

05-036

### HEURISTIC OPTIMIZATION MODEL IN PROJECTS TO IMPROVE THE WATER AND ENERGY EFFICIENCY OF SUPPLY NETWORKS

Lozano Cortes, Jessica Vanessa<sup>(1)</sup>; Iglesias-Rey, Pedro L.<sup>(1)</sup>; Martínez-Solano, F.Javier<sup>(1)</sup>; López-Patiño, Gonzalo<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Universitat Politècnica de València

The drought that affects Spain and the large increase in energy costs have generated in recent years an increase in projects to improve both water and energy efficiency of water distribution networks.

This paper presents a methodology for the development of this type of projects that is based on a heuristic optimization model of the main operations that can be performed on the system. This is based on a calibrated model of the network in which existing leakage flows in the system have been represented as pressure-driven demands. Subsequently, the potential locations of the points at which pump drives are controlled as well as the installation of control points and pressure reduction are analyzed. From here, the heuristic optimization algorithm determines the best combination of the pump operation and the pressure reducing valves position. The objective is to find a balance between water consumption and energy consumption. Finally, the method is applied to the case of the water supply network of L'Olleria (Valencia).

**Keywords:** *Energy efficiency; water efficiency; Water supply network; heuristic optimization*

### MODELO DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA EN PROYECTOS DE MEJORA DE LA EFICIENCIA HÍDRICA Y ENERGÉTICA DE REDES DE ABASTECIMIENTO

La escasez de agua que afecta a España y los crecientes aumentos de los costes energéticos han generado en los últimos años un aumento de los proyectos para la mejora de la eficiencia tanto hídrica como energética de las redes de distribución de agua.

Este trabajo presenta una metodología para el desarrollo de este tipo de proyectos que tiene su base en un modelo heurístico de optimización de las principales operaciones que pueden realizarse sobre el sistema. Se parte así de un modelo calibrado de la red en el que se han representado como consumos dependientes de la presión los caudales de fuga existentes en el sistema. Posteriormente, se analizan las potenciales ubicaciones de los puntos en los que se puede controlar tanto los accionamientos de las bombas como la instalación de puntos de control y reducción de la presión. A partir de aquí el algoritmo heurístico de optimización desarrollado determina la mejor combinación de la operación de las bombas y de los actuadores de las válvulas reductoras de presión. El objetivo es encontrar un equilibrio entre consumo de agua y consumo energético. Finalmente, el método se aplica al caso de la red de abastecimiento de agua de L'Olleria (Valencia).

**Palabras clave:** *Eficiencia energética; eficiencia hídrica; red de abastecimiento de agua; optimización heurística*

Correspondencia: Pedro L. Iglesias (piglesia@upv.es)



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

El cambio climático ha tenido grandes impactos en las labores diarias del hombre y los recursos disponibles a explotar, entre estos se destaca la disminución de la cantidad de agua dulce disponible. Por otra parte, se ha evidenciado un aumento de la población en ciudades focalizando la necesidad de agua aún más en las urbes, basado en el crecimiento demográfico (Unicef, 2012). Adicional a los factores de estrés hídrico, se evidencia el aumento de las tarifas eléctricas en los últimos años fundamentada en las variaciones de los precios de los combustibles fósiles y la disminución de temporada de lluvias derivada del cambio climático (Antolín, 1999). Estos han sido factores determinantes en los costos y calidad del servicio de agua potable a nivel mundial. Por ello los proyectos de optimización hídrica y energética resultan fundamentales en la actualidad.

Hoy en día existe una tendencia cada vez mayor al desarrollo de herramientas de optimización para la mejora de la eficiencia de las redes de abastecimiento de agua (RDA), y esta optimización puede ser realizada en base a múltiples metodologías. Sin embargo, sus resultados no podrán ser aplicados de forma adecuada y veraz sin un modelo correctamente calibrado. Los modelos son herramientas de diseño, optimización y simulación determinantes en la toma de decisiones para las RDA. No obstante, a menudo estos están realizados de forma incorrecta por falta de información, por los costos adicionales que conllevan, por la falta de actualización de las modificaciones realizadas a lo largo de los años, y por ende no representan las condiciones reales. Por esto, las labores de optimización de un modelo sin calibrar correctamente son ineficientes, y no brindaran los resultados esperados en relación a la disminución de fugas y costos energéticos obtenidos teóricamente.

Este trabajo se presenta una metodología que combina el desarrollo, calibración y simplificación de un modelo matemático de una RDA con la posterior utilización de un algoritmo heurístico de optimización para la mejora de la eficiencia hídrica y energética de un sistema de distribución de agua (SDA). Para ello se realiza una representación especialmente cuidadosa de los caudales fugados, que son representados como consumos dependientes de la presión.

Tras la construcción básica del modelo matemático se aplican diversas técnicas de calibración del modelo y de simplificación del mismo. Posteriormente, tras simplificar la red, el algoritmo heurístico de optimización desarrollado determina la mejor combinación de la operación de las bombas y de los actuadores de las válvulas reductoras de presión. La finalidad es encontrar un equilibrio entre el consumo de agua, el consumo energético y la inversión necesaria. Finalmente, el método se aplica al caso de la RDA de L'Olleria (Valencia).

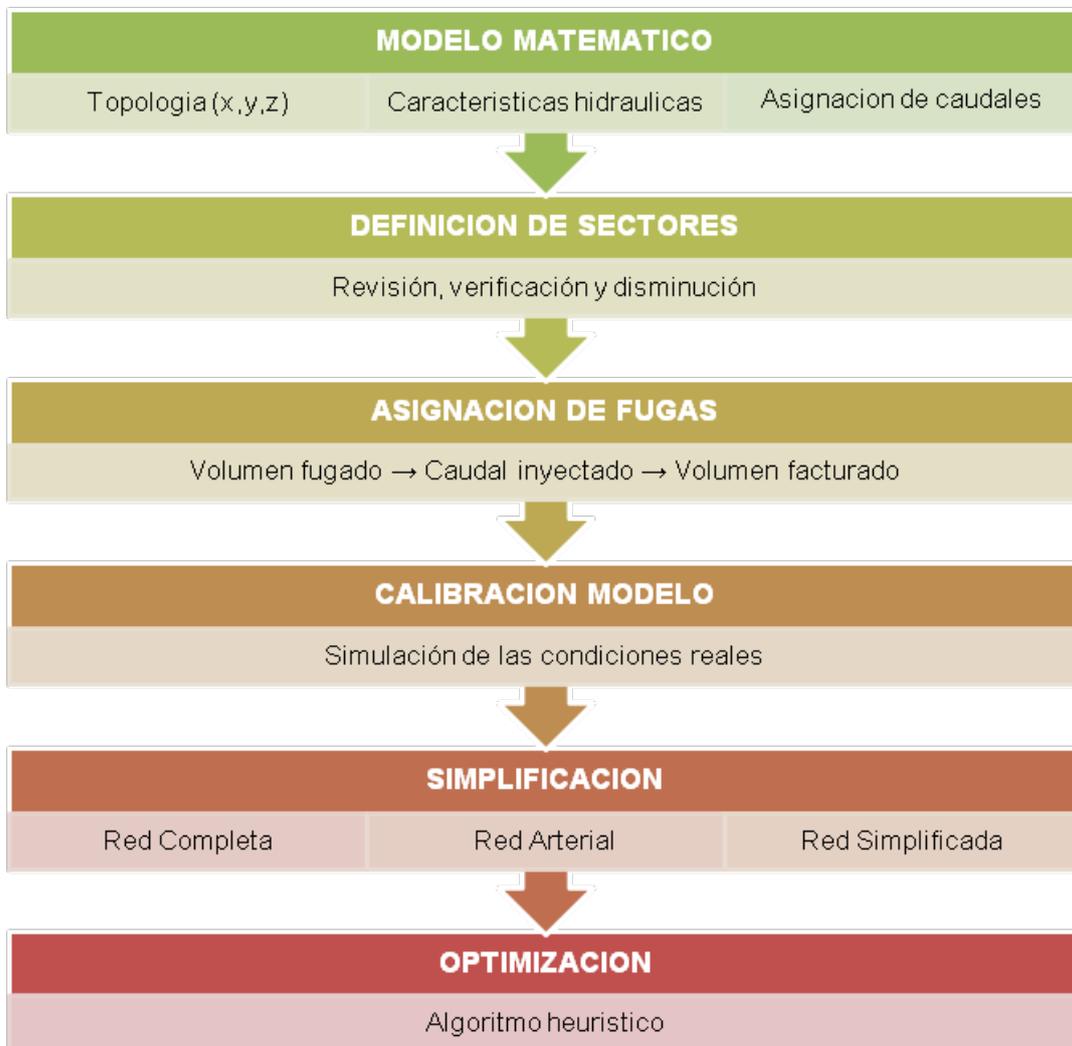
## 2. Metodología

En este apartado se describirá con detalle la metodología propuesta para el desarrollo de proyectos que tienen como objetivo la mejora de la eficiencia energética o la mejora hídrica de cualquier SDA. En la Figura 1 se ilustra el esquema general de la metodología propuesta en el presente documento. Esta metodología identifica los procedimientos y las diferentes etapas que deben desarrollarse para cumplir los objetivos planteados.

La primera fase de la metodología consiste en el desarrollo del modelo matemático de la red. En este caso se ha optado por utilizar el modelo EPANET (Rossman, 2003). Esta fase consta de tres etapas diferentes. En la primera es necesario contar con la información topográfica de la zona de estudio. Resulta indispensable garantizar la correcta ejecución de esta etapa, pues con dicha información serán establecidas las longitudes de las tuberías y

cotas de las zonas con los diferentes puntos de demanda. El origen de este tipo de información puede ser múltiple: planos digitales, sistemas de información geográfica o documentación que posean los gestores del SDA. La segunda etapa se centra en establecer las características hidráulicas de la red. Para las conducciones son fundamentales aspectos como el diámetro interior o la rugosidad; para las válvulas, su diámetro y su consigna de funcionamiento; y para las bombas, sus curvas características de altura y rendimiento. Esta información requiere en numerosas ocasiones la visita in situ a las instalaciones, ya que con frecuencia puede no estar disponible. La tercera etapa se centra en la asignación de los caudales, bien sean consumos dependientes o independientes de la presión. El análisis de la facturación disponible permite asignar las demandas independientes de la presión. Este análisis requiere evaluar los volúmenes facturados, las diferentes categorías de uso del agua, la información del contador y su periodicidad de facturación (Laredo, 2005). Adicionalmente de este proceso puede extraerse el volumen de pérdidas de la red que posteriormente será asignado a los nudos mediante una metodología específica (Martínez Solano, Iglesias Rey, & Molina Arce, 2017).

**Figura 1. Esquema general metodología**



La segunda fase se centra en la definición de los sectores en los cuales se va a dividir la red. Esta subdivisión de la red permite controlar mejor los caudales consumidos, detectar adecuadamente el nivel de pérdidas de cada una de las zonas de la RDA y distribuir

adecuadamente las fugas como consumos dependientes de la presión. Adicionalmente, la sectorización es fundamental no solo para simplificar los procesos de optimización y calibración de la red, sino también es considerada una de las mejores metodologías para el control de fugas en las redes de abastecimiento. Esta fase permitirá aplicar técnicas específicas de control del volumen fugado (Martínez Solano, Iglesias Rey, Mora Meliá, & Ribelles Aguilar, 2018).

La tercera fase de la metodología consiste en la asignación de las fugas al modelo. Un modelo representado sin considerar sus fugas no representa fielmente la realidad. Con frecuencia las pérdidas son representadas en los modelos como consumos independientes de la presión. Sin embargo, esta técnica no permite ver los efectos que tiene la implantación de programas de reducción de fugas en base a la disminución de las presiones. Por ello, en esta metodología se emplea el modelo previamente desarrollado por Martínez, Iglesias y Molina (Martínez Solano et al., 2017). En el desarrollo de esta fase es necesario realizar algunas hipótesis, entre las cuales se destacan: los volúmenes suministrados a la red son conocidos, las pérdidas del sistema corresponden a consumos dependientes de la presión y se asume la división de la red en sectores en los cuales se debe contar con un sistema de medición. Es decir, la red está subdividida en diferentes sectores y de cada uno de ellos conocemos la facturación y la evolución del caudal inyectado. Los parámetros a calibrar en esta metodología son el coeficiente global para representar el comportamiento de los consumos dependientes de la presión (en adelante emisores) y el patrón de consumo de los consumos independientes de la presión. El patrón de demanda inicial se asume que sigue el mismo patrón que el flujo suministrado. Con esta hipótesis se calcula la presión media y caudal fugado de cada sector. Si el valor del volumen fugado modelado no coincide con el real, es necesario realizar un proceso iterativo corrigiendo el coeficiente global de los emisores hasta obtener un error válido en la diferencia entre los valores reales y modelados. A continuación es necesario corregir la curva de modulación, donde es necesario no tener en cuenta el caudal fugado para dicho cálculo. Por último, se realizará la verificación de los volúmenes fugados, y se corregirá el coeficiente emisor de ser necesario hasta una tolerancia aceptable.

La cuarta fase corresponde al proceso de calibración. Con el objetivo de desarrollarla se deben ajustar las características físicas de los principales elementos de la red: sistema de llenado de los depósitos, eliminación tuberías de conexión inexistentes, determinación del diámetro equivalente de los depósitos, verificación de las conexiones de las tuberías de salida y entrada de los depósitos, entre otros. Es necesario realizar un análisis y filtro riguroso de los datos del sistema de medición continua disponibles, antes de proceder a su utilización. Como etapa final del proceso de esta fase de calibración se realiza un macromodelo simplificado de la red principal. En esta etapa deben ser usados los niveles en los depósitos previamente calibrados y las demandas registradas de cada sector. Con dicho modelo se busca obtener los coeficientes de rugosidad de las tuberías principales de impulsión, con el objetivo de completar la calibración del modelo.

Como quinta fase se debe proceder a la simplificación de la red. Con ello se busca optimizar los tiempos de trabajo en la posterior etapa de optimización. Se emplean varias metodologías de simplificación entre las cuales se destacan: depuración de datos, eliminación de tramos ramificados, agrupación de pseudonodos y líneas con propiedades idénticas. Empleando una combinación de metodologías se obtiene la mayor eficiencia en el proceso de esqueletización, en vez del uso de solo una (Aoyarzún Constabel, 2011). Al final de esta fase se contarán con 3 modelos diferentes: red completa, red arterial y simplificada. La primera sirve para validar y verificar cualquier actuación que se realice sobre la red. La red arterial es la que representa únicamente las tuberías principales, por lo que es la adecuada para las optimizaciones que consideren únicamente elementos en la misma. Finalmente, la red simplificada incluye una forma esquemática de la red completa que

contiene además de las tuberías principales todos los elementos necesarios para representar adecuadamente la red. Este último modelo es decisivo en la fase de optimización, ya que es el único que permite optimizar las consignas de actuación de las válvulas reductoras de presión que se instalan a la entrada de cada sector.

La última fase correspondiente a la optimización del modelo se realizará por medio de técnicas de tipo heurístico basadas en un algoritmo pseudogenético de optimización (Mora Melia, Iglesias Rey, Martínez Solano, & Fuertes Miquel, 2013) y cuya adaptabilidad a otros modelos de optimización ha sido ya demostrada (Iglesias Rey, Oyarzún Constabel, Martínez Solano, & Martínez Solano, 2012). En el caso analizado, la función objetivo (Ecuación 1) propuesta pretende minimizar la energía eléctrica consumida:

$$\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{NB} \frac{\gamma * Q_{ij} * H_{ij}}{\eta_{ij}} * \Delta t_i * C_i + \lambda_1 * \sum_{i=1}^{Ndep} (Z_{ini_i} - Z_{fni_i}) + \sum_{i=1}^{Nnod} \sum_{j=1}^T \lambda_{ij} * (P_{ij_{min}} - P_{ij}) \quad (1)$$

En la ecuación anterior, el primer término representa el coste energético. Así, T es el tiempo de simulación, NB es el número de bombas del sistema, Ci es el costo de la tarifa eléctrica en cada uno de los periodos considerados; Δti es la duración de cada uno de los intervalos de análisis; γ es el peso específico del agua; mientras que Qij, Hij y ηij representan respectivamente los caudales, altura y rendimiento de cada bomba j en el instante i.

El modelo de optimización pretende garantizar dos condiciones básicas de funcionamiento: garantizar la presión mínima en cada uno de los nudos y garantizar la recursividad de los depósitos (es decir, que el nivel final de los mismos sea al menos igual al inicial). Por ello la función objetivo añade dos términos adicionales. El primero es una penalización en el caso de no verificar la recursividad de los depósitos. Así, λ1 es el factor de penalización relacionado con los niveles en los depósitos que se aplica a la diferencia entre el nivel inicial y final de cada depósito. El segundo término es la penalización por no verificar la presión mínima en los nudos. El término λij corresponde al factor de penalización relacionado con las presiones mínimas requeridas, adoptando un valor nulo en el caso de verificar la presión mínima y adoptando un valor considerablemente alto para que el modelo descarte aquellas soluciones que presentan déficits de presión.

Dentro del proceso de optimización, las variables de decisión son las consignas de arranque y parada de cada uno de los grupos de bombeo, así como las consignas que deben tener cada una de las válvulas reductoras de presión instaladas en el sistema. La consideración de la energía eléctrica como objetivo garantiza tanto la eficiencia energética como la hídrica. La eficiencia energética es directa ya el modelo optimiza directamente energía eléctrica consumida. Sin embargo, la reducción de las pérdidas supone indirectamente una reducción del consumo de agua, lo que conlleva a su vez una reducción de la función objetivo.

### 3. Caso de estudio

A fin de verificar la metodología descrita en el apartado anterior se ha decidido aplicar esta al caso de la red de abastecimiento de agua de L'Olleria (Valencia). Este SDA presenta dos sistemas de bombeo (un pozo y un rebombeo para la zona alta) y cuatro depósitos que se encuentran conectados entre sí, por ende el sistema cuenta con solos dos puntos de almacenamiento: los depósitos de Ermita y Cuerna. Cada punto presenta una estructura circular y rectangular con una capacidad total de almacenamiento de 840 m³ para Cuerna y 2.871 m³ en Ermita. El depósito de mayor capacidad es alimentado por el pozo y este a su vez abastece directamente a los dos sectores principales (zona industrial y casco urbano). Por otra parte, el depósito de Cuerna alimenta a otros dos sectores mucho más pequeños (Llobero y diseminados). La zona de Galim, localizada cerca del casco urbano puede ser

abastecida por cualquiera de los depósitos según la instalación. Sin embargo, la tubería de conexión entre esta zona y diseminados se encuentra inhabilitada.

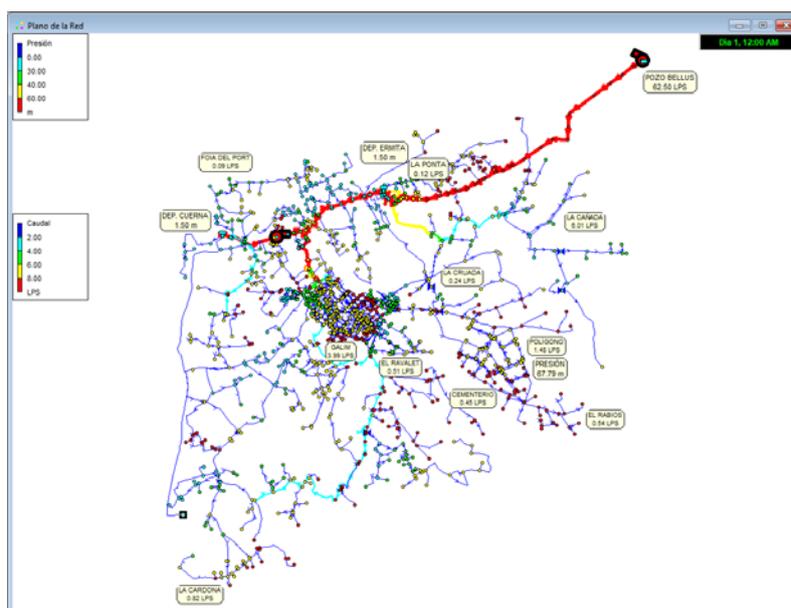
Según la información de facturación y producción, actualmente la red presenta una eficiencia volumétrica aproximada del 65%, lo que supone un valor relativamente bajo para una red que cuenta con un elevado número de sectores hidrométricos (32 en total). En la Figura 2 se presenta el esquema general de funcionamiento de la red.

**Figura 2. Esquema SCADA abastecimiento L´Olleria (Cortesía: Egevasa)**



Siguiendo la metodología propuesta es generado el modelo inicial de la red de abastecimiento de L´Olleria. Las características topográficas e hidráulicas fueron establecidas con base en la información disponible por parte de la empresa EGEVASA. En la última de etapa de esta primera fase, fueron asignadas las demandas inicialmente mediante la facturación por calles, por tal motivo igualmente fue necesario realizar la modificación de múltiples nudos con demandas inapreciables. En la Figura 3 se presenta el modelo inicial de EPANET.

**Figura 3. Red original abastecimiento L´Olleria (Cortesía: Egevasa)**

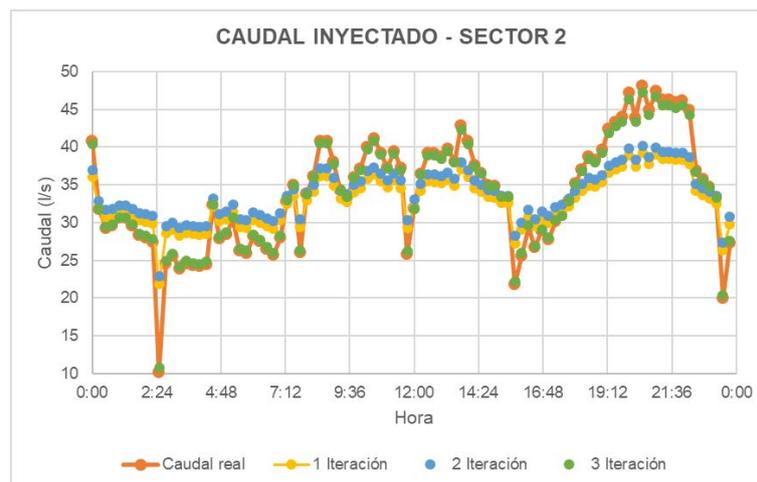


En la segunda fase y con la finalidad de definir los sectores, fue necesario una previa revisión y verificación de la sectorización, la cual resultó particularmente laboriosa debido a la gran cantidad de sectores existentes en este caso de estudio. El resultado final de este análisis fue la detección del incorrecto aislamiento de 8 de los 32 sectores. Teniendo en cuenta el gran número de sectores hidrométricos propuestos en el modelo inicial, su incorrecto funcionamiento y elevados costos de operación de los mismos, se hizo necesario realizar una redistribución de los sectores hidrométricos en base a las zonas con medición continua. Así, número de sectores hidrométricos finalmente utilizados ha sido 4.

Tras el proceso de sectorización se inicia la tercera fase de la metodología correspondiente a la calibración. Para esta proceso fue empleada la información disponible del SCADA (software empleado para el registro de datos y control de la red a distancia). Dicha información resulto ser en algunos casos errónea, y en otros existían fallos de medida por lo que no existía la información. Es por ello que fue necesario realizar un análisis y filtro riguroso de los datos antes de proceder a su utilización. Después de realizado este análisis se determinó el día óptimo de modelación según los datos disponibles, correspondiente al 26 de junio del 2017.

El modelo de la red de distribución disponible inicialmente, no contaba con una representación de los consumos dependientes de la presión (fugas del sistema), por tal motivo es necesario desarrollar la cuarta fase de la metodología planteada. La modelación de las pérdidas de agua está basada en la calibración simultánea de las fugas y las demandas. Fue necesario ajustar el factor de demanda de la totalidad de la red (0.93), pues el caudal facturado no coincidía con el modelado. La diferencia entre los caudales fugados reales y modelados es baja (0,00%, 0,15%, 0,32% y 0,06%), y se obtuvo una rápida confluencia tras dos procesos iterativos en cada segmento. Mediante el proceso de modelación de consumos dependientes de la presión se evidencia un problema importante de fugas en 3 de los 4 sectores, con porcentajes de fuga correspondientes al 50,2%, 88,9% y 36,5% del caudal total inyectado en cada sector. En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos del sector 2, en esta ilustración se evidencia la rápida confluencia del caudal inyectado en el respectivo sector.

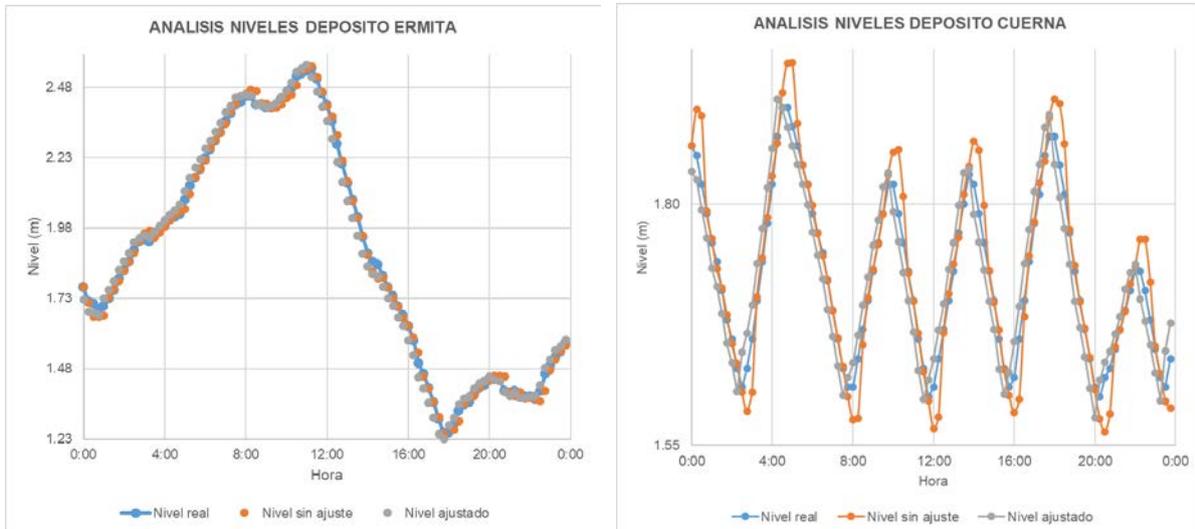
**Figura 4. Resultados proceso modelación fugas (Sector 2)**



Una vez se modelan las fugas es necesario ejecutar la quinta fase de la metodología, correspondiente a la calibración. En esta fase es necesario verificar el comportamiento de la red y su congruencia con los valores reales medidos. En caso de no ser válidos, se requiere un análisis profundo de los datos medidos y su coherencia. Para el caso específico de la red de la L'Ollería se evidencio un error en la hora de las mediciones de los depósitos y bombeos, lo cual dificulto una calibración rápida y correcta. En la Figura 5 se presentan los

niveles de los depósitos registrados en el sistema de medición continua y los niveles calculados según los caudales registrados. Se aprecia un desplazamiento de 45 minutos en los caudales de salida hacia el sistema de rebombeo y el sector 2 desde el depósito Ermita y el caudal rebombado al depósito Cuerna.

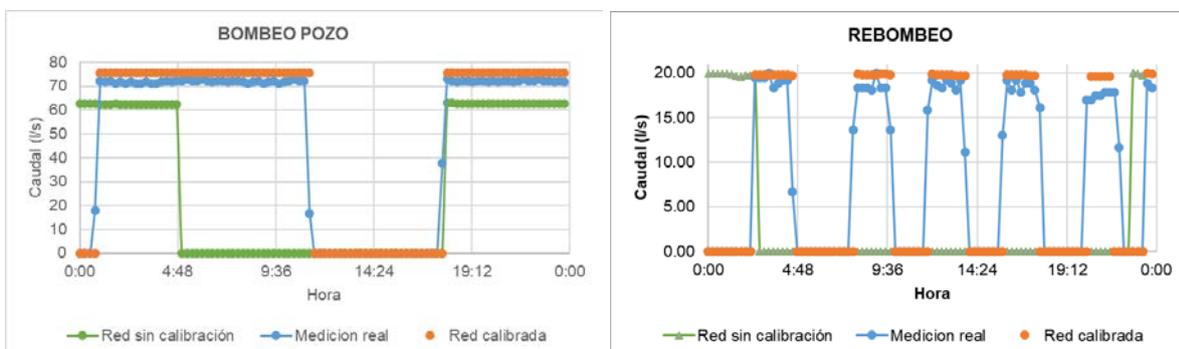
**Figura 5. Comparación de niveles depósitos**



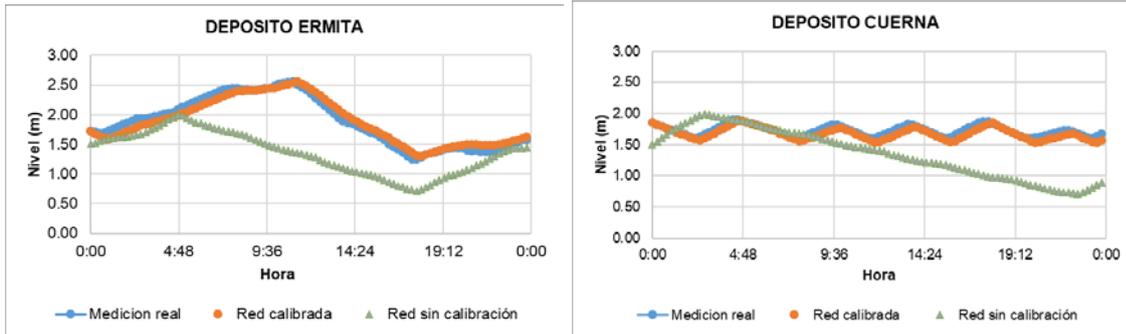
En la etapa final de la fase de calibración se procede a emplear los niveles de los depósitos previamente calibrados para la red arterial. Se ajusta así mediante un proceso iterativo el valor del coeficiente de rugosidad de las tuberías de impulsión principales. El modelo que se obtiene representa de forma adecuada el comportamiento de la red, si bien detecta que se presentan problemas de presiones elevadas en diferentes zonas.

En definitiva, el proceso de calibración de un modelo resulta complejo y demandante en la etapa inicial. El grado de dificultad se fundamenta generalmente por falta de información de la red en varios periodos, datos medidos automáticamente por el sistema de forma incorrecta, sectorización incorrecta y estado del modelo inicial. En la Figura 6 y 7 se presenta los caudales impulsados por los sistemas y bombeo y niveles de depósitos respectivamente, se identifica la medición real (SCADA), resultados del modelo inicial y del modelo calibrado.

**Figura 6. Comparación de caudales bombeados (Calibración)**



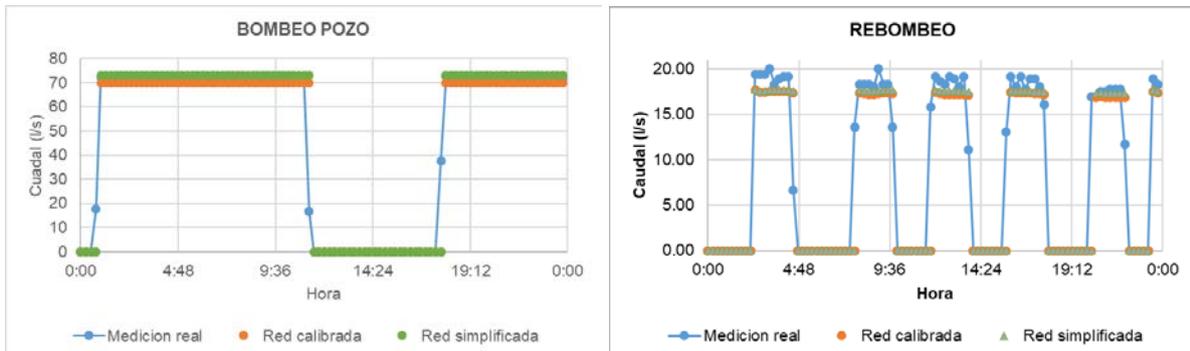
**Figura 7. Comparación de niveles depósitos (Calibración)**



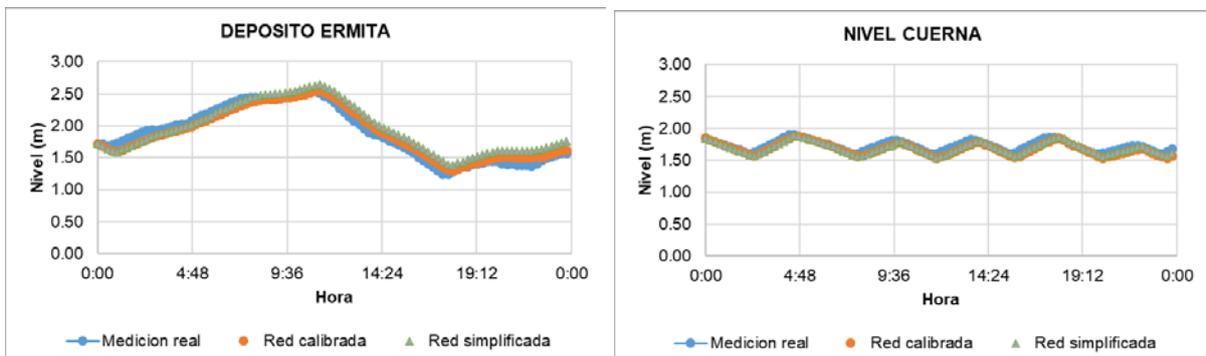
Una vez la calibración se ha realizado de forma exitosa se procede al proceso de simplificación, correspondiente a la quinta fase de la metodología. Dentro de las técnicas de simplificación de L’Olleria se destacan por su importancia la eliminación de tramos ramificados y agrupación de pseudonodos. Para el caso en específico del casco urbano se dificulta su simplificación con base en el alto grado de mallado que se evidencia en esta zona. Fue posible realizar una simplificación del 62% de los nudos de la red y 61% de las tuberías, disminuyendo de 1679 a 635 nudos, y de 1828 a 719 tuberías.

Es necesario garantizar el correcto funcionamiento de la red una vez realizadas las labores de simplificación. En las Figuras 8 y 9 se presenta los caudales impulsados por los sistemas de bombeo y niveles de depósitos respectivamente, en las ilustraciones se identifican la medida real, resultados del modelo calibrado y simplificado.

**Figura 8. Comparación de caudales bombeados (Simplificación)**



**Figura 9. Comparación de niveles depósitos (Calibración)**



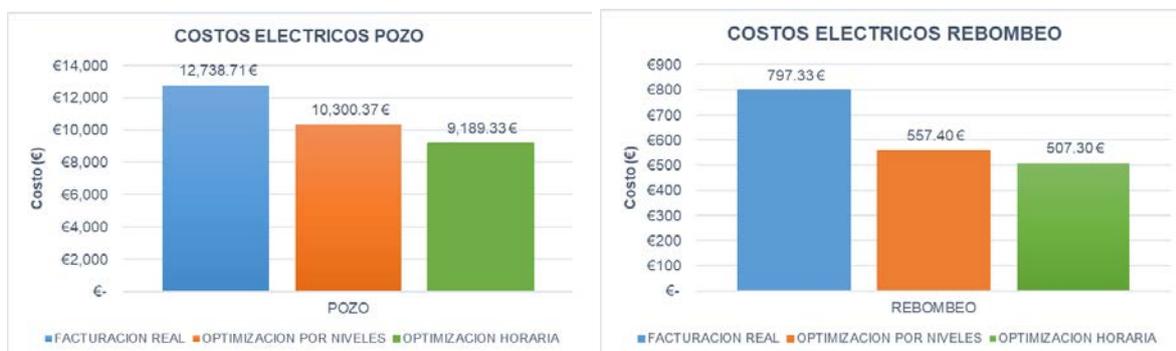
La fase final de la metodología, correspondiente a la optimización será fundamental en la disminución de costes operativos de la red. La correcta calibración y simplificación garantizara que los valores teóricos obtenidos en las labores de optimización, sean veraces

y se traducirán en un ahorro monetario real para la empresa prestadora del servicio de acueducto (EGEVASA).

Para la optimización, es necesario modificar el tiempo de modelación a 168 horas con el objetivo de tener en cuenta la totalidad de las tarifas eléctricas. Como primer escenario, se plantea controlar las horas de bombeo con base en los niveles de los depósitos dependientes de cada equipo. Es necesario garantizar que estas estructuras no se desocuparan y son cumplidas las presiones mínimas de servicio requeridas (25 mca para la red en general y 35 mca para el centro urbano).

El segundo escenario se basará principalmente en las tarifas eléctricas. Con esto se busca hacer funcionar los equipos en las horas valle y disminuir el bombeo en horas punta. Al igual, es necesario garantizar que estas estructuras no se desocuparan y son cumplidas las presiones mínimas de servicio requeridas. En la Figura 10 se presentan los resultados de los costos de bombeo obtenidos para el mes de Julio. Los datos de la facturación real corresponden al mes de Julio de 2017 y fueron facilitadas por la empresa prestadora de servicios.

**Figura 10. Costos eléctricos (Optimización)**



Se evidencia claramente que el menor coste eléctrico se presenta en la optimización horaria, correspondiente a un ahorro del 30,09% de los costes de bombeo del pozo y 19,14% del rebombeo respecto a la facturación real. Es claro que el principal factor en costos de operación resulta del pozo. Por tanto, las labores de optimización fueron centradas en este ámbito. Adicionalmente es necesario analizar el consumo de agua, pues es fundamental disminuir el volumen fugado para una completa optimización. En la Figura 11 se presentan los resultados obtenidos del volumen total inyectado en 168 horas.

**Figura 11. Volumen total inyectado**



Como se esperaba según el análisis de costes, el volumen inyectado más bajo se presenta en la segunda metodología de optimización, obteniendo un ahorro del 8,70% del volumen total correspondiente a 11.624m<sup>3</sup> en un mes de servicio.

#### 4. Conclusiones

Del análisis de la metodología presentada y de su aplicación al caso de estudio, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La construcción del modelo matemático de la red se ha mostrado la herramienta fundamental en el proceso de optimización del funcionamiento de la red. En particular, el modelo EPANET se ha mostrado eficaz para representar el comportamiento de la red bajo condiciones cambiantes tanto de presiones como de caudales.
- Un aspecto fundamental tanto en la modelización como en la optimización de una red de distribución de agua es la definición de sectores. En el caso analizado se partía de una situación de excesivo número de sectores. De hecho, 32 sectores para una población de 30 000 habitantes resultaba excesivo. Más aún, un sistema tan complejo con frecuencia tiende a tener fallos de funcionamiento, tal y como se ha puesto de manifiesto. Así, la consideración de únicamente 4 sectores ha sido suficiente para mejorar tanto energéticamente como hídricamente el comportamiento de la red.
- Una de los elementos clave en la metodología propuesta es la asignación de los caudales de fuga como consumos dependientes de la presión. Así, el modelo aplicado de asignación de emisores en los nudos al mismo tiempo que se modifica la curva de modulación de cada sector se ha mostrado sumamente eficaz para representar el comportamiento de la red. De esta forma el modelo recoge fielmente el comportamiento de la red cuando se producen variaciones de presión significativas.
- La calibración de la red permitió ajustar los coeficientes de rugosidad de las conducciones principales. Este proceso de calibración permitió ajustar el modelo de forma que represente lo mismo que está sucediendo en la realidad.
- Respecto al proceso de simplificación, fue posible simplificar el modelo en un 62% aproximadamente. Esta simplificación se realizó fundamentalmente en la zona periurbana con consumos dispersos. La simplificación de la zona urbana fue más compleja al ser una zona muy mallada con gran número de interconexiones entre los diferentes nudos de la red.
- Una vez realizada la optimización de la red mediante el método propuesto se estuvieron analizando dos casos diferentes: la optimización de los niveles de arranque y parada de los grupos de bombeo y la optimización centrada en la modificación de las consignas de presión de las válvulas reductoras de presión. De esta forma, el resultado final ha sido una reducción del 30% de los costes de bombeo y del 8,70% del volumen total inyectado.

En definitiva, la metodología propuesta se ha mostrado eficaz para la mejora del rendimiento hídrico y energético de un abastecimiento de agua. Sin duda el caso de estudio analizado presenta particularidades. Pero, sin duda, el método puede ser aplicado a cualquier sistema de distribución de agua que disponga de los mismos requisitos de información que los disponibles para el caso de L'Ollería.

#### BIBLIOGRAFÍA

Antolín, F. (1999). Iniciativa privada y política pública en el desarrollo de la industria eléctrica en España. La hegemonía de la gestión privada, 1875–1950. *Revista de Historia*

- Económica / Journal of Iberian and Latin American Economic History*, 17(2), 411–445.  
<https://doi.org/10.1017/S0212610900007783>
- Aoyarzún Constabel, S. A. (2011). *Optimización energética de las redes de abastecimiento de Emuasa*. Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/16197>
- Iglesias Rey, P. L., Oyarzún Constabel, S. A., Martínez Solano, F. J., & Martínez Solano, P. D. (2012). Optimización energética de las redes de abastecimiento de agua del campo de Murcia (España), *46022*, 1–17.
- Laredo, R. (2005). *Computer modeling of water distribution systems*. (American Water Works Association, Ed.) (2nd ed., Vol. 32). American Water Works Association.
- Martínez Solano, F. . J., Iglesias Rey, P. L., Mora Meliá, D., & Ribelles Aguilar, J. V. (2018). Combining Skeletonization , Setpoint Curves , and Heuristic Algorithms to Define District Metering Areas in the Battle of Water Networks District Metering Areas. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(6), 1–7.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000938](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000938)
- Martínez Solano, F. J., Iglesias Rey, P. L., & Molina Arce, S. X. (2017). Simultaneous Calibration of Leakages, Demands and Losses from Measurements. Application to the Guayaquil Network (Ecuador). *Procedia Engineering*, 186, 397–404.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.237>
- Mora Melia, D., Iglesias Rey, P. L., Martinez Solano, F. J., & Fuertes Miquel, V. S. (2013). Design of Water Distribution Networks using a Pseudo-Genetic Algorithm and Sensitivity of Genetic Operators. *Water Resources Management*, 27(12), 4149–4162.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-013-0400-6>
- Rossman, L. . (2003). EPANET, User Manual. *United States Environmental Protection Agency*, (38).
- Unicef. (2012). *Estado mundial de la infancia 2012: Las niñas y los niños en un mundo urbano*. UNICEF. Retrieved from <http://hdl.handle.net/123456789/1812>