



Joaquín Melgarejo Moreno
(Editor)



JOAQUÍN MELGAREJO MORENO (EDITOR)

Congreso Nacional del Agua Orihuela

Innovación y Sostenibilidad



Coordinado por:
Patricia Fernández Aracil



CAMPUSHABITAT5U



Instituto Estudios
Económicos
Provincia Alicante

© los autores, 2019
© de esta edición: Universitat d'Alacant

ISBN: 978-84-1302-034-1

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado - electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

CALIBRACIÓN DE UN MODELO CONSIDERANDO LA DEPOSICIÓN DE CARBONATO CÁLCICO Y CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO ENERGÉTICO

Miguel Ángel Pardo Picazo

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante

Lorena Chiva Miralles

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante

Héctor Fernández Rodríguez

Universidad de Alicante

Ignacio Casals del Busto

Aguas de Alicante

RESUMEN

La calibración de un modelo de simulación hidráulica en redes de agua a presión supone la modificación de ciertos parámetros del sistema para conseguir que el modelo represente lo más fielmente posible las características hidráulicas del sistema. Para ello, se pretende minimizar una función objetivo que se considera la discrepancia entre los valores de caudal y presión medida en dos días consecutivos y los valores simulados por el modelo. Para dicho problema se emplea un algoritmo de optimización estocástico, *Shuffled Complex Evolution algorithm* (SCE) que varía los patrones temporales de la demanda y la reducción de la sección producida por la deposición calcárea (producida especialmente en zonas de aguas *duras*). Por último, se pretende cuantificar el efecto de la consideración de deposiciones calcáreas desde la óptica energética con la comparación entre el caso real y el caso ideal inicial (sin deposición calcárea). Se ha planteado este trabajo en un sector de red real (abasteciendo a 10.000 habitantes) en una ciudad del sureste español.

1. INTRODUCCIÓN

La deposición de sedimentos minerales como el carbonato cálcico (CaCO_3) es uno de los problemas que deben abordar los gestores de las redes de distribución. Sin duda, estas deposiciones generan una mayor dificultad en cuanto a la operación y mayores fricciones (con la consecuente mayores pérdidas energética). En las ciudades pertenecientes al sureste español, en las que el agua es muy rica en minerales

(comúnmente denominada muy dura) el problema es todavía mayor que en otros abastecimientos. De hecho, algunos investigadores (Sharp y Walski, 1998) ya cuantificaron el efecto del tiempo en el valor de la rugosidad y dicho modelo se adoptó para la modelación de la calidad en la red de distribución de agua en la ciudad de Alicante (Gutiérrez, 2003).

El conocimiento del comportamiento hidráulico de los elementos que conforman una red cualquiera es complejo. Tanto es así, que con frecuencia se debe emplear un software de simulación hidráulica para conocer las variables más relevantes (caudales, presiones, etc.) en los trabajos de diseño, gestión y operación de las redes de distribución de agua (WDS). La realización del modelo de simulación es un proceso tedioso, que incluye una gran recopilación de la información (topologías de la red, conducciones, equipos de bombeo, elementos de regulación, obtención y asignación de consumos, etc.) y que concluye con un modelo sin validar. Esto es, que no se sabe si efectivamente representa la realidad.

Por calibración se entiende el proceso de modificación de los parámetros de diseño del modelo para que dicho modelo se ajuste al comportamiento real del sistema. Este proceso se debe a que ciertos parámetros han sido obtenidos a partir de valores de diseño (rugosidades, diámetros, pérdidas localizadas, curvas características de las bombas, etc.), mientras que otros han sido obtenidos a partir de simplificaciones (demandas de los nudos, patrones temporales de demandas, etc.). Habitualmente la calibración hidráulica se produce en dos pasos; uno primero de calibración de la demanda (paso éste no siempre necesario) a partir de caudales medidos; y el segundo consiste en la calibración de la rugosidad a partir de mediciones de presión.

Muy a menudo se omite la calibración en diámetros considerando que la anterior (en rugosidad) es suficiente para obtener valores ajustados de presión y altura piezométrica. Sin embargo, este enfoque tiene dos inconvenientes principales, ya que no representa la realidad del sistema, y por tanto no nos da una imagen fidedigna del estado de la red y no proporciona valores correctos de velocidad ni por tanto, de otros indicadores asociados (p. ej. tiempos de permanencia). La calibración desde la óptica hidráulica es un trabajo bien conocido (Sanz y Pérez, 2004; Speight y Khanal, 2009; Kapelan y col., 2007), mientras que únicamente un limitado número de estudios se ha encargado de la calidad del sistema. Vasconcelos et al. (1997) realizaron una calibración de la reacción general de las paredes de las tuberías, Munavalli and MohanKumar (2003, 2005) aplicaron un Gauss-Newton como algoritmo de optimización para calibrar parámetros de calidad en periodo extendido. Estudios que utilizan ambos modelos simultáneos (Pardo y Kapelan, 2009; Jonkergow y col., 2008).

Y como es evidente que la deposición calcárea tiene un efecto hidráulico (que no puede ser minusvalorado) en cualquier red de distribución, se desea considerar el efecto hidráulico de la sedimentación en el modelo final con el que se estudia un sector

cualquiera. Es decir, se está considerando la reducción del diámetro por efecto del envejecimiento de la red. Las simulaciones se realizan con el software EPANet 2.0 distribuido por la United States Environmental Protection Agency (Rossman, 2000) y operadas desde un entorno de programación como matlab®.

El efecto inmediato en términos de pérdida de energía y presión de servicio de la deposición calcárea puede llegar a ser extremo en zonas con aguas “duras”, comprometiendo, en ocasiones seriamente, la calidad del servicio. Igualmente importante es poder cuantificar su impacto en términos energéticos, ya que nos permite estimar un coste muchas veces oculto, y por tanto anticipar justificadamente la renovación de las conducciones sin esperar al deterioro del suministro. Para realizar la comparación entre el consumo energético de un sector hidrométrico real, abasteciendo a 10000 habitantes, se calcula la auditoría energética (Cabrera y col., 2010) sobre el modelo hidráulico inicial y el modelo final calibrado. El software UAenergy (Pardo y col., 2019) se emplea para el cálculo en redes urbanas con innumerables nudos de consumo y tuberías. Dicha herramienta puede ser descargada gratuitamente en el siguiente link <https://bit.ly/2FbNqdr>. Asimismo, para ayudar a los usuarios en el proceso de ejecución, se ha desarrollado una página web de ayuda al usuario que puede visitarse en el siguiente link <https://bit.ly/2Qm7knR> y un vídeo tutorial <https://bit.ly/2F71RQu> tanto en castellano como en inglés. Estas técnicas ya se han empleado en numerosas redes de distribución (Berardi, 2018; Hernández y col., 2012; Murgui y col., 2009, 2010; Pardo y col., 2018).

El trabajo se organiza tal como sigue. En el capítulo 2, se muestra la metodología para la realización de la calibración, siendo el apartado 2.1 la función objetivo, el 2.2 el algoritmo de optimización y el 2.3 los parámetros modificables durante la calibración. La red real estudiada se presenta en el capítulo 3, con su descripción (3.1), los datos obtenidos (3.2) y la definición de las características particulares de los rangos de variación de los parámetros de calibración (3.3). En el capítulo 4 se muestran los datos de la calibración (4.1), la validación realizada con otros datos de otros días (4.2) y el efecto energético de la deposición calcárea (4.3). Por último, se muestran las conclusiones obtenidas en el capítulo 5.

2. METODOLOGÍA

Este estudio plantea la calibración simultánea de parámetros hidráulicos (como las demandas y la reducción de los diámetros por deposición de carbonato cálcico) utilizando datos hidráulicos (caudal y presión) en determinadas localizaciones de la red de estudio. En lo que sigue se muestra la función objetivo a minimizar, el algoritmo de optimización empleado y por último los parámetros que se modifican para conseguir dicha minimización.

2.1. Función objetivo en la calibración

La función objetivo de la calibración consiste en obtener la mayor correlación entre los datos medidos en campo y los calculados con el modelo. Para obtener esto, frecuentemente se intenta minimizar la suma de errores cuadráticos entre las concentraciones medidas y simuladas de la manera que sigue:

$$\text{Minimizar } \frac{\sum_{p \in P_k} \sum_{j=1}^{m_p} (P_{p,t_j}^{obs} - P_{p,t_j}^{sim})^2}{n_{np} \cdot n_{mp} \cdot (P_{Max}^{obs} - P_{Min}^{obs})^2} + \frac{X_Q * \sum_{p \in P_k} \sum_{j=1}^{m_p} (Q_{p,t_j}^{obs} - Q_{p,t_j}^{sim})^2}{n_{nq} \cdot n_{mq} \cdot (Q_{Max}^{obs} - Q_{Min}^{obs})^2} \quad (1)$$

Donde P_k comprende el conjunto de los n_{np} nudos donde se ha realizado la medición, n_{mp} es el número de mediciones realizadas a lo largo del tiempo en los diferentes nudos, P_{p,t_j}^{obs} y Q_{p,t_j}^{obs} son medidas de presión y de caudal y concentración realizadas en el punto $p \in P_k$ a la hora t_j , mientras que P_{p,t_j}^{sim} y Q_{p,t_j}^{sim} son datos obtenidos a partir del modelo en el nudo $p \in P_k$ a la hora t_j . X_Q es un parámetro que intenta ponderar el efecto de la discrepancia de caudales frente a la discrepancia de presiones (en el ejemplo numérico adopta el valor siete). Finalmente, n_{np} y n_{nq} son el número de nudos en los que se ha medido la presión y el caudal respectivamente y n_{mp}, n_{mq} representan el número de medidas realizadas en los nudos. Tras un periodo de cálculo, se decidió priorizar la importancia de fijar el caudal en la entrada como principal problema de la calibración frente a las medidas de la presión, que se mostraron menos dependientes de los parámetros de calibración.

Frecuentemente, si el instante de tiempo t_j no coincide con el instante de tiempo en el que se almacena un dato simulado, se realiza una interpolación lineal entre los valores simulados en el nudo p y con instantes de tiempo anterior y posterior a t_j .

2.2. Algoritmo de optimización

Este trabajo utiliza un algoritmo de optimización estocástico, en particular, utiliza el “Shuffled Complex Evolution (SCE) algorithm”, que fue originalmente desarrollado por Duan et al. (1992). Sin embargo, aunque la calibración del modelo proporcione un buen resultado, no se pretende generalizar el empleo de este algoritmo a todos los problemas parecidos.

El algoritmo de optimización utilizado se designa como SCECWS y consiste básicamente en una versión modificada del algoritmo SCE. El algoritmo utilizado presenta las siguientes características:

1. Se define un conjunto q de variables, y dentro de ella hay m soluciones, el número de evoluciones de la solución g y el mínimo número de evaluaciones. Se

inicializa aleatoriamente la población de $q \times m$ soluciones que cumplan los requisitos previos de los parámetros de la calibración, y se calcula la función objetivo.

2. Aleatoriamente, se seleccionan q soluciones.
3. Se evoluciona una solución como se define a continuación:
 - a) Se seleccionan la población ordenándose según la función objetivo resultante. Se define la mejor solución de la función objetivo (la que proporciona el menor valor). Se selecciona un valor b de una distribución aleatoria entre los valores 0 y 1, y se determina el centroide de la solución como sigue:

$$x_{ce} = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{2^{m-i}}{2^m - 1} \cdot x_i \text{ donde } x_i \text{ es la } i\text{-ésima variable de la solución.}$$

Esta parte se designa comúnmente en terminología anglosajona como competitive complex evolution “cce”, y es la primera manera de modificar las q soluciones seleccionadas.

- b) Se genera un nuevo conjunto de soluciones de la manera:

$$x_{new} = 2 \cdot x_{ce} - x_m$$

Donde x_m representa los valores de las soluciones seleccionadas.

- c) Se evalúa la función objetivo con las nuevas soluciones obtenidas, f_{new} . Si

$$\frac{f_1}{f_{new}} > b \text{ Continúa hasta 4g, si no el sistema prosigue al siguiente paso.}$$

- d) Determinar la desviación estándar de los parámetros que componen las q soluciones, σ_x . Y generar un nuevo valor de $x_{new} = N(x_1, \sigma_x^2)$.

- e) Se evalúa la función objetivo con las nuevas soluciones f_{new} . Si $\frac{f_1}{f_{new}} > b$

Continúa hasta 4g, si no el sistema prosigue al siguiente paso.

- f) Genera un nuevo valor de x_{new} como: $x_{new} = 0.5 \cdot (x_{ce} + x_m)$

- g) Reemplaza el peor valor de x_m con el nuevo x_{new}

- h) Repite el proceso 4 a), 4 g) durante g veces

4. Se reinserta las variables evolucionadas a la población de soluciones.
5. Si el actual número de evaluaciones es menor que el mínimo número definido, vuelve al paso 3, en caso contrario detener el algoritmo.

El algoritmo SCE original está basado en la evolución de la población de soluciones y fue desarrollado con las ideas basadas en algoritmos existentes (Duan et al., 1993). El presente algoritmo se ha modificado ligeramente con respecto al inicial por obtener soluciones con menor función objetivo y siendo menos sensible a las variaciones en la población inicial de soluciones.

2.3. Parámetros de calibración

Existen dos tipos de parámetros que se utilizan para la calibración del modelo y cada uno de ellos se explica en los apartados siguientes.

2.3.1. Coeficientes de la modulación de la demanda

En cada intervalo hidráulico, el programa EPAnet 2 representa los consumos en los nudos de la WDS a partir de una demanda base del nudo (demanda relativa de ese nudo con respecto al resto de nudos de la red y constante para todo el intervalo de cálculo) y de los coeficientes de modulación (Demand Modulation Pattern; DMP), que representan la variación temporal del consumo de los mismos. Se asume que todos los nudos del sector exhiben la misma variación temporal en la demanda y por tanto, tienen asignada la misma curva de modulación del sistema.

Por tanto, la curva de modulación principal se modifica para reproducir la demanda de los nudos en la red de abastecimiento (ya que la demanda base es constante). Ya que se asume el desconocimiento de la curva de modulación a priori, se establece que los valores límite de la curva de modulación oscilan entre los valores mínimos y máximos conocidos (en este caso 0 y 2,5 respectivamente).

Informes previos indican que la metodología propuesta proporciona estimaciones aceptables si se analizan curvas de modulación con variación cada treinta minutos. Por tanto, se disponen de 48 valores que se refieren a la variación diaria del sistema.

2.3.2. Reducción del diámetro por deposición de carbonato cálcico

Puede que la deposición de carbonato cálcico no sea uno de los problemas más comunes que se deben abordar en la gestión de una red de distribución de agua. Y es que la deposición calcárea es de gran importancia en tuberías de agua caliente. Sin embargo, en zonas de aguas duras (el litoral valenciano así lo es), provocan que sea un problema notable y que se deba afrontar en consecuencia.

La deposición de carbonato cálcico se recrea en el modelo como una reducción en la sección efectiva de paso, es decir, como una reducción del diámetro. De este modo, no importa la forma de las deposiciones sino el diámetro que produce una misma sección de paso del fluido (una consideración que no afecta a los cálculos hidráulicos). En redes de cierta antigüedad, con aguas duras como las presentes en nuestro entorno, las pérdidas de carga asociadas a la disminución de diámetro pueden llegar a ser, de hecho, de magnitud superior a la correspondiente a la rugosidad por si sola.

Con frecuencia, se agrupan las tuberías de la red que se consideran que tienen el mismo nivel de deposiciones (según criterios geográficos, según mismos diámetros, según material de las tuberías, etc.). Aunque finalmente, no se han agrupado las tuberías en conjuntos, sino que se han modificado individualmente. Una decisión que ha representado un mayor número de variables a modificar (617 nuevos diámetros

correspondientes al mismo número de tuberías del sistema).

Es evidente que el problema de la reducción del diámetro por deposición de carbonato cálcico es mucho más relevante cuándo el diámetro de la conducción es pequeño (por la reducción de la sección efectiva producida) y se desea observar su influencia con respecto a la velocidad del sistema.

3. CASO DE ESTUDIO: SECTOR HIDRÓMETRICO REAL

3.1. Descripción del sector

El sistema considerado corresponde a un sector de una red perteneciente a una ciudad situada en el sureste español. Dicho sector tiene 9900 habitantes y presenta las siguientes cifras generales:

- El caudal medio consumido diario por esta red es de 12.29 l/s con un volumen consumido diario de 1062.55 m³ (107.33 l/habitante y día).
- El patrón de consumo utilizado para el sector de la red presenta un valor máximo a las 9h y 48 minutos de 27.92 l/s y un valor mínimo nocturno de 2.18 l/s a las 4 horas y 3 minutos.
- El sector sobre el que se realiza la medición está abastecido desde un punto determinado (originalmente designado como nudo ID 562) que se considera un embalse para realizar los cálculos pertinentes. En dicho embalse, se asegura la presión de entrada es igual a la presión real del sistema sustituyendo la altura piezométrica de entrada al sistema (obtenida a partir de la cota del nudo 562 y la presión a cada instante del día) por la piezométrica de entrada del embalse en la red (obtenida a partir de la altura del embalse igual a la unidad y la curva de modulación de la piezométrica real del sistema).

De acuerdo con los datos iniciales facilitados por el abastecimiento, En la Figura 1 se puede observar el esquema general de la red de estudio. No se considera que existan válvulas de regulación, las válvulas existentes se consideran completamente abiertas durante la simulación.

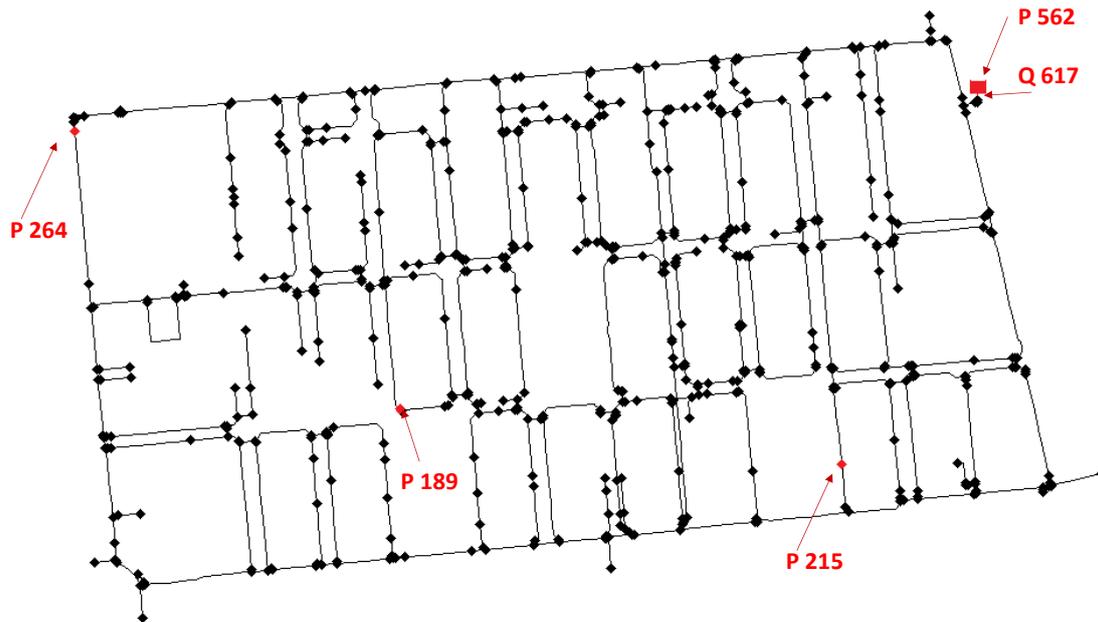


Figura 1. Esquema general de la red de estudio. Fuente: elaboración propia.

3.2. Datos facilitados

Para la realización de la calibración del modelo, se facilitan datos de presión en ciertos puntos del sistema recogidos en intervalos de 3 minutos de tiempo (donde se incluyen la presión instantánea lo largo del intervalo de tiempo), así como medición del caudal de entrada al sistema que se muestran en la Tabla 1 e incluyendo localización geográfica en la Figura 1.

Para ello, se entrega en un fichero de EPANet los datos de consumo (obtenidos mediante la facturación medida), los caudales de entrada al sector (Línea 617, Tabla 1), la cota de los nudos de la red (obtenido directamente a partir de un sistema de información geográfica, *GIS*), las presiones de salida en el embalse.

Tabla 1. Nudos y líneas de medición de presión y caudal.

Nudo	ID	Tipo de medida	Explicación
1	189	Presión	-
2	215	Presión	Oficina
3	264	Presión	-
4	617	Caudal	Entrada al sistema, N562
5	562	Presión	Entrada al sistema

3.3. Descripción de la búsqueda de soluciones en el caso de estudio

El algoritmo de optimización utilizado durante este estudio se caracteriza por utilizar un conjunto de soluciones, variables $q=50$, cada una compuesta por $p=50$ soluciones independientes. Asimismo, cada una de las soluciones evoluciona $m=50$ veces y se realiza un total de $1.5 \cdot 10^5$ evaluaciones.

El primer conjunto de soluciones, o lo que es lo mismo las 50·50=2500 primeras soluciones sin la evolución de las mismas se obtienen a partir de una distribución aleatoria uniforme en los rangos seleccionados para cada una de las variables. Una vez se ha realizado las iteraciones pertinentes y se han evolucionado las soluciones con el método descrito en el apartado 2.2, el sistema guarda la solución que presenta un menor valor de la función objetivo y se obtiene el nuevo modelo calibrado de acuerdo con las características impuestas por el problema.

La duración del periodo extendido es de 48 horas, y donde el intervalo de cálculo hidráulico y de calidad son cada 3 minutos. EPAnet repite las curvas de modulación cuando el intervalo de cálculo es mayor que 24 horas, por lo que los 48 valores que corresponden a un día se repiten en las 48 horas de estudio.

La frecuencia de recogida de datos es cada treinta segundos (tanto en los caudales de entrada como en las presiones del sistema). Por tanto, se disponen de 5760 datos de presión y de caudal en cada punto de medida (obtenidos a partir de 2 datos/minuto*60minutos/hora*48 horas), y como no se pueden emplear tantos datos en la calibración del sistema, se decide realizar el promedio de los seis datos existentes en intervalos de 3 minutos, y por tanto, se calibran $5760/3=960$ datos por cada nudo de presión (nudos 189, 215, 264) y 960 datos de caudal circulante por la tubería 617 de entrada en el sistema. Por tanto, cada simulación compara las discrepancias entre 3840 puntos (2880 valores de presión y 960 valores de caudal).

Cada solución del problema de calibración debe estar compuesta por los siguientes parámetros:

- La curva de modulación solución del estudio se considera adecuada que muestre variación en intervalos de media hora, y como dicha curva muestra la variación diaria del consumo, los parámetros de calibración son 48 valores (a razón de 2 valores cada hora). En este punto, cabe recordar que cuando el periodo de simulación es superior a 24 horas (y este caso lo es, ya que el tiempo total del cálculo es 48 horas), los valores de la modulación se repiten. Los valores de la curva de modulación oscilan entre 0 y 2.5 como es habitual en la práctica.
- Como existen 617 tuberías, se disponen 617 valores de reducción del diámetro. Como criterio heurístico, se considera que la reducción del diámetro oscila entre los valores de 0 y 15mm, una decisión que se observa adecuada.

Por lo que la solución de la calibración y por tanto la obtención del modelo calibrado con datos hidráulicos estará compuesta por 665 (48+617) valores numéricos representados en el orden definido anteriormente.

4. RESULTADOS

4.1. Calibración

Los parámetros obtenidos en el escenario de calibración se muestran en la Figura 2 y en la Tabla 2.



Figura 2. Curva de modulación obtenida. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Curva de modulación de la demanda.

Tiempo	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
Sector	0.166	0.070	0.195	0.111	0.090	0.117	0.150	0.084	0.101	0.137	0.086	0.142
Tiempo	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5
Sector	0.128	0.130	0.225	0.351	0.476	0.485	0.566	0.711	0.651	0.676	0.638	0.677
Tiempo	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5
Sector	0.576	0.587	0.536	0.513	0.455	0.598	0.559	0.643	0.466	0.414	0.368	0.395
Tiempo	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5
Sector	0.387	0.353	0.260	0.316	0.321	0.283	0.333	0.296	0.349	0.269	0.207	0.175

Los valores obtenidos para la función objetivo (ecuación (1)) y las cantidades que dependen de cada término se muestran en la Tabla 3 (como se muestran también los mismos datos de la validación del sistema, dicha tabla se muestra en la descripción de los datos de validación del modelo). Se observa que en las 665 variables no han obtenido ningún resultado máximo ó mínimo, esto es, que ningún DMP igual a 0 ó a 2.5 (Tabla 2 y Figura 2), ni ningún diámetro del nuevo modelo es igual al anterior ni a una reducción de 15mm. Por tanto, se pueden aceptar como correctos los valores límites definidos según criterios heurísticos.

Otros resultados de la calibración se muestran en la Figura 3 y 4. En ellas se muestran

los valores observados (en puntos) y los valores que el modelo calcula en los tres nudos y en la entrada de caudal al sistema.

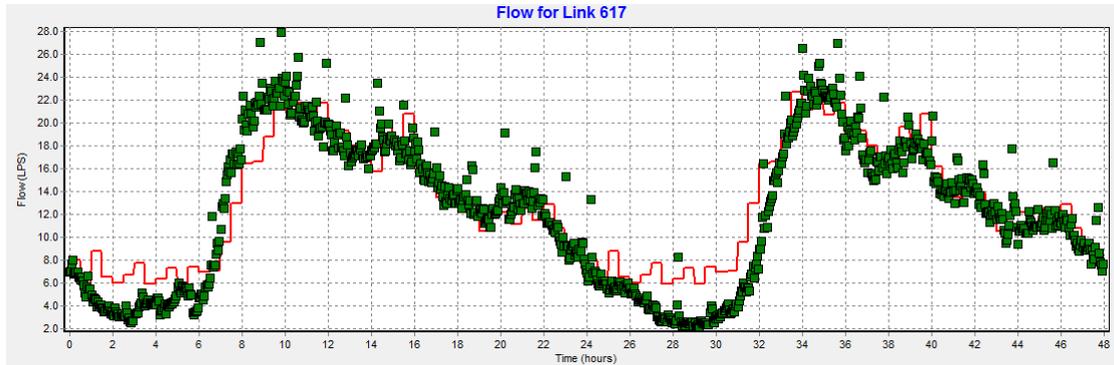


Figura 3. Caudales medidos de entrada al sector (puntos) y simulados (línea). Fuente: elaboración propia.

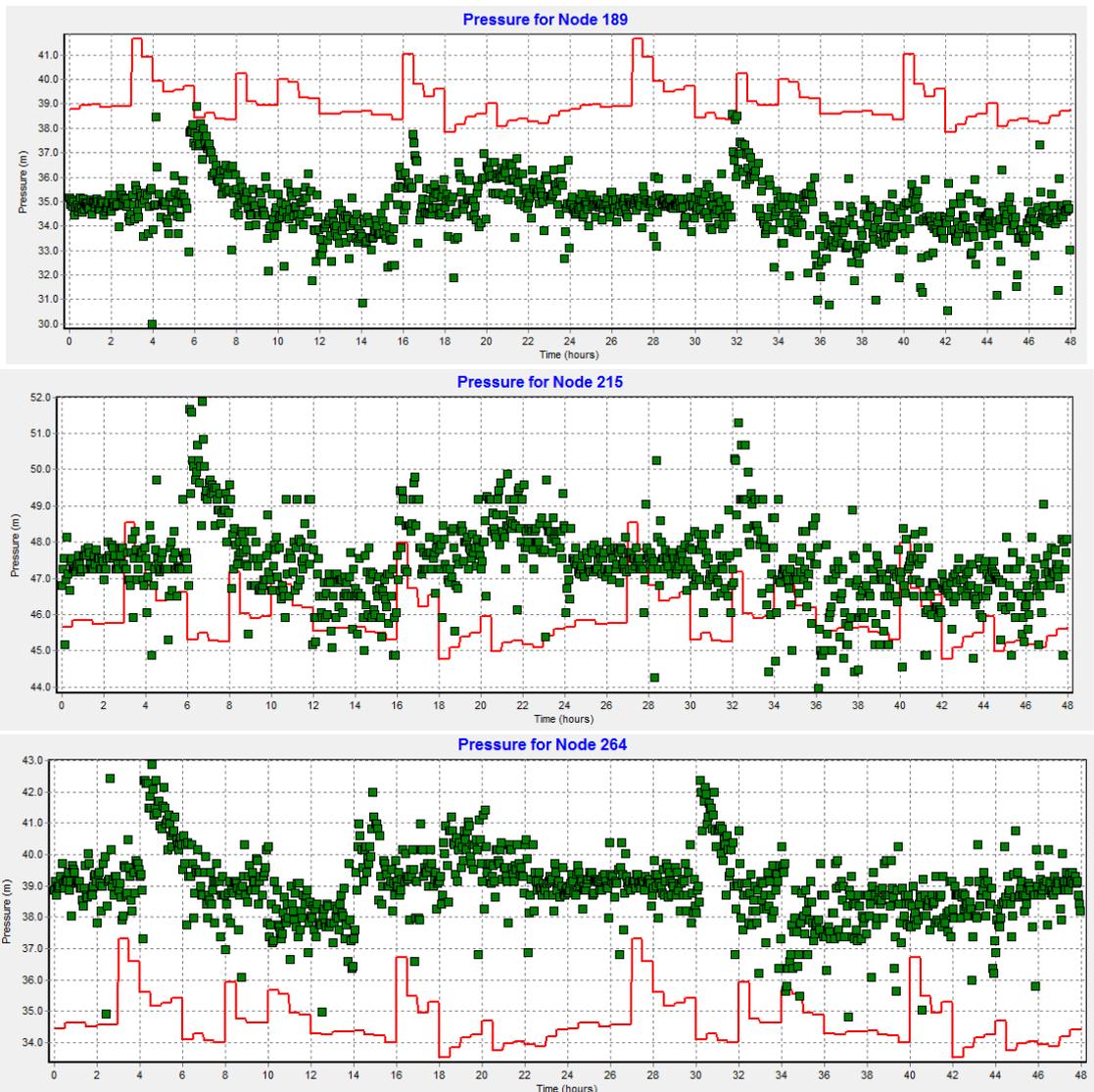


Figura 4. Presiones observadas (puntos) y simuladas (línea) en los nudos 189, 215 y 264 del sector. Fuente: elaboración propia.

4.2. Validación

La validación del modelo calibrado se ha realizado para los días 17 y 18 de Diciembre, con datos entre las 0:00h del día 17 y hasta las 23:57h del día 18 de Diciembre. Al igual que los datos de calibración, se han recogido datos cada 30 segundos durante esos días y se han agrupado en promedio cada tres minutos.

Los resultados de la validación del sistema se muestran en la Figura 5 y la Figura 6. Tal y como se puede observar en estas figuras, los resultados son similares a los de calibración y el modelo de simulación hidráulica no está sobreajustado (un concepto conocido como *overfitted* en terminología sajona; es decir, que el ajuste es extrapolable a otros periodos de tiempos).

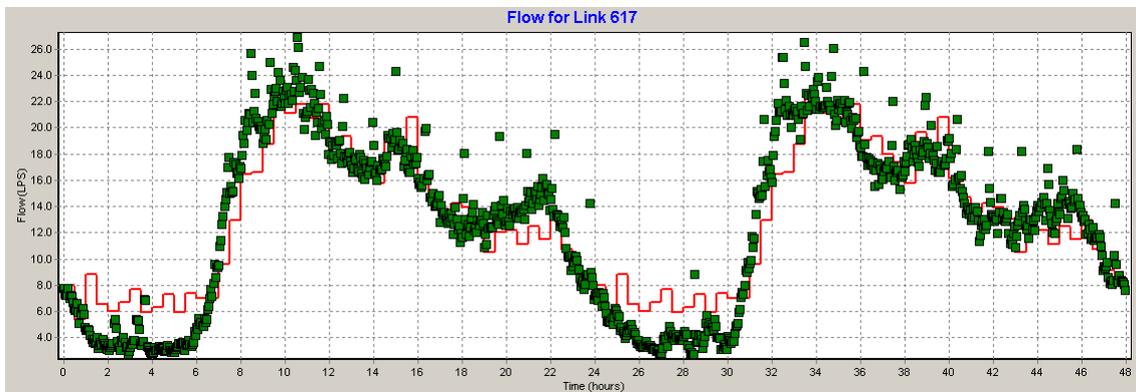


Figura 5. Caudales observados y simulados en la validación del sistema. Fuente: elaboración propia.

Los valores de la función objetivo tanto de la calibración como de la validación del modelo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de la función objetivo.

Tipo de medida	Valor de la función objetivo	
	Calibración	Validación
Presión 189	0.019	0.039
Presión 215	0.004	0.010
Presión 264	0.020	0.056
Caudal	0.068	0.077
Total	0.083	0.112

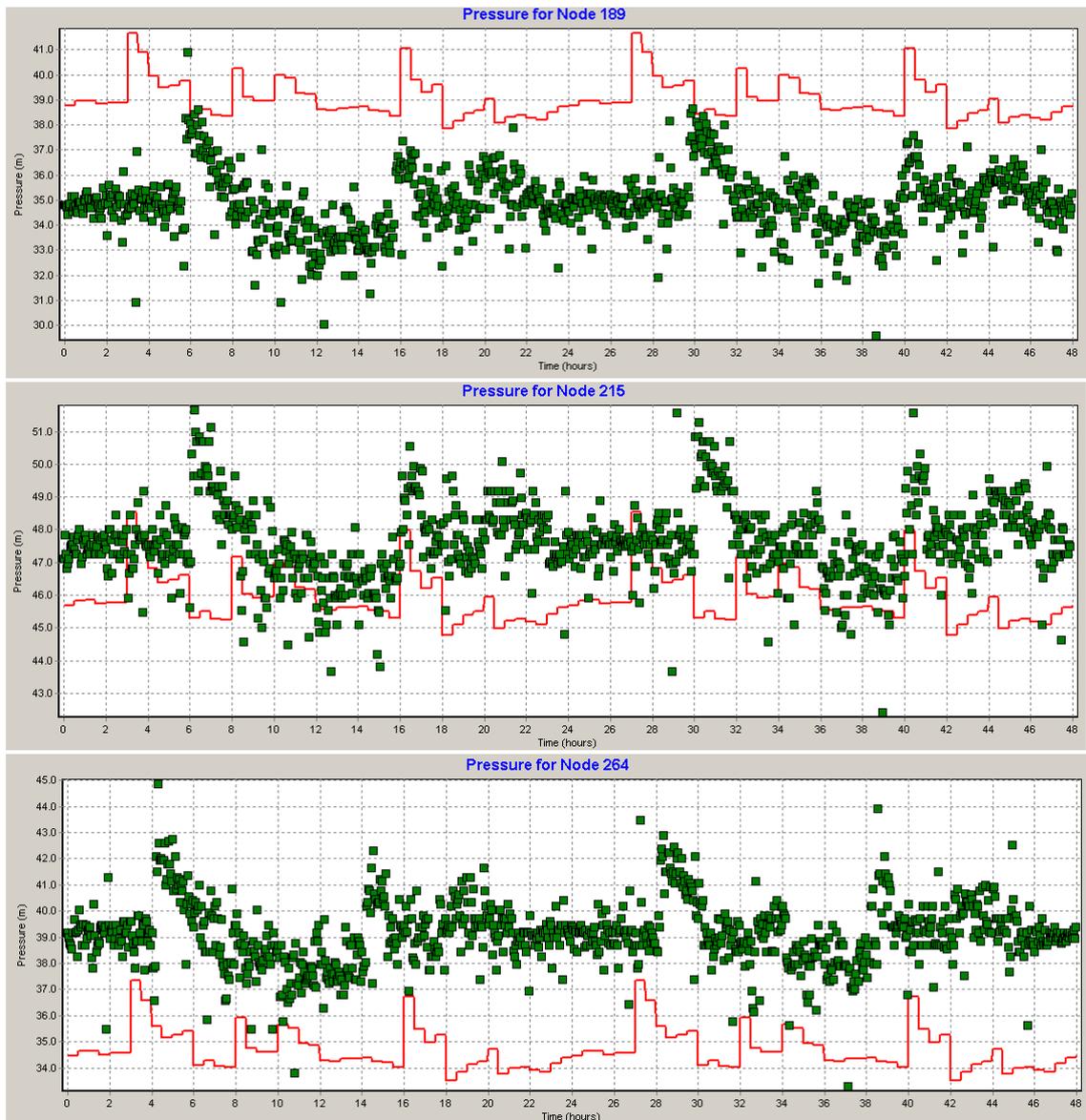


Figura 6. Presiones observadas (puntos) y simuladas (línea) en los nudos 189, 215 y 264 del sector para la validación del sistema. Fuente: elaboración propia.

Como se desea seguir analizando el tipo de ajuste encontrado, se calcula el coeficiente de determinación R^2 (el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson), un estadístico que se emplea para cuantificar la calidad del modelo para replicar las medidas obtenidas en campo. Este estadístico R^2 adquiere valores entre 0 y 1 (siendo mejor el ajuste cuánto más próximo está de 1). Como se observa en las Tablas 3 y 4, la correlación entre los caudales y las presiones que el modelo predice son igualmente válidas en ambos escenarios.

Tabla 4. Valores del coeficiente de correlación de Pearson (R^2).

	Presión	Caudal	Total
Calibration	0.516	0.863	0.929
Validation V1	0.519	0.854	0.927

4.3. El efecto energético de la deposición calcárea

Como se desea comparar el efecto energético de la deposición calcárea, se analizan dos modelos distintos, por una parte, el nuevo modelo calibrado (situación real), y la situación ideal sin deposición calcárea. El periodo en el que se realiza la simulación es $t_p=1$ día, y los resultados se muestran en la Tabla 5. La energía entrante en el sistema se disgrega en energía natural o aportada por un depósito y energía de bombeo, mientras que la energía que escapa del sistema lo hace en forma de energía “útil” (en los grifos de los consumidores), energía perdida en fugas (a través de las roturas en las tuberías), energía disipada en fricción (por rozamiento con tuberías) y almacenado en depósitos de cola (si existen).

La $E_{Input}(t_p)$ se refiere a la energía entrante en el sistema, $E_U(t_p)$ representa la energía que se escapa del sistema en el punto de consumo por el abonado (energía “útil”), $E_L(t_p)$ es la energía perdida por fugas y por último $E_F(t_p)$ es la energía que se disipa por la fricción con las tuberías.

Tabla 5. Auditorías Hídrica y energética en la red con y sin deposiciones calcáreas.

	Red real	Red ideal
	(m³/día)	(m³/día)
Volumen		
Inyectado	1122.95	1123.17
Registrado	814.52	814.52
Fugado	308.43	308.65
Energía	(kWh/día)	(kWh/día)
Entrante	175.67 (100%)	175.70 (100%)
Útil	126.86 (72.21%)	127.03 (72.31%)
Fugas	48.05 (27.35%)	48.13 (27.40%)
Fricción	0.74 (0.42%)	0.52 (0.3%)

Los resultados de la Tabla 5. muestran que:

- El rendimiento de la red es del 72.53%. Sin embargo, como este indicador no es bueno porque infravalora el consumo elevado se calcula otro indicador más fiable como las fugas por kilómetro y hora. La red de estudio tiene una longitud de 10.608 km, por lo que se sabe que el sistema pierde 1.21 m³/km/h, un nivel considerable de fugas (dicho indicador suele versar entre 0.2 y 2 para redes con pocas y muchas fugas)
- El sector está muy sobredimensionado y no existen casi pérdidas por fricción, en el caso actual (0.74 kWh/día) frente a 0.52 kWh/día. Una diferencia de 0.22 kWh/día (80.1 Mwh/año).

5. CONCLUSIONES

El modelo de calibración propuesto considera la reducción de la sección útil en las tuberías por efecto de la deposición de carbonato cálcico junto con la variación temporal de la demanda para calibrar el modelo hidráulico de la red de distribución de agua potable del sector de estudio. La calibración se realiza sin conocer la demanda total de los nudos en un caso de estudio real en una ciudad mediterránea.

Los resultados se han obtenido tras un proceso complejo en el que se ha tenido especial dificultad para conseguir fijar el caudal de entrada al sistema. La metodología muestra una buena solución puesto que refleja adecuadamente las presiones y caudales de entrada en otros días de estudio (tal y como se ha demostrado en la validación del modelo).

El estudio se podría mejorar con la inclusión de los coeficientes de rugosidad de cada tubería para ajustar más adecuadamente las presiones, aunque esto implicaría el aumento del número de variables empleadas (ya de por sí muy elevado, 665 en el presente caso de estudio). Otra posibilidad sería la modificación de la curva de modulación de la demanda en intervalos de cálculo más reducidos (es decir, cada 15, 10 ó 5 minutos). Finalmente, y de forma complementaria, cabría plantear la extracción de muestras de conducciones representativas para comparar los resultados obtenidos en la modelización con dichas muestras, con el fin de extraer conclusiones y mejorar el proceso descrito.

Por último, se ha realizado un estudio energético entre dos escenarios distintos (con y sin deposiciones calcáreas), obteniendo un resultado muy similar ya que desde la óptica energética la red de estudio tiene bajas velocidades (más del 95% de los tramos tienen velocidad inferior a 0.5 m/s en la hora punta de consumos).

REFERENCIAS

- BERARDI, F. (2018). *Hydraulic analysis and optimization of the irrigation network of the university of Alicante*. Tesi di Laurea in Irrigazione e Drenaggio. Nov. 2018. Politecnico di Bari i facoltà di ingegneria, Dicatech.
- CABRERA E., PARDO M.A., COBACHO R., and CABRERA E. JR. (2010). Energy audit of water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 669-677.
- DUAN, Q. Y., GUPTA, V. K., and SOROOSHIAN, S., (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76(3), 501-521.

- GUTIERREZ, J.C. (2003). *Modelización matemática de la calidad del agua en la red de distribución de la ciudad de Alicante*. Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Máster en Gestión y Uso Eficiente del Agua.
- HERNÁNDEZ, E., PARDO, M., CABRERA, E., and COBACHO, R. (2012). Energy Assessment of Water Networks: A Case Study. *Water Distribution Systems Analysis*, 1168-1179.
- JONKERGOUW, P., KHU S.-T., KAPELAN, Z. and SAVIC, D. (2008). Water Quality Model Calibration under Unknown Demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(4), 326-336.
- KAPELAN, Z., SAVIC, D. and WALTERS, G. (2007). Calibration of Water Distribution Hydraulic Models Using a Bayesian-Type Procedure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 927-936.
- MUNAVALLI, G.R. and MOHAN KUMAR, M.S. (2003). Water quality parameter estimation in a steady state distribution system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(2), 124–134.
- MUNAVALLI, G.R. and MOHAN KUMAR, M.S. (2005). Water quality parameter estimation in a distribution system under dynamic state. *Water Research*, 39, 4287–4298.
- MURGUI, M., CABRERA, E., PARDO, M.A. and CABRERA R., E. (2009). Estimación del consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de valencia. *Jornadas de Ingeniería del Agua*.
- PARDO, M.A. and KAPELAN, Z. (2009). *Water Quality Model Calibration using the NaCl Tracer Tests*. Report submitted to KWR (Kiwa Waterworks research). Available under request.
- PARDO, M.A., RIQUELME, A., and MELGAREJO, J. (2019). A tool for calculating energy audits in water pressurized networks. *Aims Environmental Science* (under review).
- PARDO, M.A., MANZANO, J. AND GARCÍA-MÁRQUEZ, D. (2018). Energy consumption optimization in irrigation networks supplied by a standalone direct pumping photovoltaic system. *Sustainability*, 10(11), 4203.
- ROSSMAN, L. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. Risk Reduction Engineering Laboratory, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- SANZ, G. and PÉREZ, R. (2014). Demand Pattern Calibration in Water Distribution Networks. *Procedia Engineering*, 70, 1495-1504.
- SHARP, W. and WALSKI, T.M. (1998). Predicting Internal Roughness in Water Mains. *Journal AWWA*, 34-39.

SPEIGHT, V. and KHANAAL, N. (2009). Model calibration and current usage in practice. *Urban Water Journal*, 6(1), 23-28.

VASCONCELOS, J., ROSSMAN, L., GRAYMAN, W., BOULOS, P., and CLARK, R. (1997). Kinetics of chlorine decay. *Journal of the American Water Works Association*, 89(7), 54-65.