

# Hacia un cambio de paradigma en el diseño de redes hidráulicas

## *Towards a paradigm shift in water network design*

Roberto del Teso<sup>a1\*</sup>, Enrique Cabrera<sup>a2</sup>, Elena Gómez<sup>a3</sup>, Elvira Estruch<sup>a4</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua (ITA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n - Edificio 5C, 46022 Valencia, España.

E-mail: <sup>a1</sup>rodete@ita.upv.es, <sup>a2</sup>ecabrera@ita.upv.es, <sup>a3</sup>elgosel@ita.upv.es, <sup>a4</sup>maesjua1@ita.upv.es

\*Autor para correspondencia

Recibido: 16/11/2021

Aceptado: 14/01/2022

Publicado: 31/01/2022

**Citar como:** del Teso, R., Cabrera, E., Gómez, E., Estruch, E. 2022. Towards a paradigm shift in water network design. *Ingeniería del agua*, 26(1), 47-61. <https://doi.org/10.4995/la.2022.16672>

---

## RESUMEN

El transporte de agua a presión (producto del volumen por la presión) consume mucha energía y la amenaza del cambio climático exige reducirla. Ello se consigue optimizando el proceso, reduciendo el volumen a desplazar (gestionando la demanda y minimizando las fugas) y, por último, ajustando al máximo la presión con un ecotrazado. En este trabajo, se compara el tradicional diseño de redes, vigente más de un siglo y supeditado a minimizar la inversión y garantizar el suministro, con el ecotrazado cuyo objetivo es primar la eficiencia ajustando tanto como sea posible la presión a las necesidades del servicio. Un enfoque alternativo, lógico y necesario en un nuevo marco, con redes eléctricas más seguras, equipos electromecánicos más fiables y con la necesidad de reducir el gasto energético. El ecotrazado es ambientalmente más conveniente y, contabilizando todos los gastos, más económico.

**Palabras clave** | ecotrazado, agua y energía, gestión de la presión, diseño de redes, sostenibilidad ambiental.

---

## ABSTRACT

*Pressurized water transport has a highly energy consumption and must be reduced to mitigate Climate Change impacts. This energy reduction can be achieved by optimizing the process: reducing the volume of water to be transported (managing water demand and reducing water losses), and adjusting pressure with an eco-layout. This work compares the traditional water distribution design (the objective of the current method, prevailing for more than one century, is to minimize the investment and to guarantee the supply), with an eco-layout, whose objective is to prioritize efficiency, adjusting the pressure as much as possible to the service needs. This is an alternative and logic approach in a new framework: Safer electrical networks, reliable electromechanics' equipment and the imperative need to reduce energy consumption. The eco-layout is more convenient from an environmental point of view and, besides, it is more economic, if all expenses are considered.*

**Key words** | eco-layout, water and energy, pressure management, water network design, environmental sustainability.

## INTRODUCCIÓN

El suministro de agua en las ciudades, tal cual hoy lo conocemos (con redes a presión), nace en la segunda mitad del siglo XIX. Es la culminación de un dilatado recorrido en el tiempo, que se inicia con los primeros asentamientos humanos porque, es bien sabido, que el hombre, sin agua, no puede vivir. Y en ese largo discurrir ha dejado un maravilloso legado de obras hidráulicas (Cabrera y Arregui, 2010). Durante muchos siglos, la asignatura pendiente fue disponer de tuberías a presión con un diámetro suficiente para transportar el agua necesaria. Las tuberías de plomo, que soportaban más de 20 bar, eran conocidas. Notable es la utilizada en el sifón de la acrópolis de Pérgamo, segundo siglo, AC (Viollet, 2000), pero su capacidad de transporte estaba limitada por el diámetro máximo que se era capaz de construir. Por ello, hay que esperar hasta el siglo XVII para ver en servicio tuberías de fundición de una cierta relevancia, como la que en el año 1664 transportaba el agua 25 km desde Marly hasta el Palacio de Versalles (Walski, 2006), o, algo posterior, el gran sistema de tuberías del Palacio de la Granja de San Ildefonso (Guzmán, 2001). De la misma época son las pioneras conducciones de madera que, para distribuir el agua y controlar los incendios, se instalaron en 1652 por primera vez en Boston (Ormsbee, 2006).

Poco después, siglo XVIII, el uso de las tuberías de fundición comienza a generalizarse en muchas de las grandes ciudades del mundo. Con todo, el impulso final se verá, ya en la segunda mitad del siglo XIX, cuando comienzan a fabricarse en serie las piezas y elementos necesarios para unir los tubos de notable diámetro. Es entonces cuando la instalación de las redes de agua urbana se extiende a todo el mundo. Tan formidable avance atrae el interés de la ciudadanía que se organiza en Sociedades (Ruiz-Villaverde et al., 2010) para facilitar su implantación. Hasta hoy han llegado algunas de las creadas en la segunda mitad del XIX (Tarrasa, Castellón, Barcelona, Burgos, Valencia o Alicante). En particular, la más antigua, Tarrasa, es de 1841 (Fernández, 2017).

En algunas ciudades, es el caso de Madrid, el agua del nuevo abastecimiento era superficial, con un desnivel entre la captación y el punto de consumo suficiente como para disponer de una presión adecuada. Tanto, que la llegada de las aguas del río Lozoya a la fuente de San Bernardo de Madrid en 1858 se asemejó, al parecer de los asistentes, a *un río puesto de pie* (Canal de Isabel II, 2018). Pocas décadas después, 1879, Barcelona optará por las aguas subterráneas, perforando tres pozos cuyas bombas (alimentadas por máquinas de vapor) eran capaces de elevar 23000 m<sup>3</sup>/día (Salgot y Angelakis, 2012). Volúmenes de agua, muy notables en aquella época, que debían llegar hasta los ciudadanos, impulsando en el mundo la instalación de miles de kilómetros de tuberías a presión.

En este proceso de implantación de los modernos sistemas de distribución de agua a presión, cubierto ya el transporte de agua, la siguiente etapa era que el agua llegase hasta el grifo del abonado con presión suficiente para, de este modo, prestar una calidad de servicio mínima. Fue entonces cuando comenzaron a construirse en la cabecera de los sistemas depósitos, superficiales si la cota del terreno era suficiente y elevados cuando no lo era. Dos ejemplos notables de depósito elevado son el del Tibidabo, 1905 (Salgot y Angelakis, 2012) y el de Santa Engracia, 1911 (Canal de Isabel II, 2018) desde entonces integrados en el paisaje urbano de Barcelona y Madrid (Figura 1).

El proceso de implantación de estos sistemas se cerrará, con el comienzo de la cloración, en esa primera década del siglo XX. Un proceso de desinfección del agua fundamental para la consolidación de las redes de agua urbana (Minear y Amy, 1996). Porque, si bien el agua había comenzado a filtrarse ya un siglo antes (principios del XIX), aún habría que esperar la llegada de los trabajos del microbiólogo Pasteur, punto de partida de la desinfección con la cloración del agua, que erradicó la presencia de los virus patógenos que tantas muertes causaban (EPA, 2000).

De este modo, hacia la mitad del siglo XX, la mayoría de ciudades del mundo desarrollado cuentan con estos sistemas. Su tipología era siempre la misma, localizada la captación de agua, había que construir un depósito a una cota suficiente como para alimentar por gravedad todos los nudos de consumo. Debía, además, tener una capacidad suficientemente grande como para no tener que interrumpir el servicio si un corte de energía, en aquel entonces bastante frecuente, hacía acto de presencia. Lógicamente, la prioridad era garantizar el suministro. La escasa fiabilidad del sistema eléctrico de entonces, y el aún incipiente desarrollo de los hoy seguros sistemas electromecánicos (en particular variadores de velocidad y grupos electrógenos) así lo pedía.



**Figura 1** | Los emblemáticos depósitos de Santa Engracia (Madrid) en la izquierda y Tibidabo (Barcelona) en la derecha.

Este *layout* inicial ha llegado hasta nuestros días y, además, se ha replicado en la transformación del riego tradicional gravitatorio a riego por goteo (a presión) iniciada a finales del pasado siglo XX (Corominas, 2010). La primera decisión a tomar es ubicar una gran balsa de cabecera a una cota suficiente para que el agua pueda llegar por gravedad hasta los hidrantes. Cuando no sea posible, instalar una estación de bombeo para que el agua alcance los hidrantes con la presión requerida. En este segundo supuesto (no hay cota suficiente), construir la balsa en el centro de la superficie a regar para, de este modo, abaratar el coste de una red siempre ramificada y radial, importante por los grandes caudales de agua que circulan por estas redes de riego.

Las Figuras 2 y 3 detallan dos esquemas reales, urbano y agrícola, convencionales. El primero corresponde al sistema que alimentó durante muchas décadas a Valencia desde el río Turia. Este sistema básico ha estado vigente hasta que, con la entrada en funcionamiento del canal Júcar Turia, se ha modificado. Con los datos redondeados para su fácil seguimiento, se describe a continuación dicho sistema, compuesto por un depósito superficial de cabecera (cota 100 m) de notables dimensiones ( $50\,000\text{ m}^3$ ) instalado en la parte alta de la potabilizadora de la Presa. Desde la potabilizadora se bombea el agua al depósito superficial, siendo éste el origen de una tubería de aducción (10 km) que finaliza en el nudo de entrada, por el oeste de la ciudad, a la red (cota, 30 m). En horas punta (4 m/km de pérdidas), la presión en el nudo es 30 m, suficiente para abastecer una ciudad de cotas decrecientes hasta el nivel del mar (en el este de la ciudad). Por la noche (1 m/km de pérdidas en la tubería) la presión en el nudo de cabecera sube a 60 m. Y como las pérdidas en la red son menores, el exceso de presión es evidente. El sobrante de energía se disipaba con una válvula reductora de presión (VRP) que hasta hace unas décadas era accionada por un operador. La monitorización de la válvula era la audiencia de televisión. Con sólo una cadena de TV disponible, la válvula se abría, en mayor o menor medida, función de la expectación creada, para atender los picos de demanda propios de los descansos de los partidos de fútbol, o de los grandes eventos.

El despilfarro de energía que esta tipología de *layout* genera, no preocupaba entonces (unos  $2\,500\,000\text{ kWh/año}$  en la Valencia de los años sesenta). En aquellos casos donde se podía, se replicaba este esquema, tal como en Sevilla con el depósito del Carambolo, adjunto a la potabilizadora.

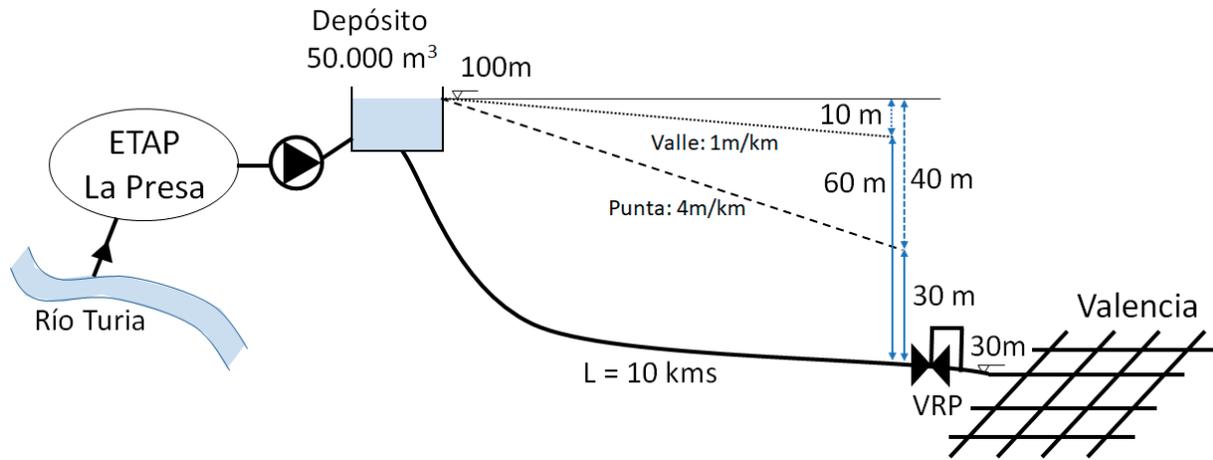


Figura 2 | Esquema del primitivo sistema de alimentación a la ciudad de Valencia.

Un siglo después, finales del XX, comienza a implantarse el riego a presión, inspirado en el esquema urbano, pero con tres notables diferencias. La primera, la red de riego se instala de una vez, mientras la urbana ha ido creciendo al compás del desarrollo de la ciudad. La segunda, los recursos económicos disponibles son muy inferiores. Y, por último, la exigencia de garantizar el suministro no es tan alta. Todo ello se traduce en la necesidad de buscar el diseño más económico de la red, lo que tiene dos consecuencias. Las redes no se mallan (menos metros de tuberías) y, a ser posible, se proyectan radiales con las balsas en el centro de la superficie a regar. Lo evidencia la Figura 3 (red de riego de Cap de Terme, Vila-real), proyectada en los primeros años de este siglo. La balsa de cabecera (la representa un depósito) está ligeramente desplazada hacia la izquierda (parte alta) por dificultades en la expropiación del terreno del centro. La balsa es el origen de todas las tuberías.

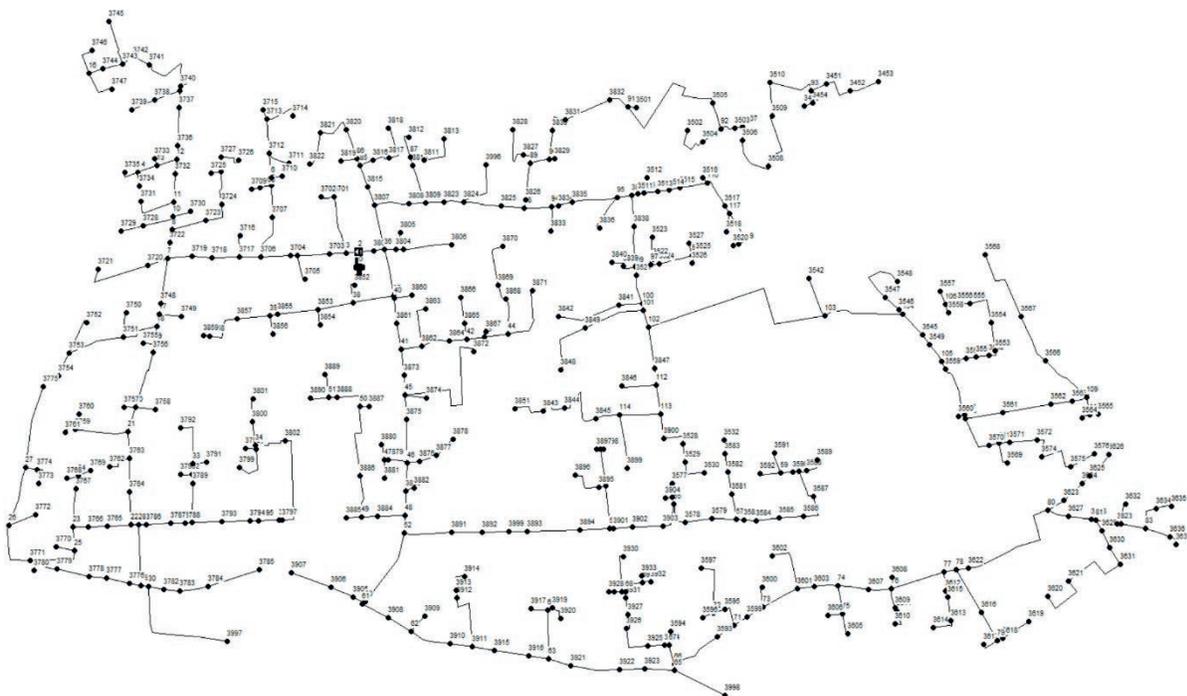


Figura 3 | Red de Cap de Terme (Sindicato de Riegos de Vila-Real), tal cual se proyectó.

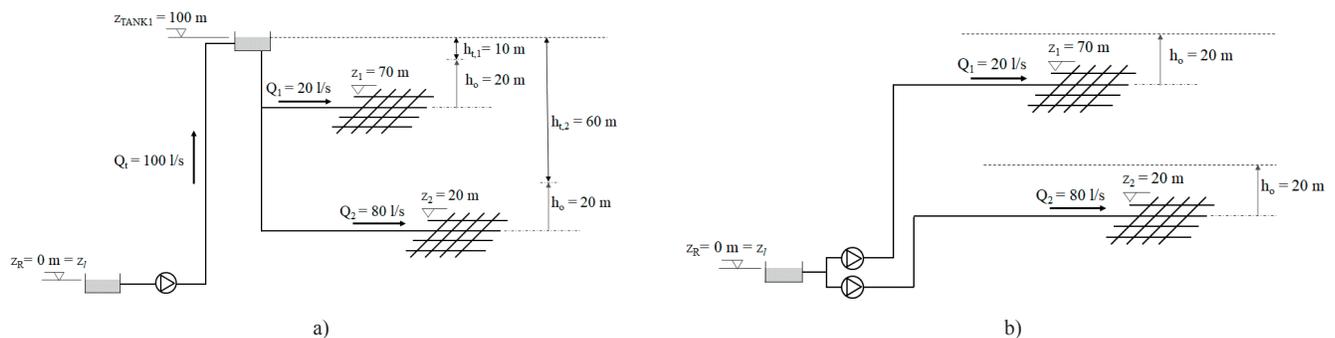
En síntesis, todos los proyectos se han basado, no importa el gasto energético que pudieran suponer, en este patrón tipo. Primaba la sencillez y la garantía de suministro, como en aquella época se entendía y, al tiempo, se buscaba minimizar la inversión inicial, un proceder que en el marco actual es inadecuado cual se evidencia en el apartado que sigue, en el que se establecen los criterios que deben presidir los nuevos diseños para, finalmente, comparar las ventajas del ecotrazado frente a al esquema tradicional. El trabajo concluye con un ejemplo real donde se ha disminuido la energía requerida por el sistema de riego del Sindicato de Riegos de Vila-real, compuesto por tres redes, siendo una de ellas la de la Figura 3.

## EL DISEÑO TRADICIONAL CON EL DEPÓSITO COMO FUENTE DE ENERGÍA

Conviene tener presente que el desarrollo de la electricidad (como energía que llega allá donde se la necesite) discurre con varias décadas de retraso con relación al de las redes de agua urbana (Morton, 2002). Porque, aunque las primeras centrales generadoras de energía eléctrica nacieron a finales del siglo XIX, y se amplía notablemente a principios del siglo XX con las primeras centrales hidroeléctricas, el problema radica en transportarla desde donde se genera hasta donde se necesita. Un transporte que no comienza a establecerse de modo solvente hasta después de la guerra civil (López-Ibor y Martínez-Val, 2014).

En consecuencia, durante la primera mitad del siglo XX la fiabilidad de la energía eléctrica era muy diferente a la actual. No siempre se podía acceder a ella y, aún peor, los cortes de energía eran relativamente frecuentes. Era lógico que se apostara por el depósito de agua como una fuente de energía alternativa mucho más fiable y segura, convirtiéndose en elementos imprescindibles en estos sistemas. Tampoco los elementos electromecánicos habían alcanzado el desarrollo actual. Los precios de grupos electrógenos y variadores de frecuencia eran elevados y su fiabilidad insuficiente. El resultado es la proliferación de instalaciones similares a la que muestra la Figura 4a.

De los dos depósitos incluidos en la Figura 4a, el primero, como fuente de almacenamiento de agua será imprescindible. Pero la misión del depósito elevado es otra, proporcionar al agua energía suficiente para que llegue por gravedad a su destino. Es una Fuente de Energía Rígida (FER) porque la energía unitaria entregada, o intensidad energética, ( $\text{kWh/m}^3$ ), es constante, depende de su altura, y no puede adaptarse a las diferentes necesidades de las dos redes (a cotas diferentes). Únicamente se pueden dar pequeños cambios de altura debidos al llenado y vaciado del depósito. Además, ese segundo depósito apenas aumenta la garantía de suministro. Tampoco conviene olvidar que, en los depósitos de grandes volúmenes, en los que el periodo de retención del agua es elevado, la calidad del agua empeora. Por ello, en el suministro urbano, atrás quedó la creencia de que cuanto mayor sea el depósito, mejor (Walski, 2000).



**Figura 4** | En la izquierda esquema energéticamente ineficiente (Figura 4a). En la derecha esquema mucho más eficiente (Figura 4b).

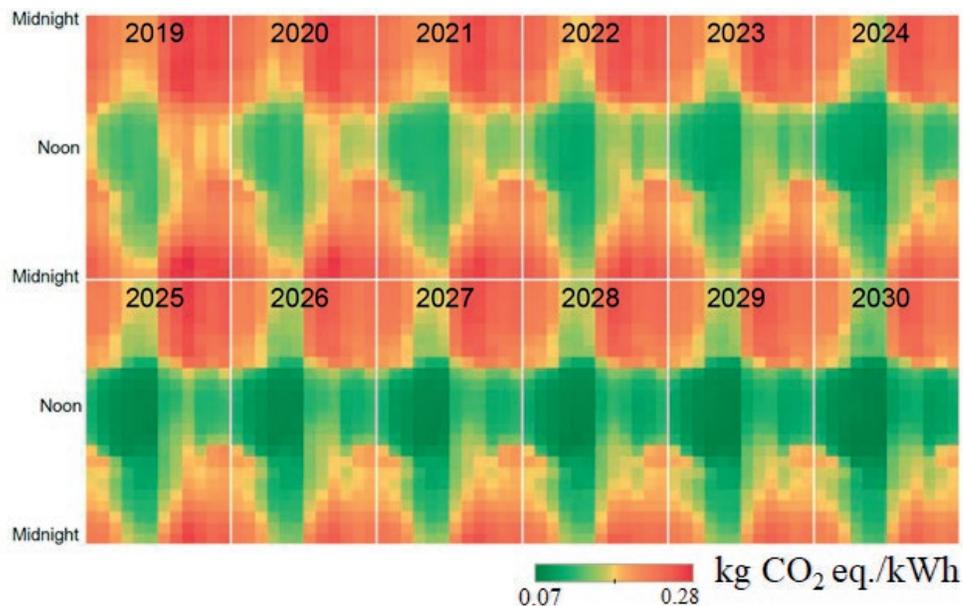
La Figura 4b es un diseño mucho más eficiente, que conserva mejor la calidad del agua. Las bombas de inyección directa a los sistemas, equipadas con variadores de velocidad, son Fuentes de Energía Variables (FEV) porque tienen la capacidad de suministrar exactamente la energía que, en función de la demanda de agua, el sistema precise. En el esquema de la Figura 4a, las presiones elevadas de la red inferior se controlan instalando Válvulas Reductoras de Presión (VRP), o instalando bombas trabajando como turbinas (PATs por sus siglas en inglés), que recuperan una parte del exceso de energía. No obstante, la mejor solución es

reformular la instalación según la Figura 4b, pues elimina en origen el exceso de energía. Ni hay que recuperarla (PATs) ni hace falta eliminarla (VRP). La jerarquía de las tres erres, típica de la gestión de residuos (reducir, reusar y reciclar), en este caso deviene en reducir (modificando el trazado), recuperar (con un PAT) y remover o eliminar (con una VRP) (Cabrera et al. 2019).

En el actual contexto de cambio climático, y con el precio de la energía desenfrenado, la eficiencia debe presidir cualquier diseño. Proyectar hoy con directrices de hace cien años, en un contexto económico y ambiental completamente distinto, no tiene sentido. El formidable desarrollo tecnológico habido, garantiza las soluciones electromecánicas alternativas a los depósitos con una fiabilidad hace unas décadas impensable. Los cortes de energía son infrecuentes y, si se dan, los grupos electrógenos, siempre que se mantengan adecuadamente, son muy fiables. Sus cortos tiempos de respuesta garantizan la continuidad del servicio. De otra parte, las FEV (con un coste muy inferior al de hace unas décadas) permiten inyectar en el sistema la energía estrictamente necesaria garantizando, en definitiva, la eficiencia.

Los grandes depósitos de agua han vivido a lo largo del siglo XX su época dorada. Pero hoy ya apenas se construyen, y los existentes, numerosos en redes urbanas con desniveles notables, se están apartando del servicio. Un ejemplo es la red de agua de Jávea. Con independencia de los depósitos de cabecera, incluía once depósitos interiores en la red, ligados a sus distintos sectores. De ellos, cinco se han eliminado y se está modificando la red para su total eliminación. Ello ha permitido rebajar la intensidad energética a la mitad (desde 1.1 kWh/m<sup>3</sup> hasta 0.54 kWh/m<sup>3</sup>).

También la evolución de la intensidad de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) aconseja eliminar los depósitos, porque una de las razones que favoreció su construcción, el bombeo nocturno en horas valle cuando el precio de la energía es más económico, va a cambiar en los próximos años debido a la irrupción de la energía solar fotovoltaica y del autoconsumo. Como su generación coincide con las horas de mayor demanda, los patrones horarios del precio de la energía se están modificando. Y todo parece indicar que en el futuro esta inversión se consolidará. Así lo evidencia la Figura 5 (Brook, 2018) que anticipa la evolución de la intensidad de la emisión de GEI en California en los próximos años.



**Figura 5** | Intensidad de las emisiones eléctricas (2019 – 2030) en California (Brook, 2018).

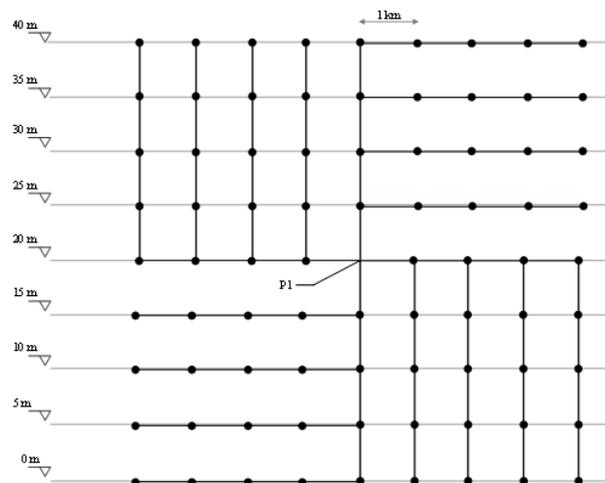
En trabajos previos (Gómez et al., 2015; Gómez et al., 2021), se han comparado desde la óptica energética las dos fuentes de suministro, FER y FEV, incluyendo precios actualizados de la energía y con un análisis de ciclo de vida en el segundo de los trabajos. En ambos casos, tanto desde la óptica económica como ambiental, resulta más favorable la FEV que la FER.

Optimizar el gasto energético exige extender el análisis al sistema, sin limitarse exclusivamente a la fuente de energía, sobre todo en terrenos de topografía irregular. Para ello, debe introducirse el concepto de ecotrazado, un asunto ya explorado previamente (Cabrera et al., 2019), aunque no con el nivel de detalle que sigue. Más adelante se expone un ejemplo real que evidencia, no sólo las grandes ventajas energéticas del ecotrazado, sino también las operativas. Al trabajar la red con la menor presión posible, las fugas disminuyen y la vida útil de las tuberías se alarga.

## CONCEPTO DE ECOTRAZADO

Un reciente informe del Tribunal de Cuentas Europeo (TCE, 2020) define el diseño ecológico como el que integra los aspectos medioambientales en el diseño del producto, a fin de mejorar el rendimiento medioambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida, concepto relacionado estrechamente con la eficiencia energética. Y, aunque la actual normativa liga el concepto a una serie de productos consumidores de energía (desde los frigoríficos a las bombas de agua), de momento, no lo ha extendido a procesos, como el transporte de agua a presión por su superior complejidad. Éste está integrado por diferentes elementos (bombas, válvulas y, sobre todo, tuberías) y depende de múltiples factores (como la topografía del terreno), lo que dificulta establecer objetivos concretos de eficiencia energética.

Sin embargo, desde un punto de vista conceptual, se puede asimilar el concepto de ecotrazado al que mejora el rendimiento medioambiental de un proceso a lo largo de su ciclo de vida. Y para decidir cuál de los trazados de una red de agua a presión merece el calificativo de ecotrazado, parece lógico evaluar el consumo energético de cada uno. En cualquier caso, y con independencia del análisis que sigue, es obvio que merecerá dicho calificativo el trazado en el que la presión suministrada se ajuste más a las estrictas necesidades. Además, con los actuales precios de la energía, es muy probable que el ecotrazado también sea económicamente el más favorable. En lo que sigue, se presenta un ejemplo (Figura 6) inspirado en la red radial, simplificada, de Cap de Terme (Figura 3).



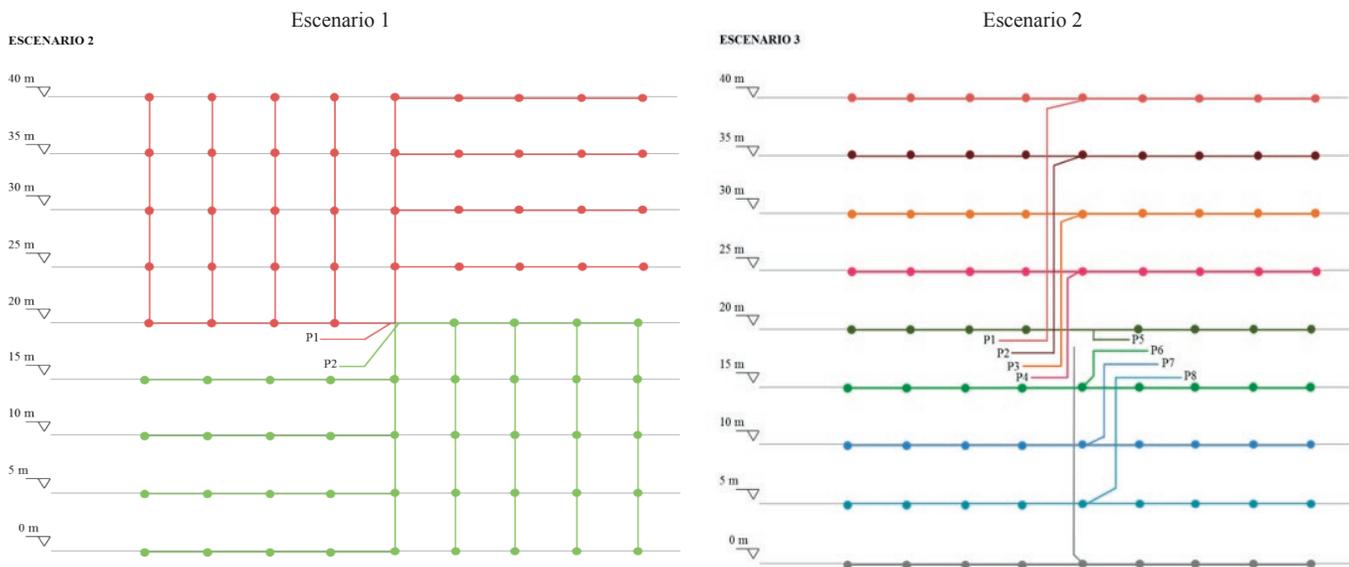
**Figura 6** | Sistema inicial. Red sintética de análisis concebida a partir de la red de la Figura 3, Cap de Terme.

Esta red (Figura 6), es una red radial sintética. Para simplificar los cálculos se define de la siguiente manera: idéntica separación entre hidrantes (forman cuadrículas de 1 km), la misma diferencia de cotas entre filas horizontales (5 m) y una presión de servicio de 20 m en todos los hidrantes. En este sistema inicial, la fuente de energía está en el centro del área a regar, el suministro energético se hace con una inyección directa con 4 bombas en paralelo que aspiran de la balsa anexa a la estación de bombeo. La cota de aspiración (20 m), corresponde a la fila en la que está la estación de bombeo.

Existen 9 escalones (filas) con 9 hidrantes cada uno, menos la fila media que, al albergar la estación de bombeo, tiene 8. En total, 80 nudos de consumo, con una demanda unitaria de 40 L/s por hidrante, repartida en cuatro turnos de dos horas (riego

programado), por lo que habrá que inyectar un total de 800 L/s por turno. El caudal es constante en el tiempo, trasegando cada bomba 200 L/s. Supuesto el sistema ideal sin pérdidas, la altura de bombeo es de 40 m (el desnivel geométrico entre la aspiración y el nudo más alto es de 20 m, más la presión requerida de 20 m). El tiempo de riego es de 1000 h/año. En estas condiciones, la potencia requerida es de 313.9 kW y el consumo energético 313 920 kWh/año. Con unos precios energéticos similares a los vigentes (0.08 €/kW, el término de potencia y 0.20 €/kWh el de energía), el coste energético anual es de 71 950 €/año.

Se plantean dos mejoras en el *layout* del sistema inicial. La primera trata de desacoplar la parte alta y baja, con dos bombas alimentando cada zona (escenario 1, Figura 7a). En este primer escenario, la potencia desciende de los 313.9 kW del sistema inicial a 235.44 kW, y la energía pasa de ser 313 920 kWh/año a 235 440 kWh/año, siendo el coste energético de 53 960 €/año frente a los 71 950 €/año del escenario inicial. La segunda mejora, un tanto más sofisticada, desacopla el sistema con ocho bombas distintas, una alimentando cada fila y la fila más baja alimentada por gravedad, pues en ausencia de pérdidas esta fila no precisa bombeo (escenario 2, Figura 7b). En este segundo escenario, se suministra la energía estrictamente necesaria y, por ello, puede calificarse de ecotrazado. En este caso, la potencia final es de 156.96 kW, y la energía consumida anual de 156 960 kWh/año, siendo el coste energético 35 975 €/año.



**Figura 7** | En la izquierda, escenario 1, con dos bombeos (Figura 7a). En la derecha, escenario 2, un bombeo por fila, ecotrazado (Figura 7b).

Procede identificar la solución más económica desde la óptica energética y de diseño, evaluando los costes de inversión en tuberías y bombeos y el coste energético. Una valoración económica que se hace asignando 15 años de vida útil a las bombas y 50 años a las tuberías de PVC, con una PN de 12.5 bar. Los diámetros, los correspondientes a una misma velocidad (1 m/s). Los precios unitarios de las bombas (incluidos motores) son los proporcionados por un fabricante y los de las tuberías son los que incluye en sus proyectos una ingeniería especializada en riego (incluyen el montaje). La Tabla 1 resume el análisis, siendo el escenario 2, con las ocho bombas, el más económico:

**Tabla 1** | Análisis económico de los tres escenarios considerados.

	Inversión tuberías (€/año)	Inversión bombeo (€/año)	Inversión total (€/año)	Coste energético (€/año)	Coste total (€/año)
Sistema inicial	65.182	19.023	84.205	71.950	156.155
Escenario 1	65.182	18.313	83.495	53.963	137.458
Escenario 2	70.276	16.908	87.184	35.975	123.159

Se ha simplificado este ejemplo para mayor claridad, pero nada indica que en un caso real el orden se invierta. Las ineficiencias en los bombeos penalizarían los mayores consumos energéticos asociados a los diseños tradicionales, mientras que las pérdidas por fricción, beneficiarían a los trazados con menor longitud de tuberías, pero su peso generalmente es menor. Por tanto, en un caso real el ecotrazado sigue siendo más eficiente. De otra parte, contemplando un coste de energía al alza, más un coste ambiental del CO<sub>2</sub> hoy casi siempre ignorado, aumentará más deprisa la factura energética, por lo que, en definitiva, la ventaja del ecotrazado será mayor. Pero no conviene dogmatizar afirmando que un ecotrazado siempre es la solución más económica. Hay que analizar cada caso, si bien en todos los casos reales estudiados (Gómez et al, 2015 y Gómez et al, 2021) siempre ha resultado la solución más económica la energéticamente más eficiente.

## EL CASO DE LA RED DE RIEGO DE VILA-REAL

En lo que sigue se resume la red de riego de Vila-real, tal como se proyectó inicialmente, y con el ecotrazado propuesto, el cual reduce un 90% el gasto energético inicial. Entre esos extremos, hay un estado intermedio (el actual) que incluye algunos cambios introducidos hace unos años y que permitieron rebajar el gasto energético casi un 50%. La Figura 8 muestra la superficie a regar con agua del río Mijares que gestiona el Sindicato de Riegos de Vila-real.

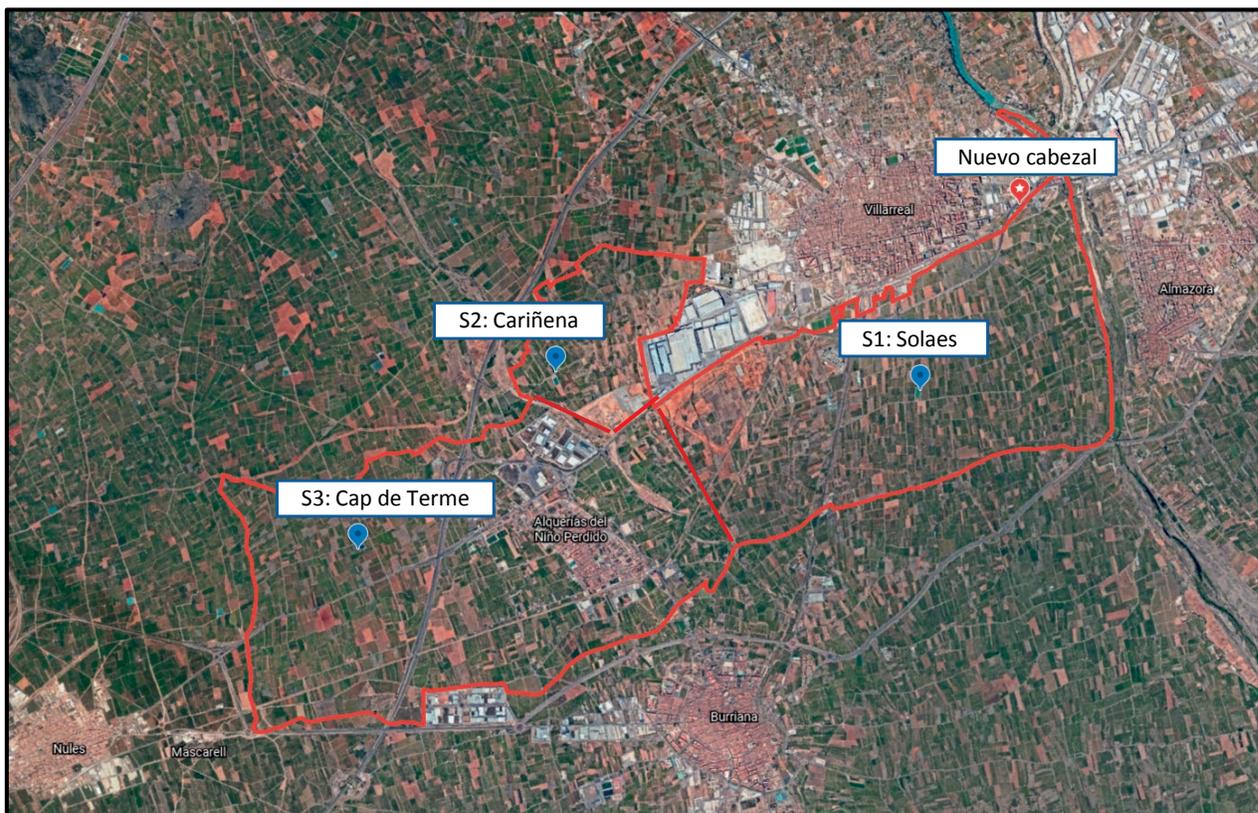
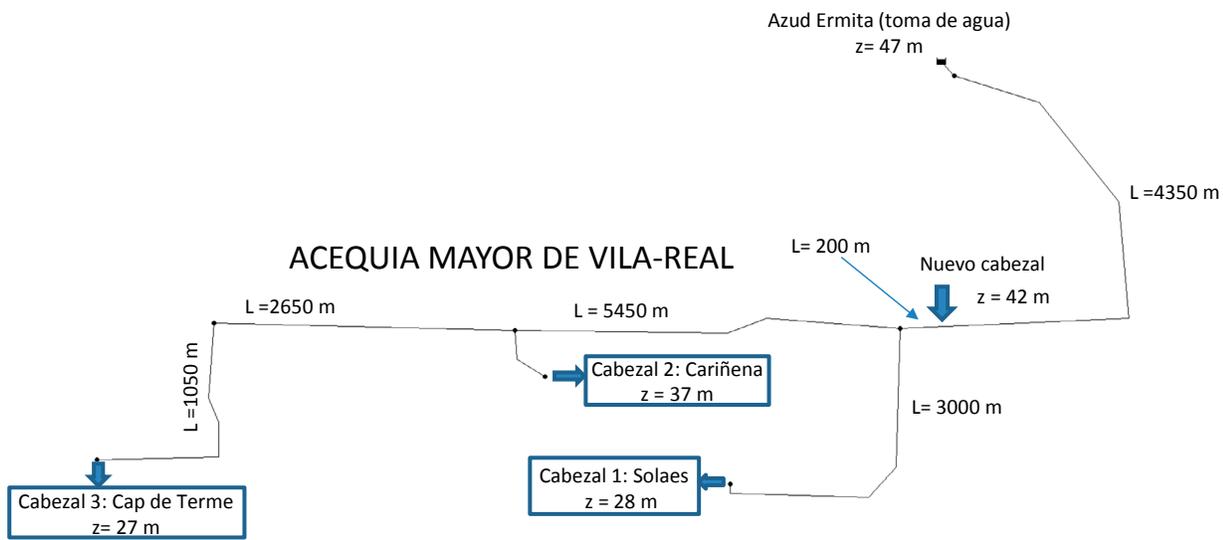


Figura 8 | Superficie de riego gestionada por el Sindicato de Riegos de Villarreal.

El perímetro rojo que la delimita, incluye 20000 hanegadas (unas 1700 ha). Linda con Vila-real (noreste), Burriana (sur) y Nules (suroeste). En su interior está el pequeño núcleo de Alquerías del Niño Perdido. El tradicional riego por gravedad se realizaba a partir de la acequia mayor, que nace en el Azud de Villarreal y que, discurriendo por el centro de Vila-real (paralela a la línea roja del contorno), prácticamente llega a Nules. El proyecto de transformación del riego dividió esa superficie en tres sectores, Solaes, Cariñena y Cap de Terme, siendo este último el estudiado de manera sintética previamente. Esta zona de riego cuenta con otros tantos cabezales, ubicados en la medida de lo posible en el centro de los mismos (Figura 8). La presencia de carreteras, autopistas,

vías de tren, urbanizaciones industriales y, finalmente, las dificultades de expropiar algunos terrenos, influyeron en la decisión final. Uno de ellos, Cariñena, es mucho menor que los otros dos.

Estos diseños, ya se ha dicho, primaban minimizar la inversión mientras ignoraban el gasto energético. Y así, el planteamiento que se hizo fue construir unas grandes balsas de agua en cada cabezal, derivar el agua desde la acequia mayor a esas balsas utilizando canales existentes, e instalar una estación de bombeo en cada cabezal, origen de las redes radiales de distribución que los configuran. La Figura 9 muestra ese esquema.



**Figura 9** | Funcionamiento del sistema básico inicial (esquema no escalado).

Desde la óptica energética, la concepción de este planteamiento tiene tres grandes debilidades. Son:

- La pérdida de energía gravitatoria hasta llegar a las tres balsas. Por ejemplo, en el caso del cabezal 1 de Solaes, la diferencia de cotas entre la toma y la balsa es de 19 m. Es cierto que hay unos 7.5 km entre ambos puntos, pero una conducción a presión con una pérdida de carga de 1 m/km, permitiría conservar 11.5 m, una energía respetable.
- Si se parte de la base de aprovechar las acequias existentes, se podría haber optado por situar las estaciones de bombeo en la cota más alta de cada sector. La Figura 10, sector de Cap de Terme, muestra como la diferencia de cotas entre el nudo más alto de la red (35.5 m) y el cabezal (27 m) supone una pérdida energética de 8.5 m, es decir, el agua pierde una cota que después se debe recuperar bombeando. Puesto que la acequia mayor discurre paralela al límite superior del sector, la ubicación del cabezal tendría que haberse decidido conservando la máxima cota. La obsesión por las redes radiales para minimizar su longitud, está detrás de esta decisión.
- La tercera debilidad es, sin duda, la peor: bombear simultáneamente cada sector con independencia de las cotas de los consumos. Y lo es porque esta decisión aumenta el gasto energético sin comportar un ahorro en la inversión. Como hay diferencias entre los hidrantes extremos de unos 20 m en cada sector (Figura 10), la parte baja soporta un exceso de 2 bar de presión. Ello, además de perder energía, comporta mayores presiones en la parte inferior. Bastaba con adoptar un esquema como el mostrado en la Figura 7a o intermedio entre 7a y 7b.

A estas debilidades conceptuales, con impactos diferentes según el sector, hay que sumar otras que denotan escasa sensibilidad por la eficiencia energética. Entre ellas conviene destacar la calderería de los bombeos: Uniones en ángulo recto, colectores mal diseñados, filtros ineficientes, generaban pérdidas locales superiores a los 10 m. A todos estos inconvenientes estructurales, aún había que sumar las derivadas (más adelante se verá) de una operación poco eficiente. Todo lastraba la eficiencia de los sectores, de modo que la potencia total inicialmente contratada fue casi 1200 kW.

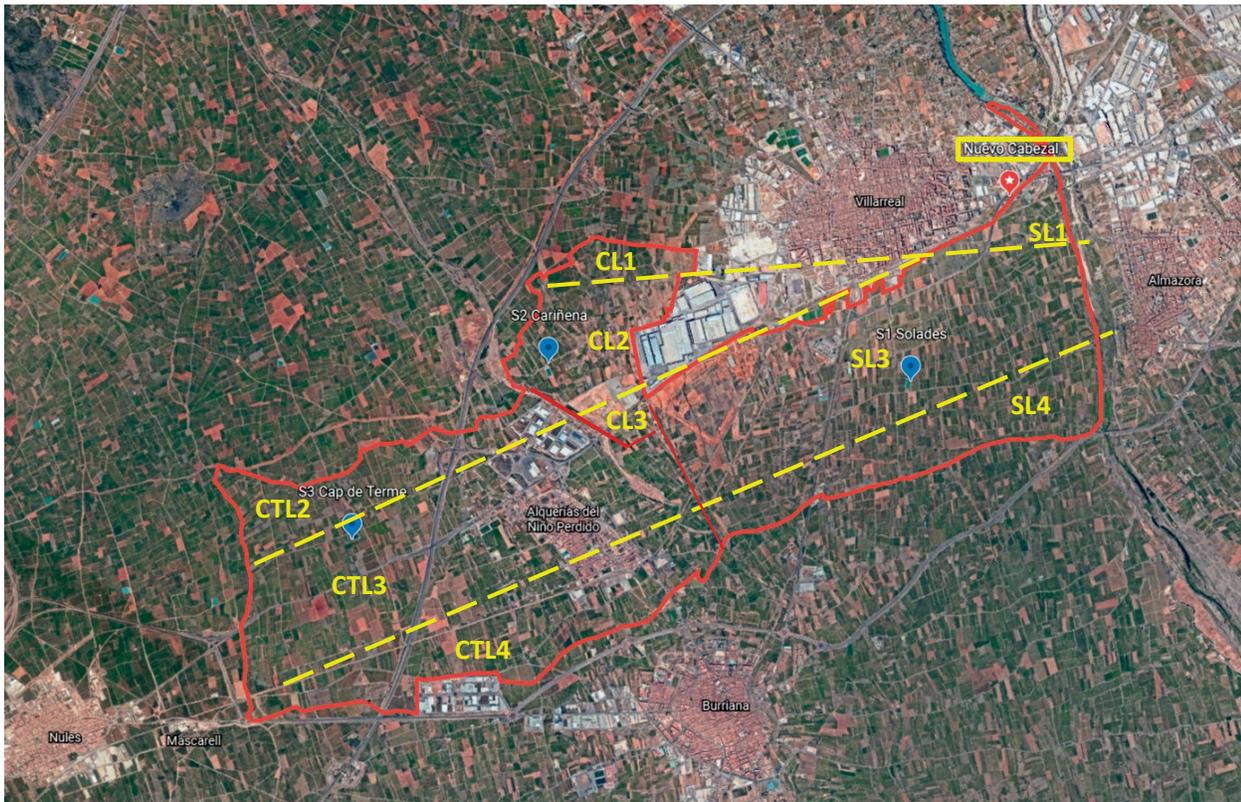
El objetivo del ecotrazado es entregar en cada nudo de consumo el volumen requerido a la presión mínima establecida, en este caso definida por las necesidades de los goteros. Cualquier exceso de presión es energía perdida. Pero este es un objetivo inalcanzable, pues sólo redes ideales (sin fricción) y planas (todos los nudos de consumo a la misma cota) lo pueden lograr, como sucede en las nueve filas de la Figura 7b. En la práctica, hay que tratar de acercarse al máximo a este objetivo y es lo que persigue el ecotrazado. Para evitar excesos de presión es conveniente alimentar, desde una misma línea, nudos con poca diferencia entre sus cotas. Para ello, se agrupan en la medida de lo posible los nudos de consumo siguiendo las curvas del nivel del terreno.



**Figura 10** | Características del bombeo único para todo el sector de Cap de Terme.

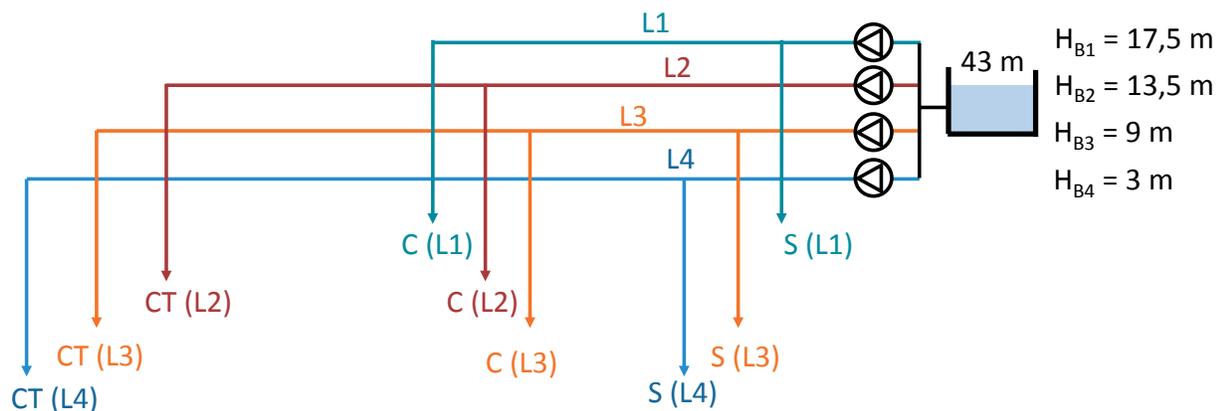
Durante el análisis de la red de riego de Vila-real, se tantearon hasta cinco niveles de cotas diferentes. A más niveles, menor diferencia de cotas en un mismo nivel, pero claro, hay que disponer tantas líneas de alimentación como niveles definidos. Hay que buscar una solución de compromiso, en este caso, se adoptan cuatro niveles de cotas (Figura 11). El primer nivel contempla un rango de cotas entre 32.21 m y 42.50 m, incluye el sector de Solaes (SL1) y Cariñena (CL1); el segundo nivel incluye el sector de Cap de Terme (CTL2) y Cariñena (CL2) con cotas comprendidas entre 29.13 m y 36 m. El tercer nivel engloba los tres sectores, Cap de Terme (CTL3), Cariñena (CL3) y Solaes (SL3), con cota mínima de 21.14 m y cota máxima de 33.55 m. Por último, el cuarto nivel acoge el sector de Cap de Terme (CTL4) y Solaes (SL4), con cotas extremas de 14.39 m y 26.08 m.

Como la diferencia de cotas entre nudos extremos es, en todos los cabezales, de unos 20 m (ver el caso de Cap de Terme, Figura 10), al establecer 4 niveles de cotas, la diferencia de cotas entre nudos extremos debiera ser de unos 5 m. Ello, sin embargo, no es así porque las tres redes radiales se tendieron sin pensar en las cotas de los nudos, lo que ha condicionado notablemente el nuevo trazado. De hecho, tal cual han quedado, las horquillas de cotas de los distintos niveles duplican el valor ideal de 5 m, estableciéndose horquillas entre 7 y 12 m.



**Figura 11** | Organización de los nodos de consumo en cuatro niveles diferentes a partir de sus cotas. (S, Solaes; C, Cariñena y CT Cap de Terme).

Con esta nueva concepción del sistema, habrá una única estación de bombeo, ubicada unos 200 m antes de la derivación actual de la acequia al cabezal de Solaes (Figuras 8 y 11). Del nuevo cabezal partirán cada una de las líneas de alimentación de los cuatro niveles establecidos (Figura 12).

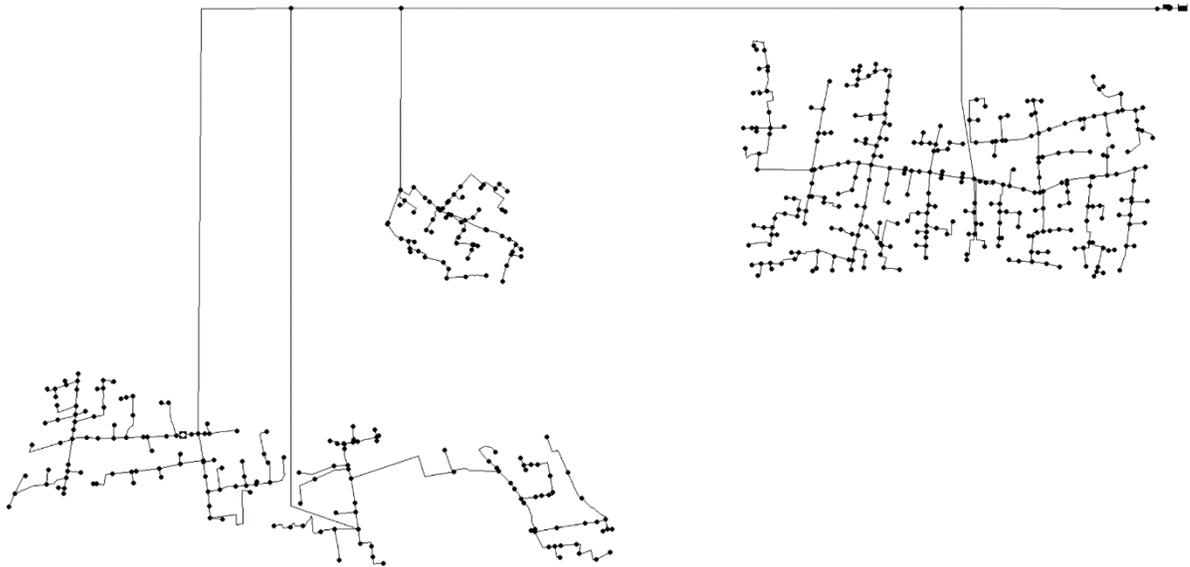


**Figura 12** | Las líneas madre (L1, L2, L3 y L4) del nuevo ecotrazado con las alturas de bombeo requeridas y con las derivaciones a los tres cabezales (S, Solaes; C, Cariñena y CT Cap de Terme).

El nuevo diseño aprovecha al máximo la energía gravitatoria y, al tiempo, procura entregar en cada hidrante la energía estrictamente necesaria, agrupando los hidrantes de semejante cota siguiendo las curvas de nivel, hasta donde lo permiten las redes

ya existentes. El resultado final es notable, los 1200 kW de potencia iniciales quedan en 100 kW tras la remodelación, si bien conviene indicar que este valor se ha alcanzado rebajando la presión de los goteros de los 20 m actuales a los 10 m futuros, algo totalmente factible (Regaber, 2019). Porque no es lógico apostar por un ecotrazado y no ajustar al máximo la presión de servicio, en este caso de los goteros. De no hacerlo, la potencia final sería 180 kW.

El nuevo riego queda, pues, estructurado por niveles. Las cuatro líneas parten del nuevo cabezal y van alimentando parcelas ubicadas dentro del rango de niveles correspondiente. La Figura 13 detalla el modelo de la línea L3, la única que atiende hidrantes de los tres cabezales. Se puede observar que la tercera derivación (Cap de Terme) requiere dos líneas independientes porque la autopista A7 impide conectar fácilmente esos dos sectores. Al ejecutar la obra se valorará si es más económica la solución que incluye la Figura 13 o instalar, con una microtuneladora, una nueva tubería por debajo de la autopista.



**Figura 13** | Modelo de la línea L3, con sus derivaciones a sectores de los primitivos cabezales.

La Tabla 2 resume la potencia del estado inicial y final con el eco-trazado, e incluye, además, el estado intermedio que se alcanzó con un conjunto de medidas menores de entre las que destacan la reordenación de los turnos de riego y la modificación de la calderería de los tres cabezales (para reducir las elevadas pérdidas locales). Es importante construir los modelos matemáticos de las redes para programar con rigor una mejora de la operación. En este caso, los modelos permitieron reordenar los cuatro turnos del riego para que el caudal fuese constante. Se reordenó en los cabezales de Solaes y Cap de Terme, pues en Cariñena no era posible.

**Tabla 2** | Potencia para los tres escenarios de la red de riego de Vila-Real.

	Solaes	Cariñena	Cap de Terme	Total
Escenario 1: Inicial	493 kW	67 kW	617 kW	1.177 kW
Escenario 2: Intermedio	270 kW	55 kW	380 kW	705 kW
Escenario 3: Eco-trazado	L1+L2+L3+L4 (cabeza único)			98.6 kW

Parece conveniente concluir con algunas reflexiones de interés.

- El haber heredado las redes existentes, diseñadas ajenas a la topografía del terreno, ha impedido rebajar más la potencia requerida. La horquilla máxima de presión en el sistema inicial era de 32.5 m, y se ha reducido un 60% (13.1 m) cuando con redes de nuevo trazado podría ser de unos 5m, con una potencia final total de unos 30 kW.

- b. El escenario final, con la propuesta de ecotrazado, reduce el número de cabezales, y por tanto se disminuye el gasto en terrenos, centros de transformación, estaciones de bombeo y balsas, además de la notable reducción energética. En contra, hay que tener en cuenta el gasto ocasionado por el desdoblamiento de las tuberías principales, ya que el de las redes de distribución es el mismo. El estudio económico a realizar debe abordarse desde la fase inicial de diseño del sistema, comparando el coste del diseño actual que se realizó, con el coste del diseño mediante el ecotrazado planteado. De esta manera, el ecotrazado no se vería influenciado por un diseño previo.
- c. Todo el abastecimiento se concentra en un cabezal, siendo así la operación del sistema mucho más eficiente. Además, el nuevo cabezal utilizará la acequia mayor como depósito, esto permite ganar 1.5 m de cota y almacenar 3000 m<sup>3</sup>.
- d. El riego programado que se lleva a cabo, permite mantener constante el caudal en cualquier turno. Si el riego fuese a la demanda, más ineficiente que el programado, la curva de consigna sería fundamental para optimizar el funcionamiento del sistema.
- e. En la actualidad se riega en cuatro turnos de dos horas (las ocho horas valle). Pero con la nueva potencia necesaria, toda concentrada en un cabezal, la estación de bombeo se puede alimentar con energía solar, y alargar el periodo de riego, considerando, por ejemplo, seis turnos de dos horas en periodo diurno.

---

## CONCLUSIONES

El trazado tradicional de las redes de agua, basados en un depósito de cabecera ubicado a una cota lo suficientemente elevada para poder abastecer por gravedad el resto del sistema, debe ser sustituido por inyecciones directas (fuentes de energía variables), siendo la alternativa a los depósitos, fuentes de energía rígida. De otra parte, al concretar el trazado de las redes, el objetivo principal debe ser minimizar el gasto energético y no, como hasta ahora, la inversión o una garantía de suministro basada en, ante un fallo eléctrico, no interrumpir el servicio. La fiabilidad del actual equipamiento electromecánico ofrece tantas garantías como el depósito tradicional. El ecotrazado, minimizando la presión en origen, no sólo es más conveniente desde la óptica ambiental. También reduce las fugas y alarga la vida media de las tuberías, sin necesidad de recurrir a PATs o VRPs, soluciones razonables, pero menos convenientes que reducir los excesos de presión desde la fase de diseño.

---

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece sinceramente el apoyo prestado por el Sindicato de Riegos de Vila-real, representado por su secretario Manuel Rubert. Sin su colaboración, este estudio no habría sido posible. Mención especial merece el técnico del Sindicato, Sergio Usó, gran conocedor del sistema. Sus sugerencias y observaciones permitieron en su día rebajar el gasto energético a la mitad, y sus más recientes aportaciones han resultado fundamentales para concretar el ecotrazado descrito en este artículo.

---

## REFERENCIAS

- Brook, M. 2018. Building Decarbonization. *IEPR Workshop on Achieving Zero Emission Buildings*. California Energy Commission, Sacramento, California.
- Cabrera, E., Arregui, F. 2010. *Water Engineering and Management through Time: Learning from History*. CRC Press, Balkema.
- Cabrera, E., Gómez, E., Soriano, J., del Teso, R. 2019. Eco-layouts in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(1), 04018088. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001024)
- Canal de Isabel II. 2018. *El agua en Madrid. Un recorrido con historia*. Subdirección de Comunicación Área de Imagen y Publicaciones. Especial Historia del Canal, Madrid, España.

- 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>
- EPA (Environmental Protection Agency). 2000. *The History of Drinking Water Treatment*. US EPA, Office of Water, USA.
- Fernández, A. 2017. *Mina, Aigües de Terrassa (1842-2017). Una crónica de 175 anys*. Mina Pública de Terrassa, Aigües de Terrassa, Terrassa, España.
- Gómez, E., Cabrera, E., Balaguer, M., Soriano, J. 2015. Direct and indirect water supply: an energy assessment. *Procedia Engineering Procedia Engineering*, 119, 1088-1097.
- Gómez, E., Briones-Hidrovo, A., del Teso, R., Uche, F.J., Cabrera, E. 2021. Rigid versus Variable Energy Sources in Water Pressurized Systems: An Economic and Environmental Analysis. *Water Resources Management*, 35, 3203–3220. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02885-5>
- Guzmán, C.L. 2001. Estudio sobre la recirculación del agua de las fuentes del Palacio de La Granja de San Ildefonso (Segovia). *Ingeniería Civil*, 122, 61-71.
- López-Ibor, V., Martínez-Val, J.M. 2014. *50 años de tecnología y política industrial. La electricidad en España*. Economía industrial, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, España.
- Minear, R.A., Amy, G.L. 1996. *Water Disinfection and Natural Organic Matter: History and Overview*. ACS Symposium Series, American Chemical Society, Washington, DC. <https://doi.org/10.1021/bk-1996-0649>
- Morton Jr., D.L. 2002. Reviewing the history of electric power and electrification. *Endeavour*, 26(2), 60-63. [https://doi.org/10.1016/S0160-9327\(02\)01422-9](https://doi.org/10.1016/S0160-9327(02)01422-9)
- Ormsbee, L.E. 2006. The History of Water Distribution Network Analysis: The Computer Age. *Proceedings of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*, Cincinnati.
- Regaber. 2019. *Dripnet PC. Gotero autocompensante*. Regaber mathoholding group, Barcelona, España.
- Ruiz-Villaverde, A., García-Rubio, M. A., González-Gómez, F. 2010. Analysis of Urban Water Management in Historical Perspective: Evidence for the Spanish Case. *International Journal of Water Resources Development*, 26(4), 653-674. <https://doi.org/10.1080/07900627.2010.519497>
- Salgot, M., Angelakis, A.N. 2012. The historical development of water supply technologies in Barcelona, Spain. In: *Evolution of Water Supply Through the Millennia*. (Angelakis, A.N., Mays, L.W., Koutsoyiannis D., Mamassis, N., ed) IWA Publishing, London, UK. <https://doi.org/10.2166/9781780401041>
- TCE (Tribunal de Cuentas Europeo). 2020. *Medidas de la UE en el diseño ecológico y el etiquetado energético: una contribución importante al aumento de la eficiencia energética frenada por retrasos significativos y el incumplimiento de las normas*. Tribunal de Cuentas Europeo, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxemburgo.
- Viollet, P.L. 2000. *Water Engineering in Ancient Civilizations 5000 Years of History*. IAHR (International Association of Hydraulic Engineering and Research) monograph series, CRC Press, USA.
- Walski, T. 2000. Hydraulic design of water distribution storage tanks. In: *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill, New York, 10.1-10.20.
- Walski, T. 2006. A history of water distribution. *Journal AWWA*, 111-121. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2006.tb07611.x>