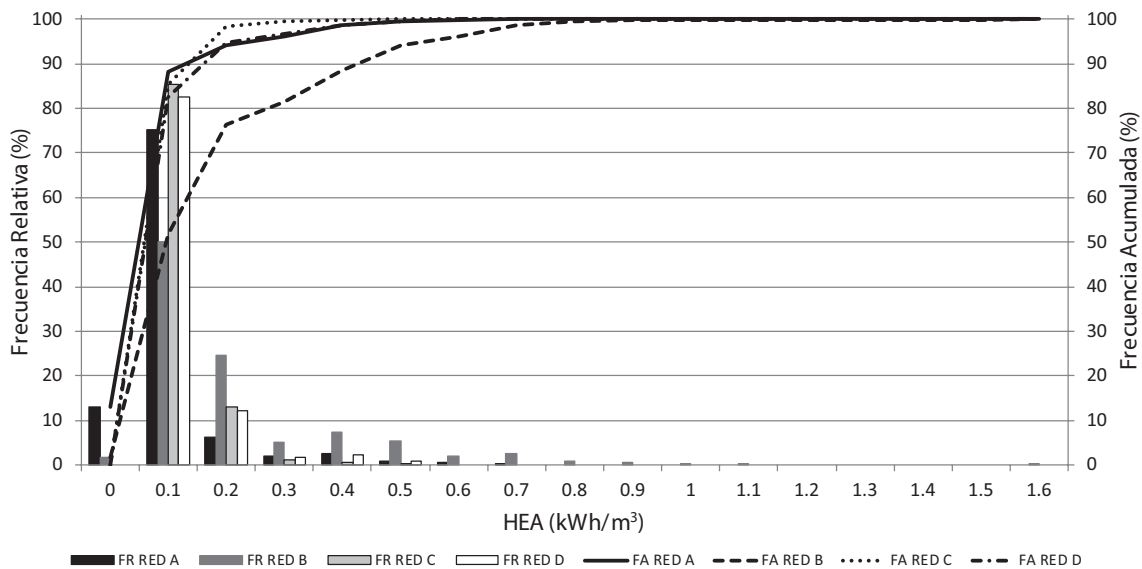


Figura 7 | Frecuencia relativa y acumulada anual de la Huella Energética del Agua (kWh/m³) dependiendo el patrón de consumo

Conocida la energía de fricción, se puede determinar la huella energética horaria anual a partir de los valores promedios obtenidos de las hipótesis de funcionamiento generadas. La Figura 7 muestra la frecuencia relativa (FR) y acumulada (FA) de la HEA para cada uno de los cuatro patrones de consumo anuales. En la figura se observa que el valor principal de HEA es 0.1 kWh/

m^3 , dentro del rango de valores medios (entre $0.1\text{-}0.3 \text{ kWh/m}^3$) que los diferentes trabajos publicados y analizados en diferentes redes muestran. Este valor presenta un 85.31% y un 82.73% de frecuencia en el caso de los patrones C y D respectivamente, 75.36% para la red A y 51.85% para la red B. Si la frecuencia acumulada es observada, ésta alcanza valores de 94.32%, 98.31% y 94.84% para las redes A, C y D respectivamente, mientras que para la red B presenta una frecuencia acumulada del 76.42%. Un valor próximo al 95% en la red B se obtiene para valores de HEA de 0.6 kWh/m^3 . El análisis de la figura muestra que el patrón de consumo B presenta un mayor índice de HEA , con valores puntuales máximos de 1.6 kWh/m^3 .

La Tabla 3 y Figura 7 muestran que el patrón de consumo con unos mayores valores de RQ (Red B) presenta un mayor consumo de energía en la mayoría de sus términos (E_T , E_{FR} y E_{TN}). El análisis de la HEA para cada uno de los patrones, se puede estudiar de una forma inherente al sistema analizado. Para poder realizar esta comparación, el valor de HEA_A se establece para cada valor de Q_A determinado de la red. Los caudales de dimensionado son 44.98 , 69.97 , 35 y 45 L/s , para las redes A, B, C y D respectivamente (Tabla 2). El valor de HEA de dimensionado obtenido en cada caso es 3.08 , 3.36 , 2.85 y 2.86 kWh/m^3 para la red A, B, C y D respectivamente.

Los valores de HEA_A se muestran en la Figura 8 para cada uno de los patrones analizados. En la figura se observa que para todo valor de Q_A , el mayor valor de HEA_A es obtenido en el caso del patrón de consumo B, siendo este valor máximo de HEA_A igual a 0.45 . Por el contrario, el patrón C, el cual presenta una mayor uniformidad en los valores de RQ a lo largo de todo el año, es el que presenta un menor índice de HEA_A para todo el rango de Q_A . En este caso el valor máximo de HEA_A igual a 0.16 . Según la Figura 8, los patrones A y C, presentan valores similares para los valores de Q_A , con valores máximos próximos a 0.20 . Analizando la Figura 8, si Q_A es igual a 0.25 el valor mínimo obtenido de HEA_A es 0.0048 kWh/m^3 para la red C. Las redes A y D presentan valores de HEA_A superiores un 32.49% y 44.72%, respectivamente, mientras que la red B presenta una HEA_A igual a 0.0114 kWh/m^3 , un 141.14% superior a la red C (red de mínima huella energética adimensional). En el caso de valores de Q_A igual a 0.5 , los resultados son similares. La red C presenta el valor mínimo de HEA_A , siendo igual a 0.0168 kWh/m^3 . La red A presenta un valor un 28.15% superior, la red B un 155.36% y la red D un 41.07% si son comparados con la red C. Considerando valores de Q_A igual a 1 , de nuevo la red C presenta el valor mínimo de 0.0629 kWh/m^3 . Los valores de HEA_A obtenidas comparados con los obtenidos en la red C son un 36.72%, 159.62% y 48.17% superiores para las redes A, B y D respectivamente.

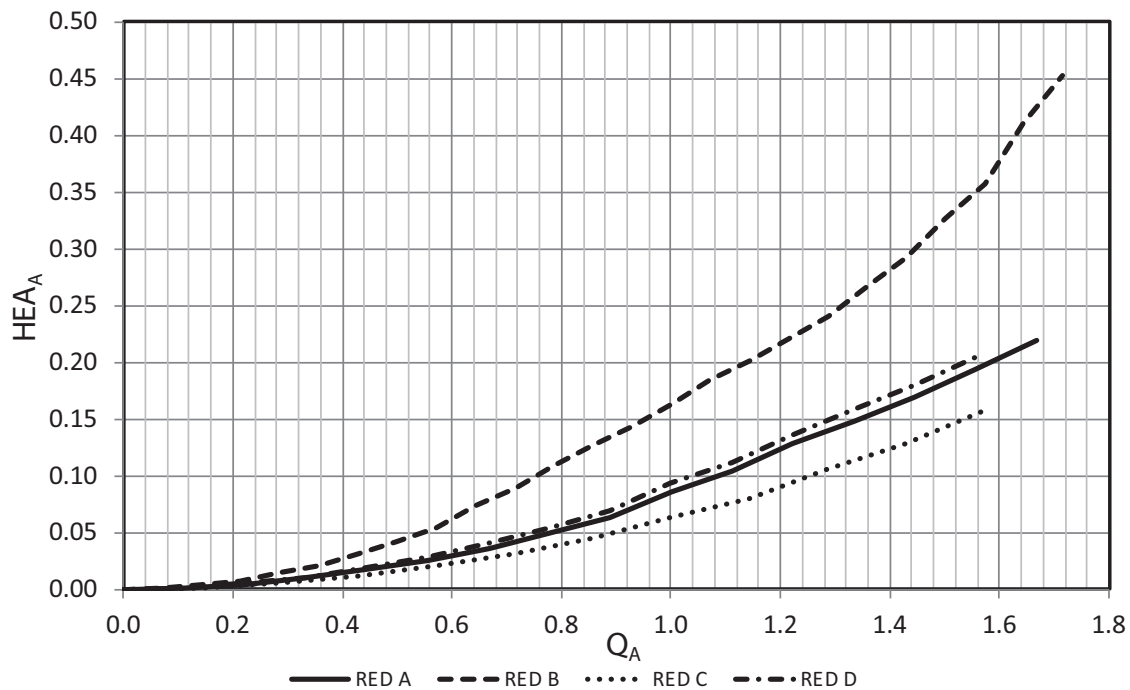


Figura 8 | HEA_A en función de Q_A para cada uno de los patrones de consumo

Cuando los valores son analizados para Q_A igual 1.5, la red C presenta un valor de HEA_A igual a 0.1428 kWh/m³. Si los valores obtenidos para el resto de redes (A, B y D) son comparados, se obtienen resultados superiores de HEA_A iguales a un 27.10%, 128.71% y 34.51% respectivamente.

Finalmente, si los valores promedios de HEA_A de las redes A, B y D son comparados con los obtenidos para la red C y para diferentes intervalos de Q_A , las HEA_A promedio obtenidas son un 31.53%, 149.38% y 42.59% superiores, respectivamente. El análisis de la HEA_A establece que la red con mayor variabilidad de RQ (Red B), tiene un mayor valor de HEA_A comparado con redes que presentan valores de RQ con menos variabilidad.

CONCLUSIONES

El documento desarrollado permite establecer diferentes conclusiones en base a los resultados expuestos anteriormente. La necesidad de la reducción del consumo energético está asumida por parte de la sociedad y el desarrollo de auditorías en las redes de distribución es una herramienta fundamental para detectar las diferentes anomalías del sistema estudiado. No obstante, intentar establecer umbrales de eficiencia es un proceso complejo que implica un análisis exhaustivo de un gran número de redes. Del desarrollo del documento, se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

1. Se ha establecido una metodología para desarrollar redes sintéticas con unos mismos criterios de diseño técnicos y económicos, a partir de los patrones de consumo parametrizados en los casos de estudio desarrollados. Esta metodología puede extrapolarse al estudio de cualquier otra red, determinando el valor de RQ característico de la red, teniendo en cuenta la demanda base de la misma.
2. La introducción del concepto “ RQ ” en función del caudal de las demandas totales de los nudos de consumo ($Q_{100\%}$), el ajuste de caudales, el proceso aleatorio de generación de hipótesis de funcionamiento en la apertura y cierre de tomas así como la generación de patrones de consumo normalizados atendiendo a la frecuencia relativa intrínseca de cada red han posibilitado la caracterización de la red sintética, constituyendo una metodología que puede aplicarse en el análisis de cualquier red, tanto a nivel de diseño como en redes ya ejecutadas. El conocimiento y aplicación de RQ a una misma red con los mismos condicionantes (p.e. número de nudos de consumo, topografía, longitud de líneas) ha permitido comparar el balance energético entre cuatro patrones de consumo diferentes. Esto hace del indicador un parámetro adecuado para permitir dicha comparación.
3. Los resultados obtenidos en este caso reflejan que, aquellas redes que presentan un patrón de consumo con mayor variabilidad de RQ , tienen un mayor consumo energético global, necesitando mayores potencias a instalar para distribuir los caudales demandados en caso de que la red sea inyectada. Los valores adjuntados en la Tabla 3, muestran reducciones de consumo de E_T del 5.22%, 3.21%, y 4.01% en las redes A, C y D respectivamente, frente a la red B que presenta un RQ más variable. Si la E_{FR} es analizada, reducciones del 28.57%, 21.42% y 25% en las redes A, C y D respectivamente, frente a la red B. Desarrollado el balance, la frecuencia relativa y acumulada de HEA ha sido determinada para cada una de las redes, mostrando que la red con unos mayores valores de RQ , presenta una HEA superior a la del resto de redes analizadas. La red B presenta una HEA promedio igual a 0.150 kWh/m³, frente a los valores promedios de 0.041 kWh/m³, 0.071 kWh/m³ y 0.072 kWh/m³ en las redes A, C y D. Para poder comparar los valores de HEA , ha sido definido el parámetro HEA_A en función de Q_A . Los resultados mostrados en la Figura 8 han puesto de manifiesto que la red con mayor variabilidad de RQ presentan un mayor valor de HEA_A frente a redes con un RQ anual más uniforme. Los valores HEA_A promedios obtenidos son un 31.53%, 149.38% y 42.59% (para las redes A, B y D) superiores que el valor promedio de HEA_A de la red C (red con valor de RQ menos variable). El análisis ha puesto de manifiesto que, en términos de pérdidas en la distribución, no pueden establecerse umbrales de valores típicos para la HEA en las auditorías energéticas, puesto que dichos valores dependen tanto del dimensionamiento de la red como de la variabilidad de los caudales a lo largo del tiempo.

4. Aunque la *HEA* es un concepto que está presente en todo el ciclo del agua (captación, distribución, consumo y reutilización), en este caso concreto, la propuesta de HEA_A en la distribución puede ser utilizada para desarrollar comparaciones de *HEA* entre redes diferentes. Este índice, además de permitir la comparación de *HEA* entre sistemas de distribución de forma inherente, una vez sancionado, puede incorporarse en las metodologías de dimensionamiento de redes de distribución junto con los criterios técnicos y económicos, introduciendo un parámetro de sostenibilidad en el dimensionado de la red.

El análisis de este índice, no implica que no puedan establecerse otras metodologías que puedan analizar la *HEA* en otras fases del ciclo del agua en una red (p.e. captación). No obstante, la distribución constituye una de las fases más importantes en cuanto a la pérdida de energía en un sistema, debido a que siempre está presente. El resto de fases que intervienen (captación, consumo y/o reutilización) vienen impuestos por los condicionantes de cada red (p.e. niveles piezométricos de pozos de captación, cota de suministro de los puntos de consumo, tipo de abastecimiento o consumo, proceso de reutilización). El establecimiento de los umbrales de diseño de este parámetro con ayuda de la minería de datos es fundamental para la incorporación del parámetro HEA_A , dentro de los parámetros de diseño de una red.

REFERENCIAS

- Abadia, R., Rocamora, C., Ruíz, C. 2008. *Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes*. IDAE, Madrid, Spain.
- Araujo, L.S., Ramos, H., Coelho, S.T. 2006. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resources Management*, 20, 133-149. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-4635-3>
- Berbel, J., Gutiérrez-Martín, C., Camacho, E., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J.A. 2014. “Efectos de la modernización de regadíos en el consumo de agua, energía y coste”, in: *Congreso de Regantes de Huelva. Universidad de Córdoba*.
- Cabrera, E., Almandoz, J., Arregui, F., García-Serra, J. 1998. Auditoría de Redes de Distribución de Agua. *Ingeniería del Agua*, 6(4), 387-399. <https://doi.org/10.4995/ia.1999.2794>
- Cabrera, E., Pardo, M., Cobacho, R., Cabrera Jr., E. 2010. Energy audit of water networks. *Journal Water Resource Planning and Management*. 136, 669-677. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000077](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000077)
- Cabrera, E., Cobacho, R., Soriano, J., 2014. Towards an Energy Labelling of Pressurized Water Networks. *Procedia Engineering*. 70, 209-217. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.024>
- Carravetta, A., Del Giudice, G., Fecarotta, O., Ramos, H. 2013a. Pump as Turbine (PAT) Design in Water Distribution Network by System Effectiveness. *Water*, 5, 1211-1225. <https://doi.org/10.3390/w5031211>
- Carravetta, A., Del Giudice, G., Fecarotta, O., Ramos, H. 2013b. PAT Design Strategy for Energy Recovery in Water Distribution Networks by Electrical Regulation. *Energies*, 6, 411-424. <https://doi.org/10.3390/en6010411>
- Carravetta, A., Fecarotta, O., Del Giudice, G., Ramos, H. 2014. Energy Recovery in Water Systems by PATs: A Comparisons among the Different Installation Schemes. *Procedia Engineering*, 70, 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.031>
- 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>
- Gómez, E. 2016. *Caracterización y mejora de la eficiencia energética del transporte de agua a presión*. PhD Thesis. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/72637>
- Granados García, A. 2013. *Criterios para el dimensionamiento de redes de riego robustas frente a cambios en la alternativa de cultivos*. PhD Thesis. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM).
- Jiménez-Bello, M.A., Royuela, A., Manzano, J., Prats, A.G., Martínez-Alzamora, F. 2015. Methodology to improve water and energy use by proper irrigation scheduling in pressurised networks. *Agricultural Water Management*. 149, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.026>

- Klein, G., Krebs, M., Hall, V., O'Brien, T., Blevins, B.B. 2005. *California's Water – Energy Relationship*, California Energy Commission.
- López-Cortijo, I., Esquiroz, J.C., Aliod, R., García, S. 2007. Determinación de los costes energéticos en el cálculo de redes a presión con bombeo directo in: *XXV Congreso Nacional de Riegos. Pamplona*.
- McNabola, A., Coughlan, P., Corcoran, L., Power, C., Pryor Williams, A., Harris, I., Gallagher, J., Styles, D. 2014. Energy recovery in the water industry using micro-hydropower: an opportunity to improve sustainability. *Water Policy*, 16, 168-183. <https://doi.org/10.2166/wp.2013.164>
- Moreno, M., Córcoles, J., Tarjuelo, J., Ortega, J. 2010. Energy efficiency of pressurised irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. *Biosystems Engineering*, 107, 349-363. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.09.009>
- Munizaga, E. 1976. *Redes de agua potable: diseño y dimensionamiento*. Instituto Eduardo Torroja. Monografía num. 335.
- Pardo, M.A., Manzano, J., Cabrera, E., García-Serra, J. 2013. Energy audit of irrigation networks. *Biosystems Engineering*, 115, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.02.005>
- Pérez-García, R. 1993. *Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación*. PhD Thesis. Universitat Politècnica de Valencia.
- Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F., Ramos, H., López-Jiménez, P. 2016. Modeling Irrigation Networks for the Quantification of Potential Energy Recovering: A Case Study. *Water*, 8, 1-26. <https://doi.org/10.3390/w8060234>
- Planells, P., Ortega, J.F. 2006. Selección de bombas en redes de riego a presión. *Ingeniería del Agua*, 6, 47-57. <https://doi.org/10.4995/ia.2006.2881>
- Pulido-Calvo, I., Roldán, J., López-Luque, R., Gutiérrez-Estrada, J.C. 2003. Water Delivery System Planning Considering Irrigation Simultaneity. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, 129, 247-255. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:4\(247\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:4(247))
- Ramos, H., Borga, A. 1999. Pumps as turbines: an unconventional solution to energy production. *Urban Water*, 1, 261-263. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00016-9)
- Ramos, H., Mello, M., De, P.K. 2010. Clean power in water supply systems as a sustainable solution: from planning to practical implementation. *Water Science and Technology Water Supply*, 10, 39-49. <https://doi.org/10.2166/ws.2010.720>
- Vanham, D., Bidoglio, G. 2013. A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological Indicators*, 26, 61-75. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.021>
- Walkenbach, J. 2010. Excel 2010. Programación con VBA. Editorial Anaya. Madrid. <https://doi.org/10.1002/9781118257616>
- White, F.M., 2008. *Fluid Mechanics*, 6th. ed. McGraw-Hill.