

# Cátedra ACAL\_CIUADAD SOSTENIBLE

Optimización del uso conjunto  
del agua y de la energía en la  
ciudad de Alcoi



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ACAL

Abogados  
y Consultores  
de Administración Local



Ajuntament d'Alcoi

# Cátedra ACAL\_CIUDAD SOSTENIBLE

Optimización del uso conjunto  
del agua y de la energía en la  
ciudad de Alcoi



## PRÓLOGO

*Hay que repensar la forma en que se están gestionando las ciudades. Después de 40 años de desarrollo, hemos acabado con ciudades poco sostenibles y muy caras de mantener, con problemas muy serios para costear las infraestructuras de las que disponen. Se ha evolucionado desde el modelo clásico de ciudad, con un urbanismo estructural, a otro funcional y desestructurado. Esto acarrea problemas de movilidad, altos costes energéticos, despilfarro territorial y ambiental. Todo esto no es sostenible.*

*En el trabajo que desde ACAL realizamos día a día con responsables técnicos y políticos de la gestión municipal, venimos apreciando, cada vez con mayor intensidad, los problemas que se generan en torno a las infraestructuras, las instalaciones y los servicios públicos: su diseño, la organización de los mismos y los costes asociados, las tecnologías empleadas y su sostenibilidad. Nuestro trabajo con estos problemas es desde el terreno jurídico y económico, unas veces instrumentando su contratación y otras veces en el terreno de los conflictos que se plantean con las empresas que prestan estos servicios. Sin embargo, para poder mejorar en este campo es preciso dar un mayor peso a los aspectos técnicos y a la ingeniería.*

*En ACAL estamos sensibilizados con la problemática expuesta y es por ello que hemos creado un espacio de intercambio de experiencias y soluciones con las que se pueda mejorar la gestión de nuestras ciudades, mejorando la eficacia de los recursos destinados y la eficiencia de los métodos de trabajo. Para ello, ACAL y la Universidad Politécnica de Valencia han puesto en marcha la cátedra “ACAL – Ciudad Sostenible”, un ámbito de colaboración entre las dos entidades donde confluyen nuestra experiencia en la administración y la solvencia y el potencial tecnológico de la UPV.*

*Con esta serie de monografías publicadas por la cátedra ACAL – Ciudad Sostenible, se ha querido documentar diferentes experiencias o investigaciones, llevadas a cabo en el ámbito de la cátedra, de las que se pueden extraer metodologías de trabajo aplicables en distintos ámbitos de la gestión de la ciudad y que pueden ser de utilidad para los responsables municipales encargados de los mismos.*

Jesús García Navarro

Director, ACAL.



# MONOGRAFÍAS

## Cátedra ACAL\_CIUDDAD SOSTENIBLE

### DESCRIPCIÓN Y OBJETO DE LA CÁTEDRA

La Cátedra ACAL\_CIUDDAD SOSTENIBLE es el resultado de la firma de un convenio de colaboración entre la Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA) y la empresa Abogados y Consultores de Administración Local (ACAL). El proyecto nace con el objetivo de poner a disposición de los ayuntamientos los conocimientos y las soluciones de las que dispone la Universitat Politècnica de València, con el fin de poder revisar con una perspectiva técnica, organizativa y económica, la gestión de los servicios municipales.

Los ámbitos principales de actividad de la Catedra ACAL\_CIUDDAD SOSTENIBLE se articulan en cuatro ejes: actividades de formación, de investigación, actividades de difusión y transferencia de conocimiento y actividades de apoyo en servicios de consultoría. Sus actuaciones se refieren a los distintos ámbitos que inciden en la sostenibilidad de las ciudades como son: agua, residuos, energía, transportes, medio ambiente u otros.

Dentro de las actividades de difusión se ha considerado conveniente el abordar la publicación de los resúmenes de aquellas acciones de investigación o apoyo a la consultoría en las que ha colaborado la cátedra ACAL para cumplir mejor el objetivo fundamental de la cátedra ACAL poner a disposición de los ayuntamientos conocimientos y soluciones que contribuyan a una mejor gestión de los servicios municipales.

### AUTORES DE LA MONOGRAFÍA

#### OPTIMIZACIÓN DEL USO CONJUNTO DEL AGUA Y DE LA ENERGÍA EN LA CIUDAD DE ALCOI

##### Autora

Elena Gómez Sellés

##### Director del Estudio

Enrique Cabrera Marcet

Catedrático de Mecánica de Fluidos de la Universitat Politècnica de València



## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| Introducción .....   | 1  |
| Motivación y objetivos del proyecto.....   | 1  |
| Energía – Agua – Cambio climático .....  | 2  |
| Objetivo del estudio .....   | 4  |
| Breve resumen del trabajo realizado .....  | 5  |
| Características generales de la red de abastecimiento.....                                     | 7  |
| El modelo matemático de una red de abastecimiento.....   | 13 |
| Concepto de modelo matemático de una red .....   | 13 |
| Proceso de elaboración del modelo.....   | 14 |
| Ajuste y validación del modelo .....   | 16 |
| Estudio del estado de la red.....  | 21 |
| Auditoría energética.....  | 25 |
| Fundamentos del análisis.....  | 25 |
| Resultados del balance energético .....  | 27 |
| Caracterización de los usos finales de los abonados .....                                      | 33 |
| Energía asociada al drenaje y la depuración.....   | 37 |
| Síntesis de la huella energética del ciclo urbano del agua de Alcoi.....                       | 39 |
| Determinación de los gases de efecto invernadero (GEI) ligados al ciclo del agua de Alcoi..... | 41 |
| Resultados obtenidos .....   | 43 |
| Propuestas de mejora extraídas del estudio realizado .....                                     | 43 |
| Conclusiones.....  | 47 |





## Introducción

El objetivo de esta monografía es presentar de forma general el trabajo realizado y las conclusiones del proyecto sobre la optimización conjunta del uso del agua y de la energía en la ciudad de Alcoi. Un proyecto promovido conjuntamente por la cátedra ACAL de l'Escola Politècnica Superior d'Alcoi (EPSA) y el Ayuntamiento de Alcoi, y llevado a cabo por el Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua (ITA) de la UPV en colaboración con aqualia, la empresa distribuidora que, además, ha financiado el proyecto.

## Motivación y objetivos del proyecto

De la mano de los grandes avances científicos y tecnológicos de las últimas décadas, la humanidad se ha visto sometida a grandes cambios. Entre los avances más decisivos conviene listar, entre otros, al transporte, la electricidad y el suministro y distribución de agua, todos ellos vinculados a la energía, siendo este último el que este proyecto aborda.

El transporte de agua a presión demanda, de hecho, una gran cantidad de energía. Energía que permite a los ciudadanos tener agua de calidad en el grifo de sus hogares. Los hombres siempre han necesitado y necesitan agua tanto para vivir como para regar los campos. Por ello moverla desde donde se encuentra hasta donde se requiere siempre ha sido crucial, y para ello se necesita energía. Hasta hace más de un siglo, casi todo el transporte de agua se hacía por gravedad pero con el tiempo el desarrollo de las turbo bombas y una mejor comprensión y manejo de los materiales necesarios para la fabricación de tuberías, hicieron posible el transporte a presión de grandes volúmenes agua. Y con él los suministros de agua urbanos de las grandes ciudades a finales del siglo XIX primero y en el resto de ciudades poco después. Este tipo de transporte no sólo preserva la calidad del agua (un canal abierto es siempre más vulnerable), también posibilita la racionalización de su uso, lo que permite satisfacer la creciente exigencia de agua disponible. Sin embargo, el peaje a pagar, la energía utilizada por las bombas para mover el agua a presión, es notable. De ahí la importancia de desarrollar estrategias que permitan minimizarlos.

Por tanto, mover agua es una necesidad creciente como lo es recurrir a sistemas presurizados, y por consiguiente, la demanda de energía será cada vez mayor si, como indica la tendencia actual, la población sigue creciendo. Un escenario presente y futuro que exige ser mucho más eficientes en el uso de estos dos recursos: agua y energía.

## Energía – Agua – Cambio climático

El ciclo urbano del agua, desde la fuente (superficial o subterránea) hasta su retorno al medio natural, consume energía. Cada etapa del ciclo (captación, tratamiento, transporte, distribución, utilización, depuración y vertido al medio natural) tiene una necesidad específica de energía (kWh/m<sup>3</sup>), un valor que depende de las circunstancias de cada caso (la disponibilidad y calidad del agua en origen, la topografía del terreno, etc.). Sumando toda la energía consumida, la cantidad total es muy importante.

El primer estudio que analizó este tema en profundidad se llevó a cabo en California (CEC, 2005). El estudio concluyó que el 19% de la energía eléctrica está directamente ligado al agua, un porcentaje que crece hasta el 32% cuando se refiere al consumo de gas natural. En España, en ningún caso es inferior al 10%. La etapa de transporte y distribución de agua supera en cualquier país desarrollado el 2% del total de la energía eléctrica, pudiendo alcanzar el 6% en California, y con un valor intermedio de entre el 4 y el 5% del total en países del Sur de Europa, debido a la mayor contribución del sector agrícola.

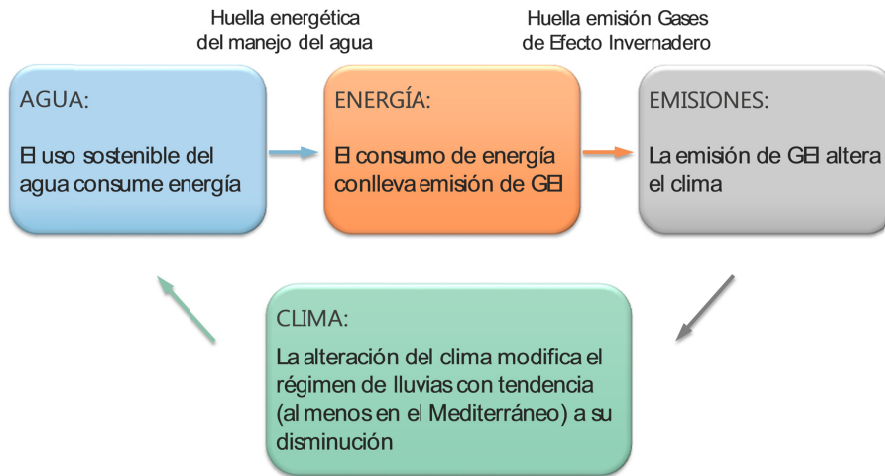


Figura 1. Interconexiones Agua – Energía- Clima

Por otro lado, el consumo de energía genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que alteran los patrones del clima y la lluvia, sobre todo en los países con mayor escasez de agua que, de acuerdo con el Pronóstico del IPCC (Milly, 2008), pueden ver sus recursos hídricos reducidos hasta en un 40%. Esto puede obligar, cada vez con mayor frecuencia, a producir agua energéticamente más consuntiva, como la desalinización de agua de mar, lo que directamente supone aumentar el consumo de energía, realimentando y cerrando el círculo (Figura 1).

Se requiere pues, implantar cuanto antes políticas de ahorro que mejoren la garantía de suministro. Y es que ahorrar agua es ahorrar energía y, en definitiva, minimizar las emisiones de GEI.

Es importante, pues, conocer la huella energética del agua (HEA) de cada una de las etapas de su ciclo integral, Figura 2. Y aunque de modo aproximado, por la dificultad que supone realizar un cálculo exacto (hay matices que concretar), es importante poner cifras. Y no sólo a cada una de las etapas gestionadas por la compañía distribuidora. También hay que asignarla a los usos finales (gasto energético asociado al agua en las viviendas de los usuarios) pues, cual se verá, el mayor gasto de energía corresponde a esta fase. Aunque siempre se ha procurado mejorar los procesos de ahorro energético, el ahorro derivado de un uso más racional del agua se viene ignorando pese a su importancia. Recientes estudios demuestran que en una vivienda la mejor relación coste beneficio (en kWh ahorrados) se obtiene implementando dispositivos de ahorro de agua domésticos. De hecho es más rentable que ningún otro programa de eficiencia doméstica.

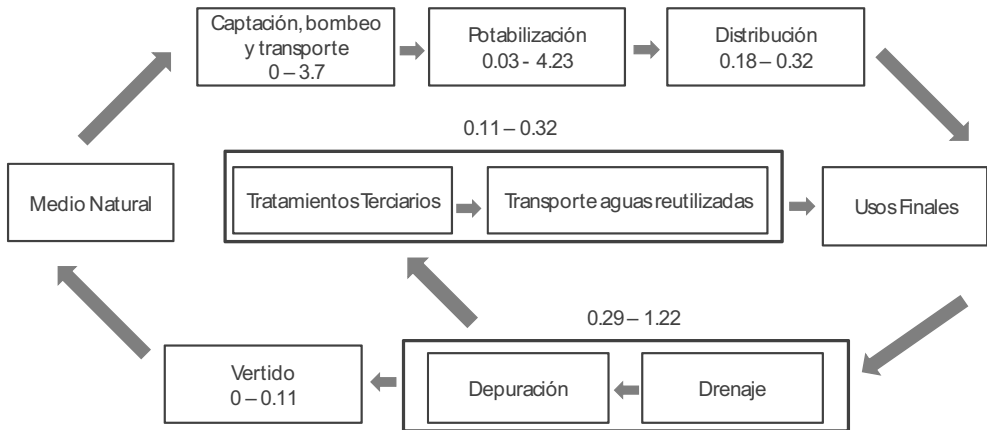


Figura 2. Horquillas de las HEA unitarias en California

El ahorro de agua supone detraer menos agua del medio natural al tiempo que disminuye el caudal que circula por las redes, lo que tiene un notable efecto multiplicador. Aumenta la garantía de suministro y reduce el consumo energético. Teniendo en cuenta que la energía “más barata y sostenible” es la que no se consume, se justifica el notable interés de este estudio pionero en España, cuando, tal cual se ha visto, no son cifras menores.

## Objetivo del estudio

Ha sido objetivo de este estudio calcular la huella energética del ciclo urbano del agua de la ciudad de Alcoi, esto es, identificar no sólo cuánta agua se gasta, también cómo se gasta. Y la energía asociada a cada una de sus etapas. Esto permite, cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero consecuencia de su uso. Y más importante aún, identificar estrategias que permitan minimizar, sin menoscabo de la calidad de suministro, el impacto ambiental que el uso de estos recursos conlleva.

## Breve resumen del trabajo realizado

Con el objetivo de tener una visión en conjunto del proyecto realizado, se presenta a continuación una breve descripción de cada una de las etapas que se han ido desarrollando en el estudio y que se explican en detalle en los sucesivos puntos:

### 1. Caracterización de la red

Para realizar un estudio en el que se quiere poner cifras concretas a un abastecimiento específico, el punto de partida es conocer cada uno de los elementos que forman parte de la red de agua de Alcoi y sus características de funcionamiento.

Durante el desarrollo de esta etapa se ha puesto de manifiesto el amplio conocimiento y el buen hacer del personal de la empresa gestora del abastecimiento de agua de la ciudad, aqualia, quien cuenta con un registro detallado y actualizado de cada uno de los elementos del sistema y lo que es aún más destacable, su personal técnico conoce al detalle la red, un sistema complejo debido tanto al entramado y conexiones del trazado de las tuberías y la gran cantidad de elementos de almacenamiento y regulación como a los importantes desniveles de la ciudad.

### 2. Elaboración del modelo matemático de la red

El objetivo del modelo matemático es reproducir mediante un ordenador, con la mayor exactitud posible, el comportamiento real del sistema físico que representa. Por tanto, se trata de una etapa clave, ya que el modelo de la red es la herramienta que permite realizar los cálculos posteriores y valorar el impacto, tanto económico como ambiental, de la implantación de medidas que conduzcan a un uso más racional del agua.

### 3. Auditoría hídrica

La auditoría hídrica consiste, básicamente, en realizar balances entre el agua que se inyecta en la red y la que finalmente es entregada a los usuarios, con el objetivo de determinar las pérdidas de agua y su distribución.

### 4. Auditoría energética

Esta fase consiste en la determinación de la energía necesaria en cada etapa del suministro de agua. Tanto la que requieren los grupos de presión, como la que se pierde embebida en el agua fugada o la que se disipa por fricción en tuberías y válvulas, etc.

### 5. Caracterización energética de los usos finales

Se ha realizado una aproximación de la energía asociada al uso del agua que requieren los abonados. Dado que en Alcoi, por las elevadas presiones existentes en la red de distribución, en la mayoría de sus viviendas no se requieren bombeos domésticos, basta con calcular la energía que gasta cada vivienda en calentar agua.

## 6. Determinación de los gases de efecto invernadero (GEI)

El consumo de energía genera emisiones de GEI. A partir de las cifras del gasto energético (conocido a partir de los resultados de las etapas anteriores) es posible conocer los kg de CO<sub>2</sub> ligados al ciclo del agua en la ciudad.

## 7. Análisis y propuestas de mejora

Una vez analizado el estado actual del abastecimiento, se está en condiciones de realizar propuestas que contribuyan a mejorarlo y que posteriormente serán objeto de un análisis detallado coste-beneficio.

## Características generales de la red de abastecimiento de Alcoi

El municipio se abastece desde cuatro puntos de captación. Dos manantiales (El Molinar y el Xorrador) y dos pozos (El pozo de Barxell y el pozo del Barranc del Cint). Éstos a su vez no alimentan directamente a la red sino a varios depósitos de almacenamiento que abastecen, en su mayoría, por gravedad a los usuarios.

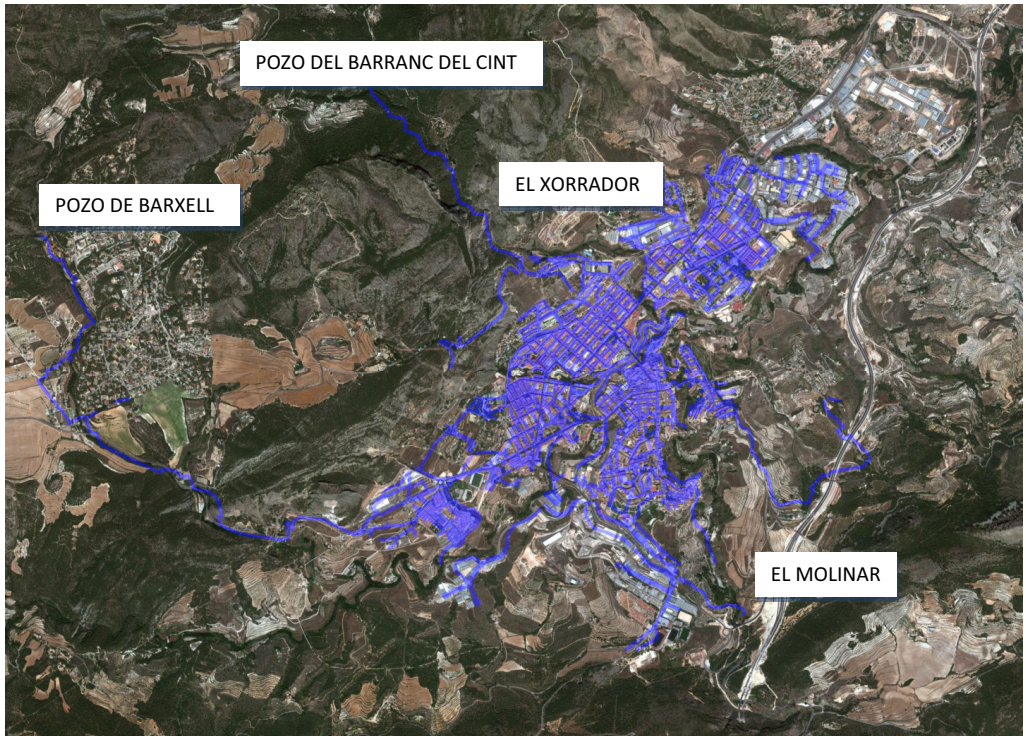
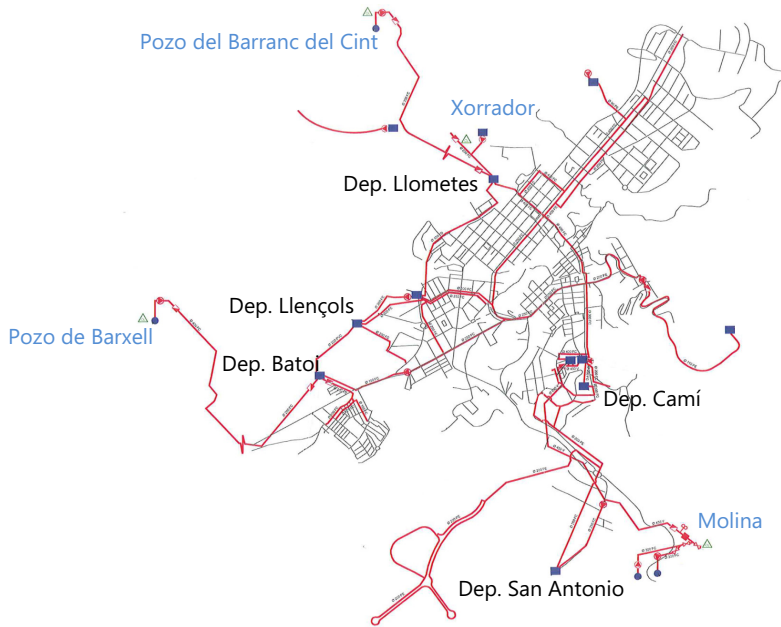


Figura 3. Red de abastecimiento de agua de Alcoi

Se trata de una red de más de 180 km de tuberías, muy mallada lo que confiere una elevada garantía de suministro, ya que se asegura que ante cualquier rotura o fallo en el sistema el agua podrá llegar a los abonados por un camino alternativo, ésta es la principal ventaja de una configuración mallada, la seguridad de suministro ante eventuales averías o roturas y es que si la red ha sido dimensionada de forma adecuada, ésta será redundante, pudiendo mantener el servicio a los usuarios sin interrupciones. Por otro lado, la redundancia de la red tiene un precio, que consiste en contar con más capacidad de conducción de la estrictamente necesaria, no tanto por los diámetros de las tuberías sino como por la existencia de caminos alternativos para la distribución del agua.



Esta característica, además, convierte al abastecimiento en un sistema complejo tanto en la compresión de su funcionamiento como en su regulación, pues casi todos los puntos de la red, en mayor o menor medida, están conectados.



**Figura 4.** Esquema principal de la red de abastecimiento de agua de Alcoi

Por otro lado, el sistema presenta un desnivel geométrico bastante pronunciado, consecuencia de la irregularidad topográfica de la ciudad, existiendo una diferencia de cotas entre el abonado más alto y el más bajo de más de 280 metros. Esta particularidad dificulta mantener un rango de presiones homogéneo en la totalidad del área servida, al tiempo que, para garantizar una presión suficiente en las acometidas de las zonas altas de la ciudad, se alcanzan presiones elevadas en algunos puntos del sistema, muy por encima de la presión de servicio mínima.

En general la presión de servicio mínima que se debe asegurar en una red de distribución en las acometidas será la necesaria para abastecer directamente a las viviendas hasta una determinada altura. No hay que olvidar que el objetivo último de un sistema de suministro es dar un determinado caudal a los usuarios en sus aparatos, por lo que la presión existente en la acometida no es un fin en sí misma, sino un medio para lograr un objetivo. Existe una serie de problemas asociados a las presiones excesivas en un sistema de distribución, como son: el encarecimiento del conjunto de las instalaciones que deben soportar mayores presiones; un mayor consumo energético, tal cual se verá, ya que es necesario elevar la presión de todo el caudal que se suministra y no sólo el que se abastece a las viviendas situadas por encima de una

determinada cota; la existencia de un mayor consumo de agua y un incremento de pérdida de agua por fugas.

En cuanto a los caudales que circulan por la red, el abastecimiento suministra agua a más de 30.000 abonados a través de sus más de 6.000 acometidas. Como se puede observar en la siguiente tabla, el volumen consumido total, presenta una tendencia decreciente en los últimos años, causada, previsiblemente, por el descenso de la actividad económica de la ciudad, por lo que el volumen inyectado a la red también decrece.

En síntesis, la ciudad demanda menos agua y además, por las constantes mejoras en la red, los rendimientos son mayores. Se presenta a continuación un resumen muy general de los volúmenes consumidos e inyectados en la red para los diferentes puntos de captación:

**Tabla 1. Volúmenes consumidos y captados**

| AÑO  | Volumen Consumido        | Volumen captado          |                          |                       |                        |                          |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
|      |                          | Molinar                  | Barxell                  | Xorrador              | Barranc del Cint       | TOTAL                    |
| 2011 | 3.726.933 m <sup>3</sup> | 2.927.466 m <sup>3</sup> | 1.331.308 m <sup>3</sup> | 88.891 m <sup>3</sup> | 761.147 m <sup>3</sup> | 5.108.812 m <sup>3</sup> |
| 2012 | 3.703.319 m <sup>3</sup> | 2.725.003 m <sup>3</sup> | 1.316.208 m <sup>3</sup> | 96.242 m <sup>3</sup> | 909.418 m <sup>3</sup> | 5.046.871 m <sup>3</sup> |
| 2013 | 3.626.821 m <sup>3</sup> | 2.604.759 m <sup>3</sup> | 1.282.165 m <sup>3</sup> | 14.893 m <sup>3</sup> | 995.507 m <sup>3</sup> | 4.897.324 m <sup>3</sup> |

La diferencia de valores presentados entre el volumen captado y el volumen consumido, está relacionada con las pérdidas de agua. Cualquier discusión relacionada con las pérdidas de agua debe estar precedida por una clara definición de los componentes del balance de agua y de los datos complementarios usados en el sistema de abastecimiento. El balance se realiza usualmente para un periodo de 12 meses por lo que representa el promedio anual de sus componentes. Aunque existen diferencias significativas en las definiciones de los conceptos usados por los diferentes países, en el caso del presente proyecto se ha recurrido en todo momento a la terminología y metodología desarrollada por la Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés) para el balance hídrico estándar.

Es importante, pues, conocer los diferentes términos asociados a los volúmenes de agua que circulan por una red de abastecimiento. Por un lado el agua captada (Volumen de entrada al sistema, Tabla 2) representa el volumen inyectado desde las diferentes fuentes de agua durante el periodo de evaluación. El consumo autorizado es el volumen de agua medido o no medido, éste es el consumido por los usuarios, por la misma empresa para mantenimiento de su red y por otros que estén implícita o explícitamente autorizados por el operador del sistema, para uso doméstico, comercial e industrial.

Es de anotar que el consumo autorizado incluye ítems como uso de bomberos, lavado de tuberías, limpieza de calles, riego de jardines y parques municipales, plazas y fuentes públicas, etc. Éste puede ser facturado o no, medido o estimado, de acuerdo con las prácticas locales.

**Tabla 2. Componentes del balance hídrico de la IWA (Alegre y Col., 2006)**

|  |  |  |   |   |  |
|--|--|--|---|---|--|
| <b>Volumen de entrada al sistema [m<sup>3</sup>/año]</b> | <b>Consumo autorizado [m<sup>3</sup>/año]</b>                      | <b>Consumo autorizado facturado [m<sup>3</sup>/año]</b>    | <b>Consumo facturado medido [m<sup>3</sup>/año]</b>                           | <b>Agua Facturada [m<sup>3</sup>/año]</b> |  |
|  |  |  | <b>Consumo facturado no medido [m<sup>3</sup>/año]</b>                        |   |  |
|  |  | <b>Consumo autorizado no facturado [m<sup>3</sup>/año]</b> | <b>Consumo medido no facturado [m<sup>3</sup>/año]</b>                        |   | <b>Agua No Facturada [m<sup>3</sup>/año]</b> |
|  |  |  | <b>Consumo no medido no facturado [m<sup>3</sup>/año]</b>                     |   |  |
|  | <b>Pérdidas de agua (Volumen incontrolado) [m<sup>3</sup>/año]</b> | <b>Pérdidas comerciales [m<sup>3</sup>/año]</b>            | <b>Consumo no autorizado [m<sup>3</sup>/año]</b>                              |   |  |
|  |  |  | <b>Errores en los contadores [m<sup>3</sup>/año]</b>                          |   |  |
|  |  | <b>Pérdidas técnicas [m<sup>3</sup>/año]</b>               | <b>Fugas en las tuberías de transporte y distribución [m<sup>3</sup>/año]</b> |   |  |
|  |  |  | <b>Fugas y reboses en los tanques de almacenamiento [m<sup>3</sup>/año]</b>   |   |  |
|  |  |  | <b>Fugas en acometidas [m<sup>3</sup>/año]</b>                                |   |  |
|  |  |  | <b>Fugas en acometidas [m<sup>3</sup>/año]</b>                                |   |  |

Por otro lado se encuentran las pérdidas de agua, éstas son la diferencia entre el volumen de entrada al sistema y el consumo autorizado, pueden ser consideradas como un volumen total para todo el sistema o para sectores parciales. Las pérdidas de agua están constituidas por pérdidas reales (físicas) y pérdidas aparentes (comerciales).

Las pérdidas reales o físicas, es el volumen anual perdido a través de todos los tipos de fugas. Las fugas tienen lugar en puntos muy diversos de la red de distribución, entre otros: en las tuberías principales, tanto en sus juntas como en los propios conductos; en las acometidas, tanto en el manguito de unión como en la misma acometida; en los depósitos, ya que pueden haber filtraciones o reboses y en los elementos complementarios, por ejemplo por goteo en las válvulas. La mayoría de fugas se localizan en tuberías y acometidas, sobre todo en estas últimas. Algunos estudios evidencian que en las acometidas se pueden localizar fácilmente el 60% de las fugas totales del sistema.

Por otro lado las pérdidas aparentes, que pueden llegar a suponer en algunos países hasta un 40% del total del volumen de agua incontrolada, se deben principalmente: a errores de medición, es lo que se conoce como subcontaje, es decir que los contadores de agua instalados en las viviendas de los usuarios registran menos agua de la que realmente se consume. En los sistemas bien gestionados representan la mayor cantidad de las pérdidas aparentes. Las pérdidas aparentes también están relacionadas con el consumo no autorizado, como el robo por medio de acometidas ilegales, acometidas fraudulentas que son aquellas que evitan el paso del agua a través del contador o simplemente la manipulación de éstos últimos. Y por último, a errores en la lectura de los contadores o en el tratamiento de la información. Al igual que en el caso de fugas, la mayor parte de las pérdidas aparentes corresponden a los dos primeros grupos, ya que los errores en la lectura de contadores o en el tratamiento de la información, pueden sin duda existir, pero no son errores sistemáticos y además tienen fácil corrección.



## El modelo matemático de una red de abastecimiento

### Concepto de modelo matemático de una red

El modelo matemático es la base que se utiliza en el cálculo hidráulico para simular diferentes estados de carga que debe satisfacer la red de distribución sin tener que llegar a experimentarlos físicamente. Del resultado de estas simulaciones se extraen luego consecuencias que serán utilizadas en la planificación y gestión de la red.

Para elaborar un modelo matemático el proceso a seguir supone recopilar toda la información existente de la red y tratarla para poder ser asimilada por los programas de análisis existentes, con el objetivo de reproducir mediante un ordenador, con la mayor exactitud posible, el comportamiento real del sistema físico que representa, es decir las presiones en los nudos de consumo y el caudal que circula en cada momento por las tuberías.

El modelo de la red consiste en un conjunto de líneas y nudos que representan a las tuberías, las bombas y estaciones de bombeo, las válvulas reguladoras y automáticas, los depósitos y embalses, y los puntos de consumo que forman el sistema. Y todo ello soportado por un programa de cálculo de redes. En este caso el programa EPANET (Rossman, 1993).

EPANET es un programa de cálculo hidráulico para redes de agua a presión. Su aplicación fundamental se encuentra en el campo de la simulación a lo largo del tiempo del funcionamiento de redes hidráulicas. Bajo las condiciones de operación que determine el usuario, EPANET resuelve para cada elemento de la red y cada instante de tiempo el valor resultante de las variables hidráulicas (velocidades, caudales, presiones, etc.) y las variables de calidad del agua (concentraciones de compuestos). Para empezar, el usuario introduce las características de cada uno de los elementos (tuberías, depósitos, bombas, etc.), así como las pautas de consumo de los usuarios conectados a la red (demanda base y modulación), definidas las características anteriores, el programa permite simular las condiciones de operación de la red, en esencia, los resultados de caudal en cada línea y presión en cada nudo.

EPANET fue desarrollado por el grupo de investigación dirigido por Lewis A. Rossman para la Agencia de Protección del Medioambiente (Environmental Protection Agency, EPA) de Estados Unidos, concretamente, el desarrollo fue dirigido por el Laboratorio de Investigación Nacional para la Gestión de Riesgos, centro dedicado a la investigación de procedimientos técnicos y de gestión orientados a reducir los riesgos que amenazan a la salud humana y al medio ambiente (contaminación del aire, suelo, agua y recursos subsuperficiales), así pues EPANET nace como una herramienta para facilitar a los abastecimientos el seguimiento y control de la calidad del agua a través de sus redes, sin embargo, para disponer de información sobre la evolución de los parámetros de calidad, era necesario resolver primero el cálculo hidráulico de la red. El módulo

que para ello se desarrolló en EPANET es tan potente, que ha recibido una aceptación abrumadora por parte de los abastecimientos y empresas de consultoría, convirtiéndose en el programa de referencia a nivel mundial en el análisis de redes hidráulicas.

El principal éxito de este software radica en que su algoritmo de cálculo es potente, fiable y rápido, además de ser un programa gratuito y de código abierto, lo que permite incorporar módulos de cálculo propios.

Es importante destacar, que a pesar de la potencia y bondades de este software, EPANET posee limitaciones que con el tiempo se hacen cada vez más evidentes. Por ejemplo, aunque es posible modelar las fugas en la red a través de emisores que demanden agua en función de la presión, tal como ocurre en la realidad, para modelar de forma correcta estos emisores en el modelo es necesario proceder con un cálculo iterativo nada sencillo, que implica una serie de simulaciones y correcciones hasta llegar a la convergencia de la solución. Un proceso que no se puede desarrollar a mano, mucho menos para una red de la entidad que nos ocupa, que contempla más de 10.000 nudos. Se recurre por lo tanto al desarrollo de módulos de cálculo programados que incorporen el algoritmo de EPANET y que permitan realizar este proceso.

Otra de las grandes deficiencias de EPANET y que han quedado reflejadas en el trascurso de este proyecto, es la insuficiencia e incluso incorrecciones de sus cálculos energéticos. Si bien, y tal como se ha comentado, para poder realizar la auditoría energética es necesario contar con el modelo de la red, ésta se debe desarrollar también en un módulo externo que incluya las simulaciones de EPANET.

A este respecto, y aunque no es objetivo de este documento describir las funcionalidades o limitaciones del software hidráulico más extendido y utilizado, se desea dejar constancia que la realización de este proyecto ha permitido desarrollar y validar una serie de herramientas de cálculo y simulación que pueden sentar precedentes. Desde la carga del modelo automáticamente con las facturaciones de la compañía, a la validación de un software que permite determinar el agua fugada por cada nudo del modelo, y por supuesto, el cálculo de la energía asociada al suministro de agua del abastecimiento. Por lo que más allá de los resultados obtenidos, la oportunidad de llevar a cabo este proyecto ha permitido el desarrollo y consolidación de una serie de conocimientos y herramientas.

### Proceso de elaboración del modelo

Sin entrar en detalle del proceso que se ha seguido para elaborar el modelo de la red de Alcoi, sí vale la pena comentar algunos puntos clave que ha sido necesario completar. A partir de los planos disponibles con los trazados de las tuberías y la localización de las acometidas, y las bases de datos de información del conjunto de elementos de la red (diámetros y materiales de cada una de las tuberías, localización y tipología de las válvulas del sistema, características de las

estaciones de bombeo y de los depósitos y por último las facturaciones de los últimos años de todos los abonados al sistema) se reproduce sobre el ordenador un sistema equivalente al real.

Con el esqueleto de la red y los elementos caracterizados, uno de los puntos críticos es cargar el modelo, esto es, asignar el consumo de agua que cada nudo demanda. La característica principal del modelo elaborado es que se han conservado todos los abonados de la red asignándoles un nudo específico. Dicho de otro modo, todas las acometidas se han respetado lo que significa que cada usuario (viviendas, comercios, centros deportivos, centros de salud, industria e incluso riego de jardines y consumos municipales) están perfectamente localizados e identificados en el modelo.

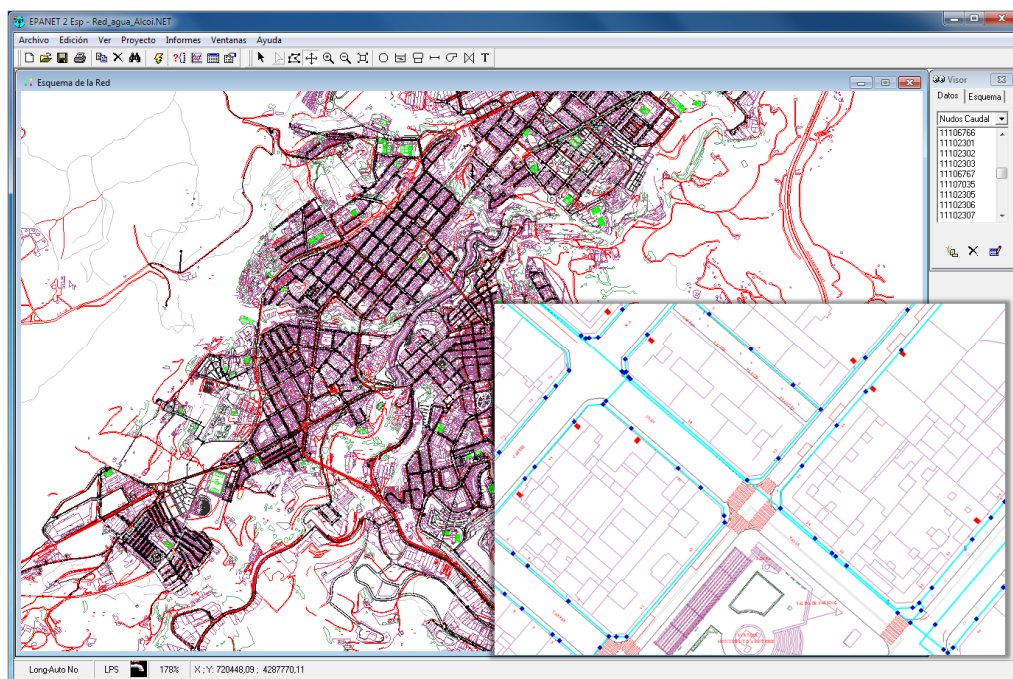


Figura 5. Modelo matemático de la red de Alcoi en EPANET

Por otro lado, además de que el modelo contemple todos los volúmenes registrados (facturaciones de los abonados), es importante incluir también los volúmenes no registrados, si queremos reflejar de forma precisa el comportamiento real del sistema. Para esto, se ha seguido una metodología que tiene como objetivo determinar los componentes del caudal incontrolado  $Q_i$ . Por una parte el caudal consumido pero no medido  $Q_{ic}$  corresponde a aquellos usuarios que son facturados mediante una estimación o el caudal que ha pasado a través de los contadores pero que no ha sido registrado correctamente por un error de medición (bien porque el caudal



no alcanza el valor mínimo para que el contador arranque, bien el contador se bloquea o funciona de forma incorrecta, lo que se conoce como subcontaje). El otro componente de  $Q_i$  corresponde a las fugas reales en las tuberías de distribución y acometidas, y se denomina caudal incontrolado fugado,  $Q_{if}$

Por último y para ajustar el modelo, se ha hecho necesario incorporar el amplio conocimiento del personal sobre la red, un know-how que difícilmente puede ser plasmado en las bases de datos e históricos del abastecimiento y que confieren a la empresa gestora de la localidad un valor añadido incuestionable. Como ya se ha comentado el entramado de tuberías y el elevado número de elementos del abastecimiento, entre otras causas, convierten a la red de agua de Alcoi en un sistema tremendamente complejo, del que su personal técnico tiene un dominio y un conocimiento extraordinario.

El modelo realizado posibilitará a aquialia contemplar posibles modificaciones de funcionamiento de los elementos de la red, crecimiento de la ciudad o fluctuaciones y estacionalidades en el consumo (para cada periodo del año las facturaciones de los abonados pueden introducirse de forma casi automática). Además, permitirá estimar la respuesta del sistema frente a imprevistos, roturas o tareas de mantenimiento, obteniendo simulaciones cercanas a la realidad lo que permite mejorar de modo significativo la calidad de suministro.

### Ajuste y validación del modelo

El último punto antes de poder realizar cálculos y suposiciones a partir de resultados obtenidos con el modelo es validarlo. Las fases siguientes de medición y calibración del modelo van muy ligadas, y están destinadas a conseguir que el modelo elaborado reproduzca con fidelidad el comportamiento del sistema que representa.

La calibración y el ajuste del modelo consiste en, a partir de mediciones en la red de presión y caudal, ir comparando y reajustando las variables de éste de manera que el resultado de la simulación coincida con el de las mediciones. Se trata pues de un proceso dinámico y continuo que requiere de aproximaciones sucesivas, siguiendo un procedimiento iterativo que se basa en los resultados del paso anterior. En el feliz caso de que el proceso converja, la precisión de la nueva iteración superará la de la precedente.

Con el fin de conocer el funcionamiento de su sistema la empresa gestora realiza continuamente mediciones de caudal y presión en puntos intermedios y estratégicos de la red, así como registros en los puntos de inyección y almacenamiento del sistema. El hecho de contar con todos estos puntos de medición ha permitido sectorizar la red para estudiarlos de forma independiente, ya que tanto las pérdidas aparentes (errores de medición y potenciales robos de agua) como las pérdidas reales (fugas), no se distribuyen por igual en toda la red, sino que

ciertos sectores pierden más agua que otros. En consecuencia, el estudio detallado de cada sector ha favorecido el ajuste del modelo.

Las comparaciones realizadas entre valores medidos en la red y valores obtenidos en la simulación del modelo de algunos de los puntos disponibles para la calibración, demuestran que la aproximación del modelo a la realidad es más que razonable y por tanto, recurrir a los valores que éste proporciona para realizar los cálculos energéticos del sistema está bien justificado.

Por otro lado, y más allá del hecho de disponer del modelo calibrado como herramienta indispensable para el cálculo de la energía asociada a la red, es importante destacar las ventajas que el gestor puede obtener del hecho de contar con esta herramienta, haciendo un mantenimiento y un uso adecuado de ella, así por ejemplo:

El modelo matemático puede predecir presiones insuficientes, como consecuencia de las deficiencias del sistema de distribución. Un sistema de distribución deficiente sencillamente es incapaz de satisfacer las demandas de los usuarios, es decir, las presiones del sistema disminuyen a medida que aumentan las demandas, lo que supone que sólo se pueden suministrar los caudales correspondientes a esas bajas demandas.

El uso del modelo matemático por parte del gestor, le permite evaluar el rendimiento, los impactos económicos o ambientales (cálculo del detraimiento del agua de los puntos de inyección) de nuevos sistemas propuestos de tuberías por crecimiento de la ciudad o de su industria. Además le permite estudiar cambios en procedimientos operativos, comportamiento de distintos elementos, como válvulas de control, depósitos de almacenamiento, etc.

Además el modelo puede ser usado como herramienta para la seguridad y predicción de las consecuencias para los usuarios de posibles situaciones desfavorables o de emergencia, como puede ser la rotura de una tubería concreta de distribución, la necesidad de labores de mantenimiento o limpieza en un depósito, el aumento de la demanda en una zona concreta por un evento particular, etc.

Por último, y aunque a lo largo de este estudio no se ha entrado en cuestiones de calidad del agua en la red, el modelo calibrado del abastecimiento permite estudiar este tipo de cuestiones. Por ejemplo, es posible calcular la concentración de agentes desinfectantes que llegan al grifo del usuario según la concentración que se tiene en cabecera, estudiar si son necesarios puntos de rechloración o incluso cómo afectaría a la calidad del agua que llega a los usuarios la intrusión de un agente contaminante. Además de permitir conocer el tiempo de permanencia del agua en la red, ya que como a cualquier alimento perecedero el tiempo le resta calidad.

Obviamente la bondad del modelo, es decir el éxito en la predicción de la respuesta de la red real ante una perturbación, va a depender muy especialmente de la precisión con la que están definidos los parámetros correspondientes de los diferentes elementos del sistema y del correcto uso que se haga de la herramienta informática y la interpretación de los resultados. No hay que olvidar, que se trata de una simplificación matemática, no de un sistema de lectura en tiempo real, y más importante que una red de suministro es un elemento dinámico y vivo, ya que depende del gasto de agua que hagan sus usuarios, que aunque tal como han intentado demostrar numerosos estudios, se muevan por patrones de consumo; la realidad es que siempre es posible desviarse de lo que previsiblemente hacen los usuarios todos los días.

La variación en el consumo se refleja en estas dos gráficas de evolución del caudal en dos puntos diferentes de la red. Una se corresponde con el caudal medido en una conducción próxima a la entrada de uno de los polígonos, la otra en un punto céntrico de la ciudad.

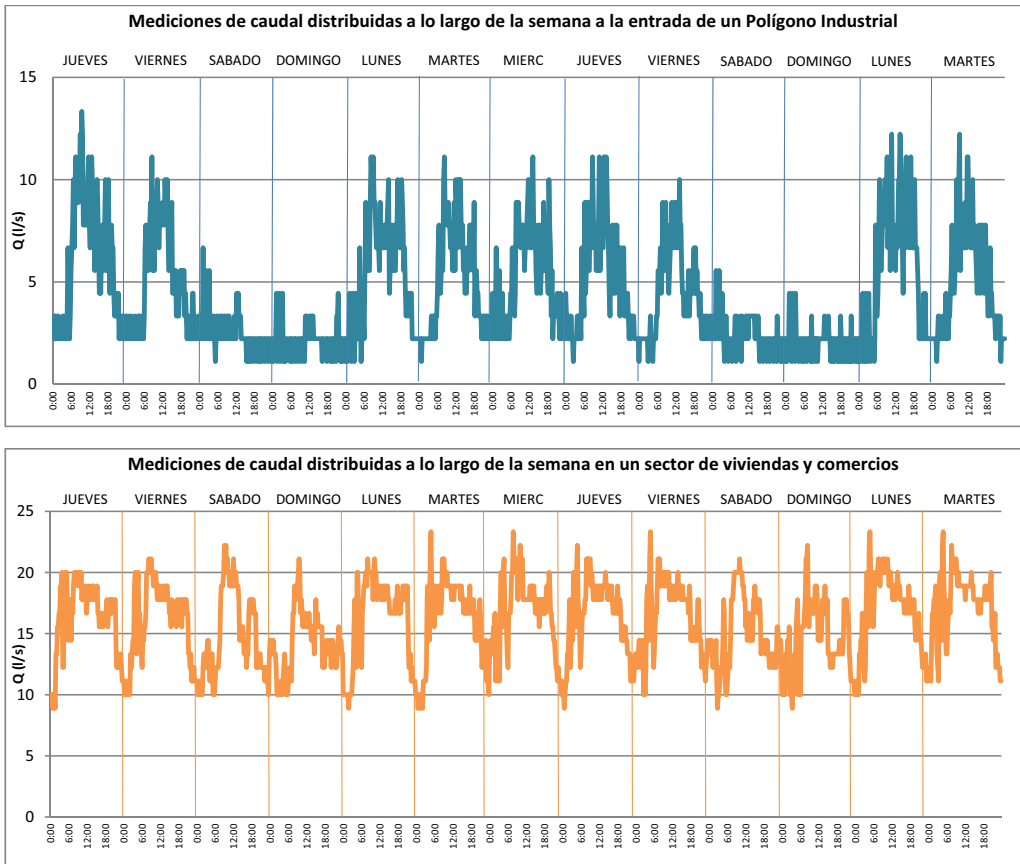


Figura 6. Evolución del caudal a lo largo de los días en puntos diferentes del sistema

Se observa claramente que el patrón de comportamiento en el consumo para diferentes zonas de la red, es sustancialmente distinto dependiendo del tipo de usuario. Mientras que claramente el consumo de agua prácticamente se anula durante el fin semana en el polígono industrial, exceptuando un ligero consumo los sábados por la mañana. En la tubería que da suministro principalmente a una zona de viviendas y comercios, la variación entre días laborables y festivos no es tan acusada, si bien si se aprecia un patrón diferente en los fines de semana.

El objetivo de estas gráficas no es otro que mostrar que a pesar de que se puede tratar de ajustar el modelo de la red, entrar en complejos procesos iterativos, recurrir a estudios documentados e invertir horas en la calibración del modelo y comparación con la realidad, el comportamiento de una red de agua potable, depende del consumo final de los usuarios, por otro lado ese es el objetivo del sistema, entregar agua de calidad a los ciudadanos. Por tanto, aunque se puede afirmar que el modelo de la red que se ha desarrollado se ajusta a las mediciones realizadas, es importante no perder de vista que se trata de una representación general de la realidad, que aporta conclusiones sobre valores medios y comportamientos estándar.

La gráfica siguiente, muestra esa diferencia entre el comportamiento estándar y el que se da en situaciones extraordinarias, y que por tanto no se ajustan a los valores medios.

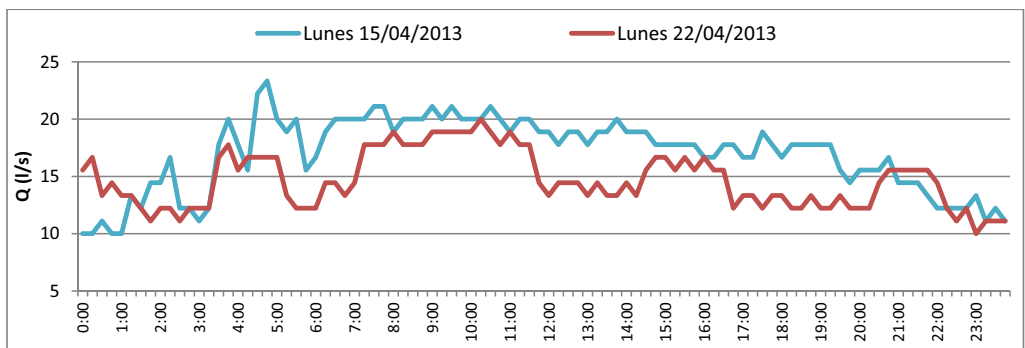


Figura 7. Evolución del caudal a lo largo de un día

Se trata de la medición de caudal a la entrada de una zona viviendas y comercios, alejada del centro de Alcoi, y compara en el mismo punto y a las mismas horas, la medición del caudal demandado por los usuarios de esa zona para dos lunes consecutivos, uno laborable y otro festivo. Se observa claramente como varía el patrón de consumo el 22 de abril (Día de les Entrades), es de esperar que los vecinos de esta zona no se encuentren en casa a las mismas horas que el lunes anterior.

Más allá de cuestiones anecdóticas como ésta, las comparaciones realizadas entre los caudales y presiones medidas por los equipos dispuestos para ello, y los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones del modelo una vez calibrado, validan el uso de éste como herramienta de apoyo tanto para la gestión del abastecimiento como para los siguientes pasos del presente proyecto.

## Estudio del estado de la red

El concepto de auditoría volumétrica de un sistema de distribución de agua es, desde una perspectiva genérica, extremadamente sencillo. La realización de la misma consiste en identificar y cuantificar las diferentes salidas de todo el volumen que se inyecta en las cabeceras. En grandes líneas, esas diferentes salidas se agrupan en dos tipos: consumos y pérdidas. Es decir, el agua inyectada en la red de distribución, o bien termina siendo consumida por los usuarios conectados a la misma, o bien escapa de las tuberías a través de grietas, poros o roturas, sin llegar a ser utilizada por nadie y se pierde, bien infiltrándose en el subsuelo bien ingresando en las tuberías de drenaje urbano. En este sentido cabe subrayar que tal pérdida no es sólo de agua fugada, sino también de la energía necesaria para llevarla hasta el punto en que se ha perdido, e incluso, de la potabilización recibida. No conviene olvidar que se está perdiendo agua de calidad.

La correcta gestión, desde cualquier punto de vista (técnico, económico o ambiental) de una red de distribución, exige conocer con exactitud el destino final del agua introducida en el sistema. La tarea de contabilizar el agua plantea una serie de actuaciones que, al final, permiten la construcción de un balance hídrico.

Se presenta a continuación, un cuadro resumen de los volúmenes del sistema para el año 2012:

**Tabla 3.** Distribución de volúmenes para el año 2012

| DISTRIBUCIÓN DE VOLÚMENES 2012 (m <sup>3</sup> /año)       |           |                            |           |
|--|-----------|----------------------------|-----------|
| Volumen inyectado  | 5.046.871 |                            |           |
|  |           | Volumen facturado          | 2.767.351 |
| Volumen registrado   | 3.328.094 | Consumo municipal          | 306.883   |
|  |           | Otros consumos localizados | 253.860   |
| Volumen incontrolado<br>(Inyectado – Registrado)           | 1.718.777 |                            |           |
|  |           | Subcontaje                 | 235.225   |
| Volumen incontrolado consumido                             | 375.225   | Volumen de mantenimiento   | 140.000   |
| Volumen consumido<br>(Registrado + Incontrolado consumido) | 3.703.319 |                            |           |
| Volumen fugado<br>(Inyectado – Consumido)                  | 1.343.552 |                            |           |

Tras el estudio detallado de cada uno de los sectores en los que se ha dividido el sistema, se estima que de todo el volumen que se inyecta en la red y que, finalmente, no se factura (volumen incontrolado) entre el 70% y el 90% (depende del sector) son fugas reales. Esto significa que, aproximadamente el 20% del volumen incontrolado sí se consume pero no se registra correctamente debido a cuestiones de subcontaje, consumidores no identificados, robos o volúmenes de agua destinadas al mantenimiento de la red.

A la vista de los resultados de los balances realizados por sectores, el sector más crítico es la Zona Alta de la ciudad que se abastece desde el depósito de San Antonio. La presión del agua en todo este sector es alta, lo que favorece las fugas en el red, pues el caudal fugado depende de la presión, lo que justifica que el volumen fugado en este sector sea superior al 25% del volumen inyectado en éste.

Por último, podemos cuantificar las fugas reales en un 21% del volumen inyectado, lo que sitúa el rendimiento del abastecimiento por encima de los valores estadísticos nacionales, si bien todavía con un margen de mejora.


Es importante recordar que las fugas de agua en la red, se deben a pequeñas roturas en tuberías y acometidas que dan lugar a una pérdida sistemática de caudal difícil de detectar. En su cuantía influye decisivamente el grado de conservación de la red y los niveles de presión: mayores niveles de presión incrementan el volumen de agua fugado, razón por la que en horas de bajo consumo resulta conveniente disminuir la presión de inyección.

La tabla 4 adjunta sintetiza los niveles de presión en la red. Cual se aprecia, más del 12 % de los nudos superan los 70 mca, más de la mitad (en concreto un 52%) tiene una presión comprendida entre 35 y 55 mca y son muy pocos (un 12%) los nudos con una presión inferior a los 35 m. En conjunto puede decirse que las presiones son muy elevadas, un problema sin fácil solución pues, cual se ha dicho, los desniveles topográficos son muy importantes, más de 280 metros de diferencia entre los usuarios que se encuentran más bajos (calle G del Polígono Industrial de Cotes Baixes) y los más altos (usuarios al inicio de la Carretera de la Font Roja).

Por otro lado la poca variación de las presiones en un punto a lo largo del día es una característica de esta red, debida principalmente a su sobredimensionamiento. Como consecuencia de que el diámetro de las tuberías es mayor que el estrictamente necesario, las pérdidas de carga por fricción son muy pequeñas (diámetros elevados para los caudales circulantes), y la presión en los nudos de consumo depende principalmente de la cota a la que se encuentre éste.

**Tabla 4.** Distribución de presiones en la red

| RANGO DE PRESIONES (mca) Según modelo a las 18 horas |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|--|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Presión  | < 30 | 30-35 | 35-40 | 40-45 | 45-50 | 50-55 | 55-60 | 60-65 | 65-70 | 70-75 | 75-80 | 80-85 | 85-90 | >90  |
| Nº nudos   | 536  | 722   | 1166  | 1220  | 1563  | 1486  | 1036  | 862   | 657   | 321   | 232   | 177   | 126   | 406  |
| %  | 5,10 | 6,87  | 11,09 | 11,61 | 14,87 | 14,14 | 9,86  | 8,20  | 6,25  | 3,05  | 2,21  | 1,68  | 1,20  | 3,86 |

Es importante, tal como se ha introducido de forma muy general, evitar las presiones excesivas por varias razones (Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución, 2009):

Suponen un encarecimiento de las instalaciones de la red que deben soportar mayores presiones. Hay que tener en cuenta que no todos los materiales ni diámetros de las conducciones pueden soportar las mismas presiones, por tanto si las tuberías de distribución tienen que estar sometidos a esfuerzos importantes éstas deben de soportarlos, de otra forma colapsarán o romperán.

Exige un mayor consumo energético, ya que es necesario elevar todo el caudal que se suministra y no sólo el que abastece a las viviendas por encima de una determinada cota.

Suponen mayores caudales instantáneos de los necesarios, dado que con la misma instalación, mayor presión en la acometida implica un caudal más elevado.

Mayor volumen de agua consumida y mayores consumos punta.

Ruidos molestos en las instalaciones así como un mayor número de averías.

Y por supuesto, un incremento de las pérdidas de agua por fugas, ya que éstas son dependientes de la presión, a mayor presión, mayor agua escapa por las grietas y fisuras existentes en las conducciones.

A pesar de todo lo expuesto, la topografía del terreno de este abastecimiento, hace inevitable que se den en algunos puntos presiones excesivas. Por esto, se recurre a la utilización de dispositivos de regulación, depósitos y bombeos intermedios, de manera que se generen diferentes subredes escalonadas según la cota del terreno. En cualquier caso, el personal técnico del abastecimiento es muy consciente de la realidad de las presiones en su sistema, y mantienen un exhaustivo control sobre esta situación.

Hay que destacar, que el hecho de que el agua llegue con más presión que la mínima o estándar a las acometidas, por otro lado, favorece que las viviendas no requieran de grupo de presión domiciliario para elevar el agua desde el nivel de la calle hasta las plantas altas de los edificios, repercutiendo en un ahorro energético y económico directo para el usuario.



Por último, en lo que a la garantía de suministro respecta, la estructura mallada de la red, las numerosas válvulas de seccionamiento existentes y la disponibilidad de grupos de presión adicionales, que si bien durante el normal de funcionamiento de la red no están en servicio en caso necesario pueden entrar en funcionamiento, garantizan en todo momento y ante casi cualquier eventualidad el suministro de agua a los usuarios. En definitiva, la garantía de servicio es muy alta.

## Auditoría energética

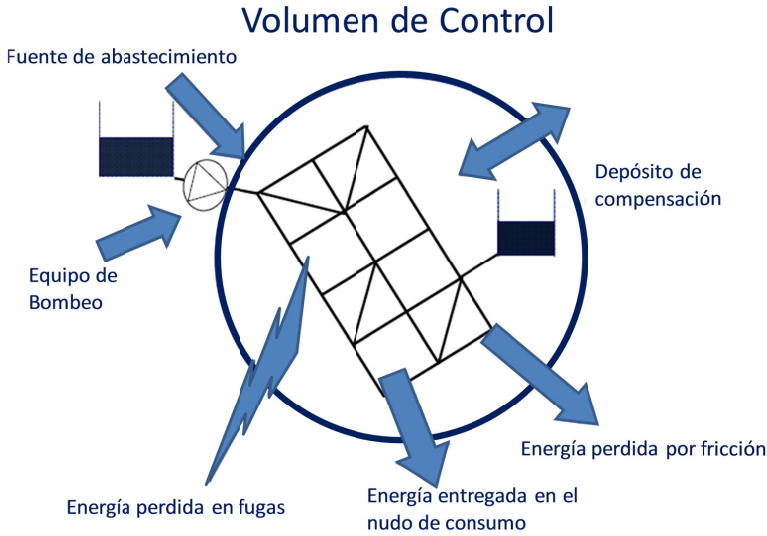
Se plantea a continuación la evaluación de la sostenibilidad ambiental de la distribución de agua desde el punto de vista energético. Efectivamente, tras haber ido revisando en etapas anteriores todo lo relacionado con cuestiones hidráulicas, sólo queda abordar las cuestiones energéticas.

Este apartado presenta únicamente las conclusiones extraídas del estudio realizado en esta materia, que ha desarrollado básicamente dos puntos principales:

- El planteamiento y justificación de la auditoría energética de una red. Tras las explicaciones del método en sí, se procede a aplicarlo al conjunto del sistema e individualmente a cada uno de los sectores de trabajo en la red de Alcoi. En todos los casos se valora el coste energético del uso del agua así como, y ello es más importante, la energía embebida en las fugas y en la fricción en las tuberías.
- La cuantificación de la energía topográfica de la red, lo que permite realizar un diagnóstico completo de la situación y las posibles estrategias de mejora siendo éste el punto de partida para efectuar un análisis coste beneficio que incluya los costes ambientales de las distintas acciones identificadas y que permita establecer un orden de prioridades.

### Fundamentos del análisis

La ecuación integral de la energía se aplica a un volumen de control limitado por una superficie atravesada por flujos hídricos y energéticos conocidos, lo que exige haber resuelto el balance hídrico y contar con el modelo matemático de la red previamente. El volumen de control se puede definir según convenga, es decir se puede estudiar la red completa o dividirla en sectores. Los elementos no integrados en él contribuyen con energía “de flujo” mientras que los internos pueden almacenar más o menos energía (depósitos) o disiparla (tuberías y válvulas). Se evidencia la diferencia entre elementos externos e internos al volumen de control, un embalse (punto de captación) es externo y un depósito es interno. Las bombas, siendo externas al volumen de control, aportan trabajo de eje, mientras que la superficie de salida del sistema la integran las acometidas de los usuarios y las fugas. La siguiente figura representa el volumen de control así como los flujos (entrantes y salientes) de agua y energía.



**Figura 8. Términos que intervienen en el balance energético de una red principal**

Evidentemente la energía se necesita en todas las etapas del ciclo urbano del agua. Por lo que respecta a la distribución de agua potable pueden sintetizarse en:

- Potabilización y presurización del agua en cabecera de la red
- Transporte y distribución a través de la red de tuberías hasta el usuario
- Consumo en usos finales del interior de la vivienda

Evaluando el gasto energético real de cada etapa y relacionándolo con el ideal (calculado admitiendo que no hay pérdidas de ningún tipo) se conoce el sobrecoste energético en que se está incurriendo en cada etapa. Aunque en la práctica es inevitable que dicho sobrecoste exista (las ineficiencias siempre existirán, mayores o menores en función de las circunstancias de cada caso), el necesario peaje debe reducirse lo máximo posible.

El balance de energías exige, pues, plantear la ecuación integral de la energía al volumen de control que se considera (desde el depósito de cabecera hasta los nudos de consumo), lo que equivale a calcular tanto las energías entrantes como las salientes del sistema. Como cualquier balance, éste exige que la suma de todas las energías entrantes sea exactamente igual a la suma de todas las energías salientes. Dicho de otro modo, la energía natural (o gravitatoria) que aporta la propia altura a la que se encuentra el agua en los puntos de suministro en forma de energía potencial, más la energía entregada al fluido por los grupos de presión debe ser igual a la suma de la entregada a los usuarios (en forma de presión), la pérdida en rozamiento del agua

en las tuberías, la disipada en válvulas y, la más ineficaz, la que se pierde embebida en el agua fugada.

### Resultados del balance energético

Aplicando la ecuación integral de la energía al conjunto de la red e individualmente a cada sector de ésta, a partir de los resultados que se obtienen se pueden obtener una serie de conclusiones muy interesantes.

El sistema es energéticamente eficiente, debido principalmente a la situación de los puntos de suministro y a la sectorización de la red, que permite aprovechar al máximo la propia energía natural disponible en el fluido y evitar tener que suministrarla con bombeos. Los cifras que se obtienen indican (Figura 9) que el 72,59% de la energía entrante en el sistema es energía natural, es decir energía potencial disponible gracias a la altura de los puntos de inyección, el pozo Barxell, el Molinar y el Xorrador. Hay un cuarto punto de inyección, el Barranc del Cint, pero tiene escasa entidad y, además, en la actualidad está cerrado. Conviene recordar que, en los últimos años, en el Molinar el agua está disponible a nivel superficial por lo que no se requiere de ningún elemento externo para inyectarla en la red. Por otro lado aunque en el Pozo de Barxell se necesitan bombas, éstas son únicamente para extraer el agua del pozo y situarla a la cota de inyección en las tuberías de suministro. Una vez ingresa en el sistema, las diferencias de cotas bastan para que el sistema funcione con absoluta normalidad.

Por tanto, el 20,65 % de energía entrante en el sistema, es energía aportada por las bombas al agua y que no siendo natural hay que pagar. Corresponde principalmente a la energía del pozo de Barxell y algún rebombeo intermedio de la red, en concreto el de San Antonio, que eleva el agua desde un punto intermedio de la tubería que sale del Molinar hasta el depósito de San Antonio, de manera que el agua queda disponible en el depósito para cuando los usuarios de la Zona Alta de la ciudad la requieran. La energía restante (hasta alcanzar el 100%) es energía almacenada en los depósitos de la red (6,76%). Un valor elevado porque el balance energético se ha extendido sólo sobre 24 horas. De haber considerado un periodo de tiempo superior (por ejemplo un año), este porcentaje sería prácticamente irrelevante.

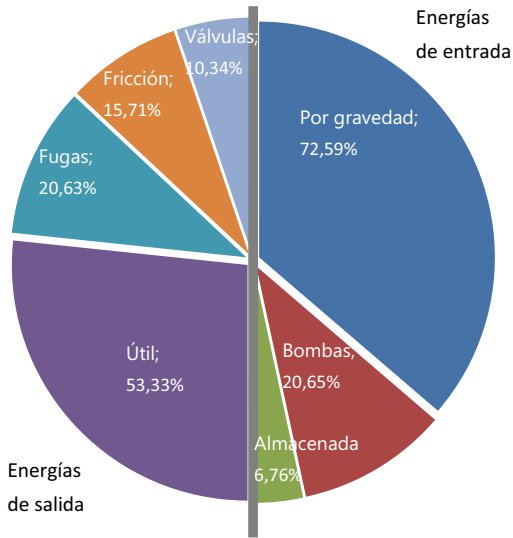


Figura 9. Distribución de las energías de entrada y salida

En cuanto a la energía de salida (corresponde en la Figura 9 al semicírculo de la izquierda), obviamente el mayor porcentaje se lo lleva la energía entregada a los usuarios, ya que al fin y al cabo ese es el objetivo, entregar a los usuarios agua en las condiciones óptimas tanto de presión como de calidad. Un valor elevado porque los niveles de presión de la red son elevados. La Figura 10 presenta la energía diaria propiamente dicha (kWh/día) que cada uno de estos conceptos consume.

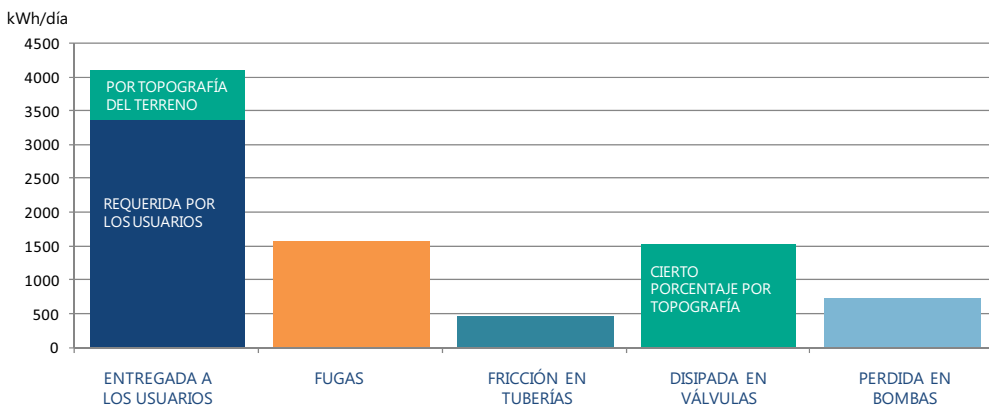


Figura 10. Energía entregada y perdida

A buena parte de los usuarios se les entrega una presión superior a la que necesitan (30 m es previsiblemente la presión establecida generalmente en el contrato de suministro), un exceso de

energía que es consecuencia de los desniveles topográficos del municipio. Porque para que las viviendas de las zonas altas tengan presión suficiente las más bajas tienen agua a una presión superior a la requerida, hecho siempre inconveniente porque las fugas aumentan si bien con un beneficio colateral menor. El beneficio de este exceso de presión, viene por el hecho de que los bloques de viviendas con más de cinco plantas ubicados en estas zonas no precisan de grupos de rebombeo domiciliario. Pero efectuando un balance global, siempre se va a perder más energía con las fugas que la ahorrada en rebombes, no en vano se entiende que 30 m de presión es el valor de referencia en un abastecimiento de agua.

Del resto de sumandos que integran la energía saliente del sistema, destacar que el peaje global que supone la existencia de fugas asciende a 1.587 kWh/día. La manera más sencilla de evidenciar el gasto energético que suponen las fugas es calcular y comparar dos escenarios uno con fugas y otro ideal sin fugas.

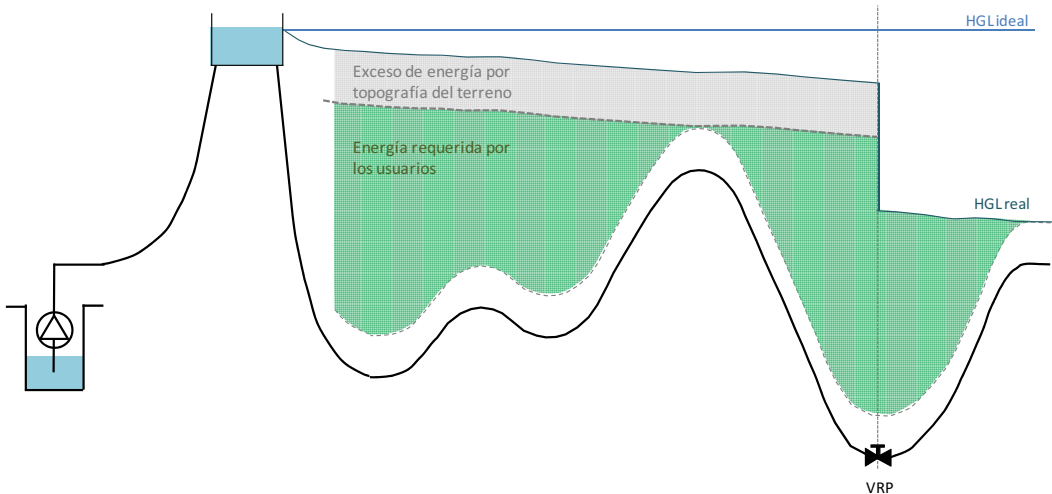
**Tabla 5. Auditoría energética en la red con fugas y sin fugas**

| ENERGÍA                                    |  | ESCENARIO CON FUGAS               | ESCENARIO SIN FUGAS               |
|--|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
|  |  | kWh/día                           | kWh/día                           |
| <b>E<sub>Entrada</sub></b>                 | <b>E<sub>N</sub></b> Energía aportada por los embalses         | 5.766,83                          | 4.989,93                          |
|  | <b>E<sub>P</sub></b> Energía aportada por las bombas           | 1.640,38                          | 1.319,08                          |
| <b>E<sub>Salida</sub></b>                  | <b>E<sub>U</sub></b> Energía entregada a los usuarios          | 4.102,46                          | 4.116,22                          |
|  | <b>E<sub>L</sub></b> Energía asociada a fugas                  | 1.586,82                          | 0                                 |
|  | <b>E<sub>C</sub></b> Energía almacenada en los depósitos       | -537,231                          | 220,016                           |
| <b>E<sub>Disipada</sub></b>                | <b>E<sub>F</sub></b> Energía disipada por fricción en tuberías | 1.208,74                          | 1.001,44                          |
|  | <b>E<sub>FV</sub></b> Energía disipada en válvulas             | 795,082                           | 698,927                           |
| <b>Energía por m<sup>3</sup> inyectado</b> |  | <b>0,636443 kWh/m<sup>3</sup></b> | <b>0,559385 kWh/m<sup>3</sup></b> |
| <b>Energía por m<sup>3</sup> consumido</b> |  | <b>0,854558 kWh/m<sup>3</sup></b> | <b>0,654973 kWh/m<sup>3</sup></b> |

En consecuencia reduciendo las fugas en la red se ahorraría la energía en ellas embebida. Si bien en la actualidad la energía entrante en el sistema es en su mayoría natural y por tanto “gratuita”, esta situación (vigente desde el año 2010) es excepcional debido a que el manantial del Molinar se encuentra en una situación extraordinaria de abundancia, lo que no sucedía

desde 1995. Pero no siendo lo habitual (en cuanto un nuevo periodo seco haga acto de presencia se acabará), es necesario contemplar escenarios más desfavorables. Vale la pena estudiar soluciones a este escenario más desfavorable ahora con calma, y no con prisas cuando venga, y más siendo conscientes que seguro se dará por la propia naturaleza de las cíclicas situaciones de sequía. Es obvio que el interés por optimizar el uso de la energía es proporcional a su precio, y así lo evidencia la correlación que existe entre la evolución del gasto en I+D+I en los países de la International Energy Agency, IEA y del precio del barril de petróleo.

El resto de términos que integran la energía saliente del sistema corresponden a la fricción del agua en las tuberías (pequeña y por debajo de lo habitual en estos sistemas, consecuencia del sobredimensionado de la red), a la disipada en las válvulas así como a las ineficiencias de los bombeos. La energía de fricción que se pierde en las válvulas es relevante porque es necesario disminuir la elevada presión del agua en muchos puntos de la red. Y es que aún siendo las presiones elevadas (ver Tabla 4), aún más lo serían si las válvulas reductoras de presión no la rebajaran de modo significativo.



**Figura 11.** Simplificación de la influencia de las VRP en el consumo energético

A la vista del esquema anterior que trata de explicar de una manera muy simple el efecto de las válvulas reductoras de presión en la energía disponible en el sistema, es evidente que al igual que la válvula reduce la presión aguas abajo de ella, reduce (disipa) proporcionalmente la energía asociada a esa presión.

El término correspondiente al rendimiento de las bombas, si bien siempre será inevitable, puede reducirse con bombas más eficientes y que operen en su punto de funcionamiento óptimo. Por último destacar la conveniencia de regular la estación de bombeo de modo que sólo funcione cuando el precio de la energía eléctrica sea menor.

El abastecimiento cuenta con un notable sistema de control en los grupos de presión que los ponen en marcha bajo diferentes circunstancias dependiendo de la hora del día, incluso dependiendo de si se trata de invierno o verano. Esto se debe a que el precio del kWh varía en función de si se consume por el día, que es más caro, o por la noche que es más barato, además las franjas horarias que fijan los conocidos como períodos punta, valle o llano, también varían dependiendo del horario estacional.

Así pues, se trata de favorecer el bombeo en horas valle y evitar en la medida de lo posible, poner las bombas en marcha en horas punta, esto se consigue fijando diferentes niveles límite en los depósitos que arranquen o paren las bombas. Es decir, el nivel máximo de agua que se puede alcanzar en un depósito antes de parar la bomba que lo está llenando será mayor en horas valle que en horas punta, del mismo modo que el límite inferior será menor en horas valle que en horas punta, lo que se traduce en que el rango de niveles para el funcionamiento de las bombas es mayor cuando la energía es más barata, de manera que éstas estarán más tiempo paradas cuando el precio del kWh sea mayor.

Ello implica disponer un complejo sistema de control sobre los grupos de presión que arranquen y paren en función del nivel de agua de los depósitos y que, al tiempo, eviten el funcionamiento durante las horas punta en que la energía es más cara. En definitiva se trata de disminuir el gasto económico, que no el energético, manteniendo la calidad y garantía de suministro.





## Caracterización de los usos finales de los abonados

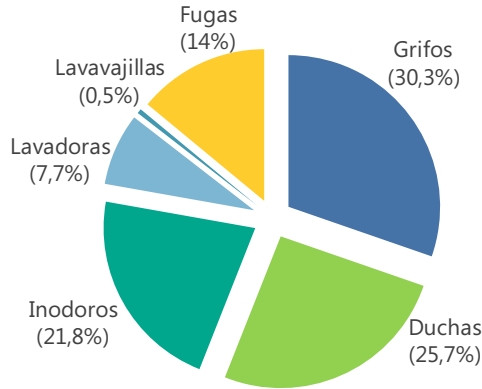
Una de las etapas energéticamente más consuntiva del ciclo urbano del agua es la que corresponde a su uso en el interior de las viviendas. Suele representar el 75% de la energía requerida en todo el ciclo urbano. Esta energía se emplea tanto en calentar agua en duchas y cuartos de baño como en suministrar energía a los aparatos que necesitan agua para funcionar (lavadoras y lavavajillas principalmente).

Para conocer el gasto energético asociado a los usos finales es necesario en primer lugar identificar la demanda de agua unitaria correspondiente. A continuación seleccionar qué usos finales requieren energía (usos térmicos). Y finalmente, valorar los saltos térmicos requeridos, dependientes de la climatología de la ciudad.

La primera etapa, identificar la demanda unitaria de cada uno de los usos finales, requiere de una campaña de medición exhaustiva y detallada realizada sobre un muestro de usuarios suficientemente amplio. La campaña de medición realizada durante este trabajo, aunque no fue lo suficientemente representativa como para llegar a conclusiones concretas al respecto, sus resultados han permitido asociarlos con estudios previos más exhaustivos realizados por el ITA y con la abundante bibliografía al respecto existente. Ello nos ha llevado a proponer la distribución que detalla la adjunta Figura 12. Como se aprecia, el mayor porcentaje de utilización corresponde a los grifos, seguido de duchas e inodoros.

La siguiente pregunta a responder es qué parte de este consumo corresponde a agua fría y qué proporción a agua caliente. De nuevo debemos recurrir a mediciones realizadas en poblaciones de características similares a las de Alcoi. La distribución supuesta es la que a continuación se detalla:

- Fugas, todas son de agua fría (boyas que no cierra, grifos que gotean, etc.). Difícilmente pueden corresponder a agua caliente.
- Grifos, un 60 % corresponde a agua fría. El 40 % restante a agua caliente (fregaderos, bidés, etc.)
- Duchas, sólo un 20 % a agua fría. El resto agua caliente.
- Inodoros, todo corresponde a agua fría.
- Lavadoras, al 50 % el lavado de ropa con agua fría y otro 50 % con agua caliente.
- Lavavajillas, el 10% con agua fría. La mayor parte (el 90% restante) con agua caliente.



**Figura 12.** Distribución del consumo de agua en usos interiores

Se supone, por tanto que el consumo de agua fría es el 63% del total, mientras que el resto requiere calentarse. Son unos porcentajes en línea con los valores que aparecen en la literatura.

A partir del valor de volumen registrado en la red y con los porcentajes de distribución de agua fría y caliente se conocen los volúmenes destinados a cada uso, eliminando del volumen registrado el que corresponde a jardines, riegos, comercios, oficinas e industrias, ya que estas últimas puede asumirse que poseen una distribución de consumo diferente a la de las viviendas (Figura 12) y que, aunque en algunos casos requieran calentar agua para su proceso productivo, es distinto a la distribución doméstica.

Determinar la energía térmica necesaria para calentar el volumen de agua en cada caso, en términos básicos, es un cálculo sencillo que depende del calor específico del agua (1 cal/g °C) y del rango de elevación de temperatura que dependerá del uso final. Esta cifra energética es la que se puede considerar como energía útil (la necesaria para calentar el agua) pero evidentemente el total de energía necesaria para esta última etapa será algo mayor debido a los rendimientos reales de los sistemas de producción, los calentadores eléctricos, las calderas de gas, etc.

Las dos tablas que siguen resumen las hipótesis realizadas y los resultados obtenidos:

**Tabla 6.** Cálculo de la energía asociada a usos finales

| Cálculo de la energía asociada a usos finales |                                 |         | m <sup>3</sup> /Trimestre | Salto térmico | KWh /trimestre |
|---|---------------------------------|---------|---------------------------|---------------|----------------|
| Uso final del agua caliente                   | % Utilización sobre el total AC | T final |                           |               |                |
| Grifos  | 12,12                           | 50      |                           |               |                |
| Duchas  | 20,56                           | 45      |                           |               |                |
| Lavadora                                      | 3,85                            | 40      |                           |               |                |
| Lavavajilla                                   | 0,45                            | 60      |                           |               |                |

**Energía asociada al uso final del agua en Alcoi por trimestres del 2012**

| Trimestre | m <sup>3</sup> /Trimestre     | Temp media del agua en la red | KWh /trimestre        | KWh /m <sup>3</sup>      |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1 TRIM    | 766.706 m <sup>3</sup>        | 12,4 °C                       | 14.898.276,32 kWh/T   | 19,43 kWh/m <sup>3</sup> |
| 2 TRIM    | 745.403 m <sup>3</sup>        | 20,8 °C                       | 10.895.374,75 kWh/T   | 14,62 kWh/m <sup>3</sup> |
| 3 TRIM    | 797.550 m <sup>3</sup>        | 26,5 °C                       | 9.097.562,90 kWh/T    | 11,41 kWh/m <sup>3</sup> |
| 4 TRIM    | 752.455 m <sup>3</sup>        | 14,9 °C                       | 13.543.114,41 kWh/T   | 17,99 kWh/m <sup>3</sup> |
| TOTAL     | 3.062.115 m <sup>3</sup> /año |                               | 48.434.328,38 kWh/año | 13,08 kWh/m <sup>3</sup> |

Cual se aprecia la intensidad energética (kWh/m<sup>3</sup>) correspondiente al calentamiento del agua es muy elevada y oscila entre los 19,43 kWh/m<sup>3</sup> del trimestre más frío y los 11,41 kWh/m<sup>3</sup> del trimestre veraniego. La media anual ponderada, cociente entre la energía anual demandada por los usos finales (48.434.328 kWh/año) y el volumen total consumido por los usuarios (3.062.115 m<sup>3</sup>), es 15,81 kWh/m<sup>3</sup>, un valor que disminuye hasta los 13,08 kWh/m<sup>3</sup>, cuando se divide por el volumen total consumido 3.703.319 m<sup>3</sup>/año (doméstico y no doméstico). Estos valores están en sintonía con los que figuran en recientes trabajos que abordan el mismo asunto (Abdallah and Rosenberg, 2012).



## Energía asociada al drenaje y la depuración

Conviene destacar que no ha sido objeto de este trabajo el análisis de estas dos últimas etapas del ciclo urbano del agua, el drenaje y la depuración. Los datos de la depuradora (correspondientes al año 2012) han sido facilitados por FACSA, la empresa encargada de su gestión. Por tanto, sólo se cuenta con dos datos, el volumen anual de agua tratada y la energía consumida para ese mismo periodo de tiempo.

Según FACSA el volumen que llega a la depuradora ( $6.457.161 \text{ m}^3$ ) es muy superior al volumen que, a priori, cabría esperar y que no es otro que el correspondiente al registrado en los contadores de los abonados más el subcontaje, es decir el volumen consumido por los usuarios y que éstos devuelven a la red de drenaje. Sin entrar en el estudio detallado de estas discrepancias (el volumen que ingresa en la depuradora se mide en el punto de entrada por un caudalímetro por lo que hay que suponer que es correcto el dato aportado por FACSA), parece lógico admitir que, siendo la red de drenaje unitaria, parte del volumen adicional registrado corresponda a agua de lluvia. El resto puede proceder de usos de agua no controlados, bien independientes, alimentados directamente con pozos privados (sobre todo industrias) bien sencillamente ilegales.

Dado que no se dispone de más datos sobre la red de drenaje de la ciudad, no es posible profundizar más en este asunto. Pero conviene recordar que las depuradoras de aguas residuales consumen mucha energía y al tiempo ofrecen enormes posibilidades de recuperar parte de la energía embebida en la materia orgánica que las aguas residuales transportan.



## Síntesis de la huella energética del ciclo urbano del agua de Alcoi

Estudiadas todas las etapas del ciclo urbano del agua en Alcoi, se está en disposición de caracterizar la huella energética del agua (HEA) en una de las etapas. Se presenta a continuación una imagen que sintetiza los resultados obtenidos en cada etapa del ciclo urbano del agua analizado.

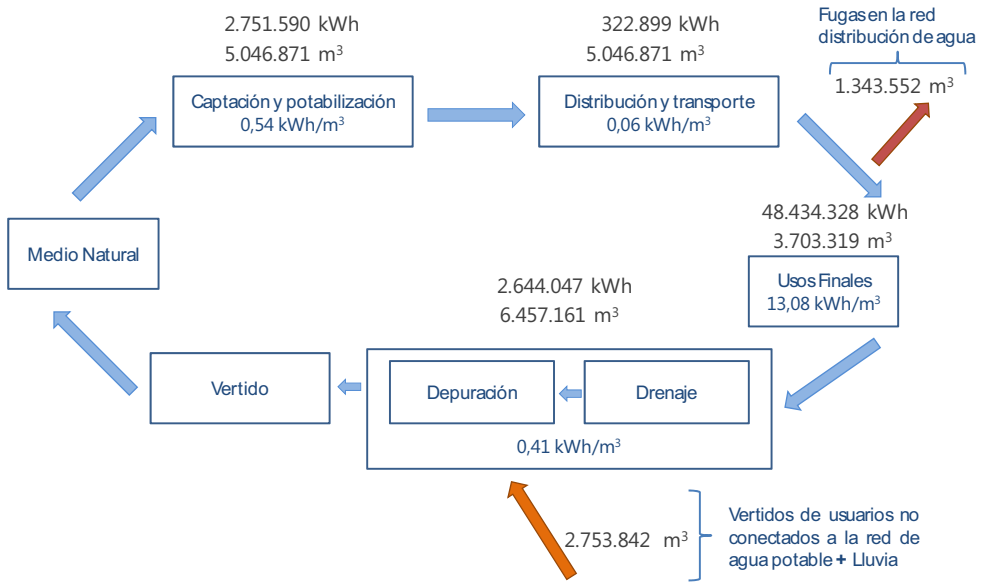


Figura 13. Huella energética del ciclo urbano de Alcoi

El peso mayor corresponde a los usos finales, un término que suele pasar desapercibido porque es pagado por decenas de miles de usuarios y sobre el que se tiene escasa capacidad de actuación. Un valor que prácticamente coincide con el detallado en un reciente trabajo publicado en Australia (Cook et al., 2012). Un estudio que concluye que las compañías de agua sólo son responsables del 12% de la energía ligada a la ciudad. En el caso de Alcoi lo son del 10,56 % cuando hay abundancia de agua y alguna décima más (10,80 %) cuando en el manantial del Molinar el agua deja de manar de modo natural. De hecho se ha estimado también la huella energética de Alcoi en periodos secos y la única diferencia está, obviamente, en la primera de las etapas que pasa de 0,54 kWh/m<sup>3</sup> a 0,57 kWh/m<sup>3</sup>.



A la vista de la figura precedente, y más allá de evidenciar lo previsible, que el mayor gasto de energía del ciclo urbano del agua se concentra en el calentamiento del agua en los hogares, es destacable la eficiencia energética en las primeras etapas del ciclo. De una parte en la captación del agua que, cual se ha dicho, se beneficia de la energía natural del agua en cabecera (altura de los puntos de captación). De otra, en la etapa de distribución y transporte, consecuencia de una red sobredimensionada, un nivel de fugas razonable y una gestión eficiente.

## Determinación de los gases de efecto invernadero (GEI) ligados al ciclo del agua de Alcoi

Las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen del tipo de energía utilizada. Las fuentes renovables son muy limpias y no generan emisiones. Justo lo contrario de lo que sucede con los combustibles fósiles que consumen las centrales térmicas. Particularmente contaminantes son las que utilizan como fuente de energía el carbón.

Teniendo en cuenta la energía asociada a cada etapa y considerando que la energía natural (gravitatoria) no emite GEI, en la primera de las etapas sólo hay que considerar la energía de eje, es decir la energía eléctrica necesaria para poner en marcha las bombas. En todas las etapas, excepto la de los usos internos, el origen de la energía es eléctrico. Y en cuanto a los usos internos, cabe desagregar la energía térmica del agua en función de su procedencia (calentador eléctrico, de butano y de gas natural). Por último hay que relacionar los kWh de cada fuente con los gases de efecto invernadero que generan. A partir de cuanto antecede se ha elaborado la siguiente tabla:

**Tabla 7. Emisiones de GEI del ciclo urbano del agua en Alcoi**

| Fuente de energía | kWh/año             | kg CO <sub>2</sub> /kWh | kg CO <sub>2</sub> /año |
|-------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Eléctrica         | 22.896.446,2        | 0,27                    | 6.182.040,47            |
| Butano            | 19.373.731,2        | 0,24                    | 4.649.695,49            |
| Gas natural       | 9.686.865,6         | 0,20                    | 1.937.373,12            |
| <b>TOTAL</b>      | <b>51.957.043,0</b> |                         | <b>12.769.109,1</b>     |

En definitiva, el ciclo urbano del agua de Alcoi emite anualmente a la atmósfera 12.769 Tm de GEI. Una cantidad notable que evidencia la enorme importancia energética del ciclo urbano del agua y la necesidad de ir adoptando medidas que contribuyan a disminuir la factura ambiental que la Sociedad paga por disponer de una comodidad irrenunciable, agua potable y, cuando ello conviene, caliente en el interior de las viviendas.

Con los análisis realizados se dispone de la información necesaria para cuantificar las ventajas ambientales que pueden representar las diferentes mejoras potencialmente realizables y que, generalizando más allá de Alcoi, pueden seguir dos estrategias distintas. De una parte las que pueden implementar las compañías que gestionan el ciclo urbano del agua y de otra las que puede articular la administración fomentando el uso de fuentes de energía menos contaminantes y un consumo de agua más eficiente y responsable.



## Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos, y de los que aquí sólo se ha presentado una síntesis, han permitido identificar un conjunto de acciones encaminadas a reducir el gasto energético en las etapas competencia de la compañía gestora de agua.

### Propuestas de mejora extraídas del estudio realizado

Las propuestas extraídas se pueden ordenar en tres grupos:

#### Reducción del volumen fugado

La primera de las mejoras consiste en reducir el volumen fugado en todos los sectores de la red y que en función del volumen de fugas de partida, las posibilidades de mejora serán bien distintas. Para establecer un criterio uniforme se puede fijar un nivel de pérdidas de agua objetivo que sea proporcional a la longitud de las tuberías de cada sector (el indicador es  $m^3/km$  h). Una vez establecido se puede estimar la reducción de fugas que es razonable alcanzar en cada sector. Y así en la zona abastecida desde el depósito de Llençols se podría llegar a reducir el volumen fugado desde el 21% hasta el 8,5%, en Batoi del 25% al 14,9%, en el Camí del 26 % al 7,5% y en San Antonio, el sector más desfavorable del 32% al 10%. Estos porcentajes en valores absolutos se traducen en una disminución del volumen fugado de más 20% de las fugas actuales, lo que supondría un rendimiento global volumétrico del sistema que alcanzaría el 90% (frente al 73,38% actual).

Ahora bien, aumentar el rendimiento volumétrico de la red hasta este valor tan favorable, puede ser una actuación complicada y costosa de la empresa suministradora, pues requiere realizar una completa campaña de detección de fugas y una revisión del parque de contadores, si bien esta reducción del volumen fugado puede suponer un potencial ahorro económico asociado al uso de energía eléctrica de hasta 5244 €/año, más aun si consideráramos la situación más desfavorable que contemplara impulsar agua desde El Molinar, 13.664 €/año.

Tampoco conviene olvidar la existencia del punto óptimo (desde la óptica económica) de fugas de una red. Rebajar las fugas tiene, de una parte, un coste económico y de otra un ahorro (costes variables del agua, que se ahorra, entre ellos energético). El balance coste beneficio final indica las fugas de agua que conviene, desde la óptica económica, evitar. De hecho tanto ésta como todas las medidas que siguen, está pendiente de realización de ese análisis.

### Nuevo esquema de funcionamiento del rebombeo de San Antonio

Se trata de una de las medidas más obvias a simple vista ya que desde el punto de vista energético no tiene mucho sentido bombear el agua una altura importante, hasta el depósito de San Antonio, dándole al agua una energía innecesaria. En cualquier caso, desde el punto de vista de la calidad del suministro y teniendo en cuenta la complejidad topográfica de esta zona la solución actual puede entenderse.

La dificultad de una nueva configuración reside principalmente en la ubicación de una nueva bomba que apoye a la ya existente y que suministre el agua directamente a la zona baja (evitando el innecesario bombeo hasta el depósito de San Antonio), y en el diseño de un nuevo trazado que alimente la nueva bomba. En definitiva la modificación consiste en abastecer desde el depósito únicamente los usuarios que se encuentran en una cota superior, más cercana a la altura del depósito y que el resto del sector que se abastezca en directo con la nueva bomba, evitándose la actual sobreelevación de buena parte del agua que consume este sector. Se muestra a continuación un esquema que ilustre la medida propuesta (Figura 14).

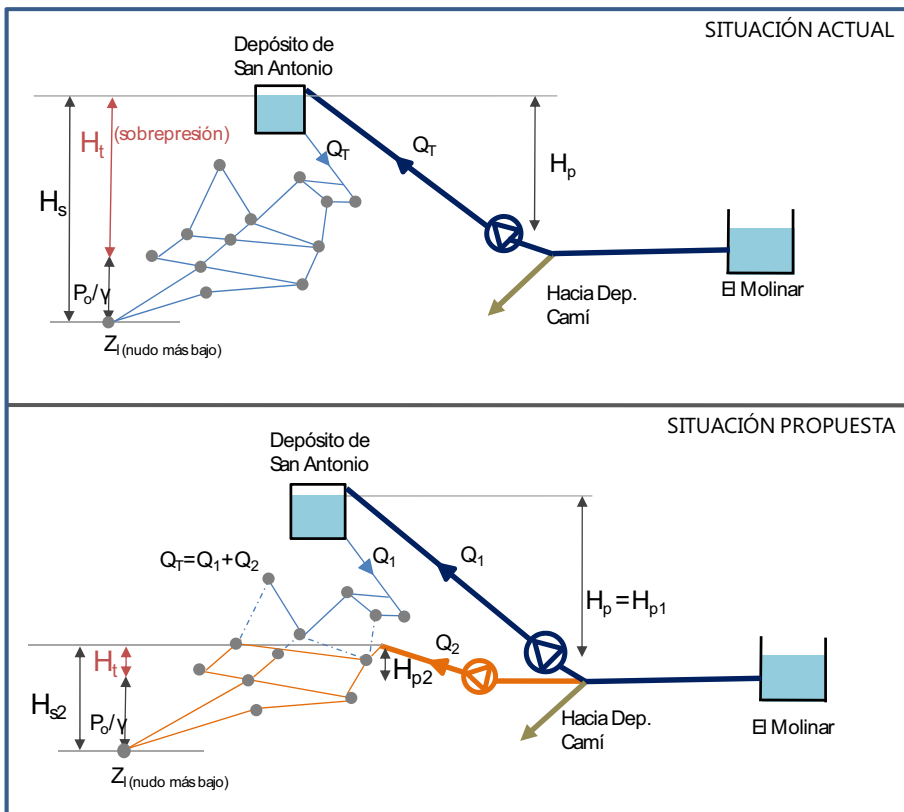


Figura 14. Esquema del funcionamiento propuesto del Rebombeo de San Antonio

Los cálculos realizados con ayuda del modelo matemático de la red (que permite introducir y modificar condiciones de funcionamiento de una manera relativamente sencilla y fiable) indican que la nueva bomba funcionaría las 24 horas del día según la demanda de los usuarios y la bomba actual trabajaría sólo una hora al día, lo que reduciría la energía de eje que la zona demanda en 324 kWh/día, que comporta un ahorro de 15.330 €/año.

Conocido el ahorro calculado, queda pendiente estimar el gasto necesario. Es decir, calcular la inversión necesaria, que debe contemplar además del gasto que supone instalar una nueva bomba, las nuevas conducciones. O sea, el análisis coste – beneficio de la actuación.

### Instalación de turbinas para la recuperación de la energía

Planteamos ahora el resultado más significativo de este estudio, la posible instalación de una bomba funcionando como turbina o PATs (Pump as turbine), con el objetivo de recuperar parte de la energía topográfica almacenada por el fluido. En este caso ya no hablamos de ahorro ya que la configuración del sistema hace inevitable que exista un exceso de presión en algún punto del sistema, y se trata de estudiar la posibilidad de recuperar el exceso de energía gravitatoria.

Se simula la instalación de este tipo de elementos en un punto concreto de la red, en concreto en la tubería que proviene del punto de suministro más alto del municipio, y justo a la entrada de uno de los depósitos de regulación. En la actualidad por la tubería que une la salida de la bomba con el primer depósito circula un caudal medio de unos 80 l/s y con una presión importante, del orden de 100 metros de columna de agua. Esa presión es el resultado de la diferencia entre la altura disponible en cabecera menos la pérdida de carga existente en una tubería de 6,5 km que une el pozo con el primer depósito.

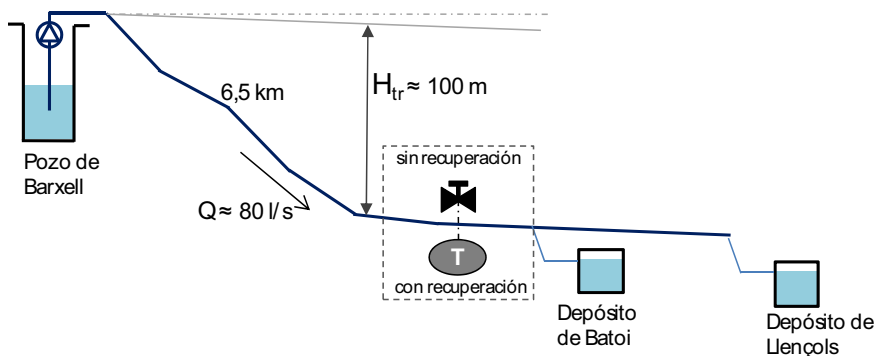


Figura 15. Esquema del punto de instalación propuesto del PATs

Se puede estimar que, con una previsión del rendimiento de la turbina del 80%, la energía que se podría recuperar (generar) en lugar de disipar instalando un PATs sería de unos de 631,2kWh/día (un notable valor pues representa el 7,5% de la energía total que el sistema consume entre la captación y transporte). Admitiendo un precio de venta de la energía de 0,1 euros/kWh, los ingresos económicos asociados a su instalación sería de 22.995 €/año, cantidad muy interesante.

Ahora bien, como todas las propuestas de mejora que se han planteado, requiere un preciso análisis coste-beneficio. El material de la tubería en cuestión es fibrocemento y, además, es bastante vieja. Por tanto no conviene olvidar sus potenciales limitaciones estructurales. Pero como es una acción muy atractiva, tanto en el plano económico como en el ambiental, merece la pena realizar un análisis en profundidad.

En cualquier caso el potencial ahorro calculado, la idoneidad de las características de esta zona de la red para recuperar y lo atractivo y novedoso de la instalación, bien justifica la necesaria inversión del tiempo que requiere realizar el análisis.

## Conclusiones

La primera etapa del proyecto centrada en la elaboración del modelo matemático de la red, ha puesto a disposición de aqualia una herramienta calibrada y válida que le facilita el análisis del comportamiento del sistema ante variaciones de la demanda, estudiar posibles cambios en el funcionamiento de la red así como la simulación de emergencias para estudiar las medidas que, en tales supuestos, conviene adoptar.

La auditoría hídrica realizada, determina el nivel de fugas reales del sistema, en torno al 21%, un nivel de agua fugada admisible, inferior a la media nacional y ello pese al elevado nivel de presiones de la red. El indicador unitario ( $m^3/km$  y hora) se ha utilizado para identificar los sectores que merecen una especial atención tanto por lo que se refiere a la regulación de sus presiones como a la entidad del caudal fugado, dos cuestiones estrechamente relacionadas.

El estudio de las energías asociadas a la distribución de agua, ha puesto de manifiesto un comportamiento adecuado del sistema y, al tiempo, ha permitido identificar las medidas que aumenten esa eficiencia y, en consecuencia, reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero, además del consiguiente ahorro económico.

El estudio de la energía asociada a los usos finales del agua, ha permitido cuantificar la huella energética del agua para todo el ciclo urbano, poniendo de manifiesto que la mayor parte de la energía asociada al ciclo urbano del agua se invierte en su calentamiento.

Por último el estudio ha sentado las bases de partida, permitiendo a los agentes implicados en la gestión del agua de la ciudad conocer las estrategias que conducen hacia una gestión más sostenible del agua. Por tanto, perfectamente identificado el punto de partida, y con la voluntad de avanzar hacia un sistema que apenas emita gases de efecto invernadero (neutral en carbono) es mucho más fácil acertar en el camino que conviene seguir para alcanzar ese logro. Las futuras generaciones merecen que los promotores del estudio sigan en el empeño.





## Referencias

Addallah A.M., Rosenberg D.E., 2012. *Heterogeneous Residential Water and Energy Linkages and Implications for Conservation and Management* Journal of Water Resources Planning and Management, December, 2012).

Alegre, H., Baptista, J.M., Cabrera Jr., E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W. y Parena, R. (2006). *Performance Indicators for Water supply Services*. Second Edition manual of Best Practices. London IWA.

Almandoz J., Cabrera E., Arregui F., Cabrera E. Jr., Cobacho R., 2004, *Leakage assessment through water networks simulation*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE.

Cabrera, E., Almandoz, J., Arregui, F. y García-Serra, J. , 1999. *Auditoría de Redes de Distribución de Agua*. Ingeniería del Agua. Vol 6. Nº 4. Dic. 1999.

Cabrera, E., Espert, V., García-Serra, J. y Martínez , F., *Ingeniería Hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua*. 3ª Edición, 2009. Universidad Politécnica de Valencia

Cabrera, E., Pardo M. A., Cobacho, R. y Cabrera E. Jr., 2010. *Energy Audit of a water Distribution network*. Journal of Water Resources Planning and Management American Society of Civil Engineering.

CEC (California Energy Comision), 2005, *California´s Water- Energy Relationship. Final staff report. CEC 700 – 2005 – 011 SF*, California Energy Comision. State of California. November de 2005

Cook S., Hall M. and Gregory A, 2012 *Energy use in the provision and consumption of urban water in Australia: an update*. Water Services Association of Australia

IEA (International Energy Agency), 2008. *Energy Technology Perspectives. Scenarios & Strategies to 2050*.

IWA, 2000. *Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures*. IWA, International Water Association- Task Force on Water Losses, London, August 2000.

Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P., Stouffer, J., 2008, *Stationarity Is Dead: Whither Water Management?* Science. Febrero 2008. Vol. 319. no. 5863, pp. 573 – 574

Rossman, L.A. 1993. *EPANET User's Manual*. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio.





