

Calibración de un Sistema de Distribución de Agua Complejo a partir de variables SCADA

Martínez Alzamora, F.^a, Conejos, P.^b, Urban, P.^c

^a Catedrático de Ingeniería Hidráulica. E-mail: fmartine@hma.upv.es

^b Dr. Ing. Industrial. Responsable Departamento Regulación y Control de Red Agua en Alta. E-mail: pconejos@emimet.es

^c Ing. Agrónomo. Departamento de Regulación y Control de Red Agua en Alta. E-mail: purban@emimet.es

^a Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022, Valencia, España.

^{b,c} Empresa Mixta Metropolitana, S.A. Global Omnium. C/ Pedrapiquers, 4, 46014 Valencia, España

Línea temática | B. Hidrología, usos y gestión del agua.

RESUMEN

Los modelos hidráulicos son cada vez más utilizados por las compañías que explotan los servicios de suministro de agua potable para la toma de decisiones. Pero las redes de transporte y distribución del agua de muchas ciudades se han convertido en sistemas complejos de gestionar, al tener que adaptarse a los problemas de crecimiento de la población, escasez de recursos, afluencia turística, etc.

Confeccionar y calibrar un modelo hidráulico de las mismas no es sencillo. La concurrencia de diversas fuentes de agua (ETAP's, perforaciones, desaladoras, ..) junto con numerosos depósitos, rebombes, válvulas de regulación, autómatas, etc. complican enormemente la reproducción de los escenarios reales.

El presente trabajo aborda con éxito el calibrado de la red de suministro de agua a la ciudad de Valencia y área metropolitana, constituida por 6.600 nudos, 2 ETAP's, 28 depósitos, 47 bombas, 219 válvulas de regulación. La metodología seguida, que se describe con detalle en el artículo, ha sido clave para alcanzar con éxito el objetivo, con errores del 1,5 % en presiones y del 6 % en caudales, sobre la base de 20.000 datos horarios, capturados cada día por el sistema SCADA.

Palabras clave | redes de distribución de agua; sistemas complejos; modelos hidráulicos; tiempo real; calibración; ajuste demandas; puntos de corte; toma de decisiones.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día es esencial disponer del modelo hidráulico calibrado de un sistema de distribución de agua urbana para una gestión eficiente de la misma, especialmente cuando la red es muy compleja. La toma de decisiones en tareas tan variadas como evaluar planificar operaciones de mantenimiento que afecten al servicio, implantar un uso eficiente del agua y la energía, controlar la calidad del agua que le llega al usuario, evaluar la relación coste/beneficio para futuras mejoras en la red, establecer políticas óptimas para la gestión de activos, evaluar la fiabilidad del suministro y la resiliencia de la red ante cualquier eventualidad, establecer protocolos de emergencia, evaluar la afección a los usuarios en condiciones de insuficiencia de presión, etc, se basa cada vez más en el análisis de los resultados obtenidos con el modelo hidráulico, tras realizar muchas simulaciones.

Pero calibrar el modelo de una red compleja con un elevado número de tuberías, en el que además concurren múltiples depósitos, estaciones de bombeo, y válvulas de regulación, automáticas o controladas remotamente, no es una tarea fácil. La mayoría de los problemas de calibración de redes tratados en la bibliografía corresponden a situaciones estáticas en momentos puntuales (situaciones punta), o bien a modelos dinámicos de 24 horas con pocos elementos de regulación o ninguno, para el que previamente se ha realizado una labor manual de recopilación y filtrado de las medidas de campo a imponer o reproducir. En Savic et al (2009) se ofrece una recopilación muy completa sobre el panorama de las técnicas de calibración desarrolladas hasta la fecha, haciendo hincapié en las variables de ajuste a elegir, la ubicación óptima de los puntos de medida, el tratamiento

de los datos de campo, los ensayos a realizar *in situ*, y la función objetivo a minimizar en cada caso junto con las restricciones a imponer, así como en las técnicas numéricas empleadas por diversos autores para alcanzar un error mínimo. En general agrupan las técnicas de calibración en tres métodos: prueba y error, métodos explícitos y métodos implícitos, abogando por estos últimos. En el mismo trabajo contemplan también la posible calibración del modelo analizando la respuesta a fenómenos transitorios, a la que auguran poco futuro, y la calibración de modelos de calidad, cuya precisión hoy por hoy deja aún mucho que desear.

Un año después, en el Congreso WDSA de 2010, se planteó el reto de contrastar los métodos de calibración más avanzados propuestos por diversos autores, aplicados al modelo dinámico de una red sectorizada de la que se daban los valores de ciertas variables de campo tomadas desde un SCADA a lo largo de una semana, en lo que se conoce como la Batalla de la Calibración de los Modelos (Ostfeld et al, 2012). En las conclusiones de este relevante trabajo se resalta la importancia de la intervención humana antes de abordar el problema, y en particular de los operadores de la red, frente a las técnicas de optimización evolutiva tipo caja negra; se enfatiza además en la dificultad de calibrar los modelos con muchos elementos de regulación; la importancia de conocer perfectamente las curvas de las bombas; el peligro de imponer datos imposibles; la necesidad de identificar a los grandes consumidores; y también de realizar un análisis previo de la sensibilidad y observabilidad de las variables a calibrar. Concluyen resaltando que el hecho de calibrar un modelo para 24 horas no garantiza la fiabilidad del mismo para los días siguientes.

Finalmente cabe destacar el trabajo más reciente de Sophocleous et al. (2016), donde proponen aplicar técnicas de teoría de grafos para atacar el problema de la calibración. Si bien la orientación inicial es acertada en nuestra opinión, complican en exceso la identificación de los árboles de calibración, reducen el problema de calibración a redes con un solo punto de alimentación y sin elementos de regulación, y no determinan la observabilidad de las variables de ajuste consideradas pero amplían éstas para incluir el estado abierto/cerrado de las tuberías en cada instante, y los coeficientes emisores para simular fugas en ciertos nudos cuando las demandas son tomadas de la facturación, desvirtuando así el problema real de calibrar las rugosidades de las tuberías.

Todos estos trabajos anteriores olvidan que hoy en día los sistemas SCADA permiten capturar, tratar y filtrar los datos de campo tomados cada día, con una frecuencia de 5 minutos o menos, y después agruparlos para obtener valores medios horarios o quinceminutales de numerosas variables. Sin embargo, como se ha puesto de manifiesto, ello no es tan sencillo como pueda parecer a simple vista; el modelo debe reproducir con fiabilidad los valores de campo para cualquier hora y día del año, y las órdenes de control de los elementos de regulación en cada momento pueden afectar notablemente a caudales y presiones.

El objeto de la presente comunicación es describir con detalle el procedimiento seguido para alcanzar con éxito dicho objetivo en el caso una red compleja real, como es la red de suministro a la ciudad de Valencia y su área metropolitana, configurada por 2 Estaciones de Tratamiento o ETAPs, de características muy distintas al tomar el agua de ríos diferentes, por 28 depósitos, 47 bombas y 219 válvulas de regulación, con más de 15.000 medidas horarias disponibles cada día. Un problema de tal complejidad no ha sido abordado hasta ahora por ningún autor en la bibliografía revisada. El reto adicional es que el modelo calibrado para un día, debe responder correctamente para cualquier otro día próximo, lo que puede cotejarse gracias a la información suministrada continuamente por el SCADA. En otro caso, habrá que recalibrar el modelo, para lo cual será importante poder automatizar el proceso.

El objetivo de reproducir el estado de la red cada día permitirá, además de mantener el modelo siempre calibrado, cubrir otros objetivos como son: conocer el valor de numerosas variables no telemidas pero representadas en el modelo, efectuar diagnósticos sobre el comportamiento real de la red en circunstancias normales o especiales, obtener un conjunto de indicadores sobre la calidad del suministro, efectuar valoraciones sobre los consumos energéticos y su destino, y también entrenar a los operadores de la red para transmitirles un perfecto conocimiento del modo de operación del sistema, y asistirles en la toma de decisiones sobre una bases sólidas. En una etapa posterior, el modelo calibrado puede utilizarse para simular posibles operaciones a realizar antes de ejecutarlas (Bou et al, 2006), pero ello escapa de los objetivos de la presente comunicación.

En lo que sigue, primeramente se planteará el problema de la calibración en el caso más general, la selección de las variables a calibrar, y los principios básicos a tener en cuenta para alcanzar con éxito el objetivo. A continuación se describirán con más detalle cada uno de los pasos seguidos por los autores, comenzando por ajustar los caudales a través de balances hídricos; continuando con la simulación del comportamiento de los elementos de regulación, primero las válvulas y a continuación las bombas; la corrección de las cotas si fuera necesario, y finalmente la introducción de una serie de cortes estratégicos en la red para calibrar definitivamente las variables elegidas, todo lo cual constituye un procedimiento original propuesto por los autores de este trabajo, que difiere en buena medida de los métodos tradicionales de calibración propuestos hasta ahora. La última parte está dedicada a describir la aplicación de dicho procedimiento al calibrado de la red de suministro de agua a Valencia y su Área Metropolitana, para cuyo éxito ha sido además fundamental la estrecha colaboración con el personal técnico de la empresa Global Omnium.

MATERIALES Y MÉTODOS

El problema de la calibración de los modelos hidráulicos

La simulación del comportamiento de una red hidráulica se basa en aplicar la ley de conservación de la energía a todos los elementos del sistema, activos o pasivos, y la ley de conservación de la masa en todos los nudos de la red, incluidos nudos de paso, nudos de demanda y depósitos (a excepción de los embalses, que actúan como fuentes de suministro).

El comportamiento de la red en un instante dado, está determinado por los parámetros asociados a todos los elementos que forman parte de ella, a saber: longitudes, diámetros y coeficientes de rugosidad de las tuberías; diámetro y coeficiente de estrangulación de las válvulas (o consignas de operación si las válvulas son automáticas); curva características de las bombas, cotas de los nudos, demanda aplicada en los nudos de consumo (incluyendo las fugas), cota de solera y nivel de agua de los depósitos, y altura piezométrica de los embalses.

Si queremos modelar también el comportamiento dinámico del sistema, deberemos tener en cuenta además la sección de los depósitos, y la variación con el tiempo de las demandas, de la altura de los embalses (si procede), de las consignas aplicadas sobre los elementos de regulación (válvulas y bombas de velocidad variable, BVV), y del estado abierto o cerrado de tuberías, válvulas y bombas, o bien las leyes que regulan todos ellos.

Algunos de estos parámetros son físicos, mientras que otros dependen de las solicitaciones a que está sometido el sistema y de su modo de operación. A la hora de calibrar un modelo debemos distinguir claramente unos de otros

Hagamos un repaso a los parámetros físicos de los diferentes elementos objeto de calibración. Las longitudes de las tuberías suelen ser hoy en día bien conocidas, al igual que sus diámetros. En cuanto al coeficiente de rugosidad, como sabemos éste depende de la fórmula adoptada para calcular las pérdidas; mientras que la fórmula de Darcy-Colebrook caracteriza las pérdidas de carga en una tubería h a través de la rugosidad absoluta ε , conforme a la expresión:

$$h = 0.0827 f D^{-5} L Q^2 \quad , \quad f = 0.25 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.71 D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)^{-2} \quad , \quad Re = \frac{4Q}{\pi \nu D} \quad (1)$$

la fórmula de Hazen-Williams, más utilizada en los países anglosajones, lo hace a través del coeficiente C , mediante la expresión:

$$h = 10.674 C^{-1.852} D^{-4.871} L Q^{1.852} \quad (2)$$

ambas válidas para unidades SI, excepto la rugosidad ε que se expresa en mm, mientras que C es adimensional.

De acuerdo con las fórmulas anteriores, las pérdidas en una tubería dependen de su longitud L , de su diámetro interior D , y de su coeficiente de rugosidad ε (o C), pero desde un punto de vista práctico, variando cualquiera de ellas se podrían

reproducir las pérdidas reales h correspondientes a un caudal de paso Q , por lo que suele tomarse como parámetro de calibración solo el coeficiente de rugosidad, manteniendo para L y D los valores obtenidos de la cartografía. Entre los dos coeficientes referidos, es más cómodo a todos los efectos trabajar con C que con ε , debido a que la sensibilidad de las pérdidas a los valores de C es más regular, y el cálculo directo de las pérdidas dado el valor de C , o el cálculo inverso de C dadas las pérdidas, resulta más simple. Se puede deducir el valor equivalente de ε si se prefiere trabajar con la fórmula de Darcy-Colebrook, despejando de la siguiente expresión (Martínez et al, 2005), válida para valores de ε entre 0,001 y 1 mm:

$$C = -6.71 (\log \varepsilon)^2 - 33.92 \log \varepsilon + 111.94 \quad (3)$$

Si revisamos ahora a los parámetros que caracterizan el comportamiento de las válvulas, las pérdidas provocadas por éstas se expresan como:

$$h = 0.0827 k D^{-4} Q^2 \quad (4)$$

donde D es el diámetro de la válvula (puede ser diferente del de la tubería), y k es un coeficiente adimensional que depende del grado de apertura de la válvula, el cual puede tomar valores tan pequeños como $k = 0,1$ para válvula abierta, hasta $k = 100.000$ para válvula casi cerrada. El valor de k viene ligado a la posición del obturador, pero aunque se registre la posición de éste, su determinación a partir de la posición no es inmediata, ya que las curvas proporcionadas por los fabricantes no son fiables tras el paso del tiempo, siendo necesario realizar una calibración previa. En su lugar, el valor real de k se puede deducir de las medidas disponibles del caudal de paso y de la presión en ambos extremos de la válvula; si no se dispone de las tres medidas, la solución más práctica es emular el comportamiento de la válvula de control remoto mediante una válvula automática cuya consigna sea alguna de las variables medidas.

Las bombas, por su parte, se comportan de acuerdo con su curva característica. Ahora bien, aunque se disponga de la curva del fabricante, ésta será también poco fiable tras el paso del tiempo. Si además la bomba es de velocidad variable (BVV) a la incertidumbre de la curva real hay que añadir la incertidumbre sobre cómo ésta se ve afectada por la velocidad de giro. En su lugar, si se dispone de la medida de la presión en aspiración e impulsión y/o del caudal impulsado, podrá estimarse el comportamiento efectivo de la bomba a partir de dichas medidas, como más adelante se detallará.

El siguiente parámetro relevante en el proceso de calibración son las cotas de los nudos, incluidas las cotas de solera de los depósitos. En efecto, para calibrar el modelo la única medida posible es la presión, pero las pérdidas dependen de las alturas piezométricas, y éstas se obtienen sumando a las presiones las cotas correspondientes, de modo que un error en la cota se transmite a la altura, y ello sí afecta a la hora de cotejar los resultados del modelo con las medidas de campo. Teniendo en cuenta la incertidumbre en su medida y la asociada a la medida del propio manómetro, y considerando la importancia que tienen los valores de las alturas piezométricas a reproducir durante la calibración, ello nos conduce a tener que considerar las cotas de los puntos de medida (y en ocasiones también las cotas de solera de los depósitos o las alturas de los embalses) como variables de ajuste en el proceso de calibración, al margen de cualquier estimación previa.

Finalmente, queda por referirnos a las demandas de la red. Aunque lo ideal sería medir éstas en todos los nudos, en una red de distribución en baja, las demandas dependen de los consumos de abonados domésticos e industriales. Hasta ahora los consumos medios en los nudos se determinaban a partir de las lecturas periódicas de los contadores alimentados desde cada nudo, cuando no se obtenían repartiendo entre ciertos nudos los consumos agrupados de una calle o de un sector, siguiendo algún criterio. En un futuro muy próximo, gracias a la telelectura, podremos saber los consumos diarios de cada contador, o incluso su variación horaria. Aun así, los caudales horarios inyectados a un sector, medidos por los caudalímetros de entrada/salida del mismo, deberían coincidir con la suma de los caudales registrados por los contadores del sector, lo que difícilmente ocurrirá a causa de las fugas, del agua no registrada o de los errores de lectura de los contadores. El proceso de calibración en este caso consistirá en ajustar hora a hora las demandas en los nudos de la red a los caudales inyectados, ya que el simulador asume la conservación de la masa en toda la red, y si ello no se cumple, difícilmente podremos reproducir los caudales medidos por los caudalímetros de red o las variaciones de nivel en los depósitos.

En resumen, a lo largo del proceso de calibración consideraremos como variables de ajuste las demandas en los nudos, las cotas de los puntos de medida de la presión, y las rugosidades de las tuberías, mientras que los coeficientes de las válvulas y las curvas de las bombas deberán determinarse a partir de las medidas de campo cuando sea posible, como va a ser nuestro caso. Pero el procedimiento que vamos a seguir para ajustar cada una de estas tres variables, demandas, cotas y rugosidades, va a ser distinto en cada caso como veremos. Para justificar esta distinción, y a modo de conclusión del presente apartado, nos referiremos a los **cuatro principios básicos** a tener en cuenta en la calibración de un modelo en periodo extendido:

1. *Para poder reproducir las fluctuaciones diarias de la presión en cualquier nudo del modelo, antes se deben ajustar bien las fluctuaciones de nivel en los depósitos y las fluctuaciones de caudal en el trayecto que va desde éstos hasta el nudo considerado.*
2. *Si en la red existen elementos de regulación, el comportamiento de éstos debe reproducirse fielmente a partir de las medidas de campo*
3. *En la situación de caudales mínimos, las pérdidas en casi todas las conducciones suelen ser despreciables. En consecuencia, las alturas piezométricas, suma de la presión más la cota, en todos los nudos de un sector deben ser muy parecidas para la hora de menor consumo, y en todo caso, disminuir ligeramente en el sentido del flujo. Si en algún caso, la altura piezométrica aumentara aguas abajo, habrá que revisar el valor de las cotas, o revisar la calibración de los manómetros.*
4. *Finalmente, una vez reproducidas correctamente las variaciones de caudal, ajustadas las alturas piezométricas para la situación de caudales mínimos, y reproducidas las pérdidas y ganancias en los elementos de regulación, procede ya revisar las rugosidades de las tuberías, fundamentalmente para la hora punta en que las pérdidas son mayores. A tal fin además, es conveniente identificar los trayectos del flujo principal que conduce el agua desde las fuentes hasta los nudos de consumo, y seguir el sentido de dichos trayectos en el proceso de calibración.*

La combinación de estos cuatro principios determina el procedimiento de calibración propuesto, que se expone con detalle en los apartados siguientes. Primeramente deben identificarse los sectores de demanda a partir de los caudalímetros disponibles, y ajustarse los caudales y su variación en el tiempo. A continuación hay que tomar una decisión sobre cómo emular el comportamiento de válvulas y bombas, en base igualmente a las medidas disponibles. Seguidamente deben calibrarse las cotas de los nudos para la situación de caudal mínimo. A continuación hay que delimitar los sectores de calibración a través de una serie de cortes estratégicos, y finalmente ajustar las rugosidades de las tuberías para la situación de caudal máximo al menos, conforme los trayectos principales del flujo hasta cada nudo.

Siguiendo estos cuatro principios, en una red suficientemente monitorizada, el éxito de la calibración está garantizado. Además, el proceso anterior es programable, y puede realizarse cada día a partir de los datos del SCADA

Pasos previos. Obtención del modelo base

El punto de partida será pues un modelo hidráulico base que contenga todas las tuberías y elementos de regulación relevantes. El modelo puede construirse a partir de un fichero CAD o a partir de un conjunto de ficheros shape exportados desde el GIS corporativo. Normalmente, la información capturada desde estos sistemas habrá que tratarla posteriormente para configurar el modelo base. La aplicación GISRed, desarrollada por el grupo REDHISP del IIAMA (Martínez et al, 2004), permite facilitar en gran manera esta labor.

La información a incorporar en el modelo base para las tuberías reales o equivalentes será su longitud y diámetro. En cuanto a la rugosidad, una vez adoptada la fórmula de pérdidas, habrá que asignar un valor de partida inicial al coeficiente de rugosidad de cada tubería, ya sea ε_0 ó C_{00} , al margen de que después dichos valores puedan ser corregidos en el proceso de

calibración. Para ello puede ser fundamental disponer al menos del material y edad de cada una de las tuberías, información que suele estar también disponible en la cartografía. En el manual de EPANET (Rossman, 2000) se ofrecen valores orientativos.

El paso siguiente será asignar la información asociada a los elementos de regulación y finalmente habrá que fijar las cotas de todos los nudos, depósitos y embalses refiriéndonos en el caso de los depósitos a la cota de solera, en los embalses a la cota de la lámina de agua, y en los puntos de medida de presión a la cota de la esfera del manómetro o del transductor. No obstante estas cotas serán revisadas en el proceso de calibración.

El último paso es asignar las demandas base en los nudos, a partir de los valores medios de la demanda diaria, en el entorno del día de calibración. Puesto que las demandas horarias en los nudos se ajustarán posteriormente, la asignación de unas demandas base (o demandas medias) en cada nudo del modelo no requiere demasiada exactitud en esta etapa. Por ello puede asignarse por ejemplo la demanda media de un mes en torno a la fecha de calibración, tomada de los datos de facturación, o utilizar técnicas de reparto por calles, rutas de lectura, densidad de población, tipología de vivienda, etc. El objetivo de la asignación de las demandas base es utilizarlas posteriormente como factores de ponderación, para repartir definitivamente la demanda instantánea detectada por los caudalímetros, como veremos en seguida.

Pasos previos. Captura, tratamiento y filtrado de los datos

Una vez confeccionado el modelo base, los pasos previos prosiguen con la identificación correcta de todos los puntos de medida (presiones, caudales, niveles, posiciones de válvula y estados de bombas), El origen de los datos a utilizar en la calibración del modelo pueden ser muy variados, y también su naturaleza, precisión y fiabilidad. Las variables de medida más importantes para la calibración son las presiones en nudos críticos y los caudales circulantes por las tuberías más relevantes. A las presiones hay que añadir la medida de los niveles en los depósitos. A su vez todas estas medidas pueden ser en tiempo real o en tiempo diferido (registradas en data-loggers y transmitidas con cierta periodicidad).

Para la calibración de un modelo suele trabajarse con los promedios horarios de presiones y caudales. Sin embargo, una hora puede ser mucho tiempo para algunos fines, pudiendo reducirse la frecuencia hasta los 15 min ó 10 min, lo que en tal caso complicará el proceso de calibración. Para tiempos de promedio inferiores, por ejemplo 1 min ó 5 min, las medidas todavía fluctúan demasiado, haciendo el proceso de calibración inviable.

Además de la medida de estas tres magnitudes, cuando existen elementos de regulación en la red como válvulas y bombas, se deben registrar otras variables ligadas al modo de operación de éstas. Para las válvulas automáticas suele registrarse la variable de consigna (presión o caudal) y en las válvulas de control remoto, además debe registrarse la posición de la lenteja o del obturador en cada momento, siendo ésta una variable instantánea medida en tiempo real.

En el caso de las estaciones de bombeo, equipadas en el caso más general con varias bombas de velocidad fija o una o dos de velocidad variable, es importante registrar el estado de las bombas fijas y la velocidad de giro de las variables. El estado de las bombas suele almacenarse al cambio, lo que obliga a aplicar un proceso de sincronización previo para llegar a un estado único para cada intervalo de simulación. En cuanto a la velocidad de giro es una variable instantánea y raramente se mide y almacena. Si además tenemos en cuenta que la medida de caudal suele ser única para toda la estación y no por bomba, todo ello viene a complicar notablemente la reproducción de funcionamiento de las bombas en el modelo, pues a veces las bombas arrancan y paran varias veces en el intervalo de una hora. Más adelante se comenta la solución propuesta por los autores para estos casos.

Como hemos visto, la naturaleza y casuística de las diferentes variables medidas en una red de abastecimiento es muy variada. A la hora de imponer sus valores al modelo o de utilizarlas como contraste de los valores calculados, hay que realizar siempre un tratamiento previo de las mismas. Otra cuestión a tener en cuenta es el filtrado de los datos. Valores fuera de rango, valores que no cambian, o huecos deben reemplazarse por valores estimados, ya que todos los valores a imponer al modelo deben estar perfectamente definidos.

Todo el proceso de tratamiento de los datos de campo debe automatizarse al máximo, pues el objetivo que nos proponemos no es calibrar el modelo para un día en particular, sino mantener siempre a punto un modelo hidráulico fiable para su explotación en tiempo real. La aplicación SCARed, desarrollada por el IIAMA de la UPV para la conexión del modelo con los datos de campo, dispone de una base de datos propia para alojar los valores históricos de las variables que alimentan el modelo, la cual contempla todas las circunstancias mencionadas hasta aquí. Por su parte Global Omnium, (Conejos, P. 2017) tiene implantado en su centro de control la conexión del modelo calibrado con el SCADA (caso práctico que se expondrá al final de este trabajo, y ha mejorado en los últimos años la configuración y mantenimiento de la base de datos necesaria para ello, disponiendo de personal especializado que garantizan la calidad y fiabilidad de los datos de campo almacenados.

Con el modelo base de partida y las señales de campo debidamente sincronizadas, tratadas y filtradas, estamos ya en condiciones de iniciar el proceso de calibración.

Ajuste de las demandas

El ajuste de las demandas tiene como objetivo reproducir los caudales entrantes a la red desde las fuentes de suministro, las variaciones de nivel en los depósitos y las medidas de los caudalímetros más importantes, sin violar el cumplimiento de la ecuación de continuidad. Usualmente, la suma de los caudales registrados en los nudos de la red serán menores que el caudal total entrante a causa de las fugas y el agua no registrada (ANR), por lo que habrá que incrementar éstos debidamente.

Para llevar a cabo el proceso de ajuste de las demandas distinguiremos entre *sectores de inyección*, delimitados por las fuentes de suministro, los depósitos de regulación y los caudalímetros más relevantes y *sectores de demanda*, delimitados por otros caudalímetros de segundo nivel. Los sectores de inyección agrupan a los sectores de demanda y éstos a su vez agrupan a los diferentes nudos del modelo. El primer paso será particionar completamente la red en sectores de demanda, delimitados por caudalímetros y depósitos existentes (ya que su caudal neto puede determinarse a partir de las variaciones de nivel), de modo que todos los nudos del modelo pertenezcan a alguno de los sectores identificados. Los algoritmos de exploración de grafos nos pueden ayudar en tal cometido (Sedgewick et al, 2011). Es posible que haya sectores que no contengan ningún nudo de demanda (solo nudos de paso), en cuyo caso a partir de ellos determinaremos los sectores de inyección, agrupando a tal fin los sectores sin demanda con otros sectores con demanda para crear así un nivel de agrupación superior. La nueva agrupación en sectores de inyección deberá a su vez cubrir la totalidad de la red. Puede darse el caso de confundir un sector de inyección con un sector de demanda, o incluso en una red podrían no declararse sectores de inyección, lo que simplificaría el ajuste.

Admitiremos en principio que todo **sector de demanda** tiene una curva de modulación asociada, la cual se aplica a todos los nudos de su interior. Si $q_{d,j}$ es el caudal total consumido por un sector de demanda en la hora j , éste vendrá dado por:

$$q_{d,j} = \sum_e q_{e,j} - \sum_s q_{s,j} \quad (5)$$

siendo $q_{e,j}$ y $q_{s,j}$ los caudales horarios registrados por los caudalímetros de entrada y salida del sector.

Por otra parte, si \bar{q}_d es la suma de los caudales base \bar{q}_i asignados a todos los nudos del sector (puede ser un solo nudo), esto es, $\bar{q}_d = \sum \bar{q}_i$, el factor de la curva de modulación de la demanda del sector a la hora j será:

$$f_{d,j} = q_{d,j} / \bar{q}_d \quad (6)$$

Observemos que tal como los hemos definido, dicho factor incorpora ya el rendimiento hidráulico, de modo que la suma de los 24 factores de un día no será 1, pero se cumplirá para cualquier periodo de tiempo elegido $\sum_j q_{d,j} = \bar{q}_d \sum_j f_{d,j}$. Consideremos ahora un **sector de inyección** que agrupa a varios sectores de demanda, cada uno con su curva de modulación propia. Si $Q_{s,j}$ es el caudal total inyectado al sector en la hora j , se tendrá análogamente:

$$Q_{s,j} = \sum_e Q_{e,j} - \sum_s Q_{s,j} \quad (7)$$

siendo ahora $Q_{e,j}$ y $Q_{s,j}$ los caudales horarios registrados por los caudalímetros de entrada y salida del sector de inyección. Muy probablemente $Q_{s,j}$ no coincida con la suma de los caudales $q_{d,j}$ consumidos en los sectores de demanda que agrupa, lo que nos llevará a tener que ajustar éstos últimos para que el caudal inyectado al sector coincida con los caudales demandados en los nudos interiores del mismo. A tal fin, admitiremos que tenemos gran confianza en las medidas de los caudalímetros de algunos sectores de demanda, cuya curva no queremos modificar, dejando a cambio otros sectores para el ajuste. Si diferenciamos unos y otros por el supraíndice f (fijo) y m (modificable), haciendo un reparto proporcional de las desviaciones entre todos los sectores de demanda modificables del sector de inyección, el nuevo valor del factor de modulación del caudal de dichos sectores en la hora j pasará a ser:

$$\hat{f}_{d,j}^m = f_{d,j}^m \frac{Q_{s,j} - \sum_s q_{d,j}^f}{\sum_s q_{d,j}^m} = f_{d,j}^m k_{s,j} \quad (8)$$

siendo $k_{s,j}$ un coeficiente de corrección común para todos los sectores de demanda modificables del sector de inyección. Observemos que la corrección propuesta hará que la suma de los caudales demandados en los nudos de los sectores de demanda modificados ya no coincida con la suma de caudales registrados por los caudalímetros que los alimentan, pero es preferible descuadrar éstos que no los valores medidos por los caudalímetros generales, si queremos llegar a reproducir las variaciones de nivel en los depósitos y los caudales inyectados por las fuentes de suministro.

Finalmente, si los sectores de inyección cumplen la ecuación de continuidad entre el caudal inyectado y el demandado en sus nudos internos en cualquier momento, cualquier agrupación de éstos también la cumplirá, y por tanto, para la red en conjunto podremos decir que el caudal total entrante a la red, de acuerdo con los caudales inyectados por las fuentes de suministro y depósitos, será igual a la suma de los caudales consumidos en todos los nudos. Otra cosa será que los caudales entrantes se distribuyan conforme a las medidas de caudal de cada una de las fuentes, lo que constituirá una de los objetivos de proceso de calibración en las etapas siguientes.

Caracterización de los elementos de regulación

La presencia de elementos de regulación en la red puede complicar en gran manera el proceso de calibración. Las propiedades físicas de estos elementos cambian en cada momento, de modo que no podemos identificar sus parámetros como un valor único a lo largo del periodo de simulación. Una posible solución al problema es asumir una curva de comportamiento de los mismos,

Sin embargo, lo más fiable es determinar el estado de los elementos de regulación en cada momento a partir de la medición de las variables hidráulicas asociadas al mismo, en particular, las presiones aguas arriba y aguas abajo, y el caudal de paso. En la práctica no es necesario medir todas ellas, pero sí al menos algunas. Las variables medidas nos determinarán el modo de tratar dichos elementos en el proceso de calibración. En particular las **válvulas automáticas** son las más fáciles de modelar. Por ejemplo, si en el sistema hay PRV, y se mide la presión aguas abajo, sus valores en cada instante podrán tomarse como consignas de regulación impuestas.

En general, para las **válvulas de control remoto** podemos proceder de modo similar. Si medimos **una de las tres variables** asociadas, podremos emular su comportamiento asumiendo que la válvula actúa como una válvula automática cuya consigna es el caudal de paso medido (FCV), la presión medida aguas abajo (PRV) ó la presión medida aguas arriba (PSV), y dejar de un lado la posición del obturador, aunque dispongamos de su medición (casos a), b) y c) de la tabla 1). En caso de medir **dos variables**, podremos elegir una de ellas para forzar el comportamiento de la válvula como una válvula automática, y dejar la otra como variable de ajuste en el proceso de calibración del resto de la red., (caso d) de la tabla 1 (caso e) de la tabla 1) Finalmente, si medimos las **tres variables** (caso f) de la tabla 1), una vez elegida la variable que actuará como consigna, las otras dos quedarán como variables de ajuste. En este caso particular, como alternativa podemos también emular el comportamiento de la válvula como una TCV, cuyo valor de k se determinaría despejando de la ecuación (4); una vez ajustados los valores de dos de las variables, la tercera se ajustaría automáticamente gracias al valor de k asignado a la válvula. Este es el

modelo recomendado para válvulas bidireccionales en las que el sentido del flujo puede cambiar a lo largo de la simulación. Hay que llevar cuidado con los valores forzados como consignas de una válvula, pues no siempre se pueden cumplir.

<p>1 punto de medida</p>	<p>a) </p>	<p>b) </p> <p>c) </p>
<p>2 puntos de medida</p>	<p>d) </p>	<p>e) </p>
<p>3 puntos de medida</p>	<p>f) </p>	

Tabla 1 | Ejemplos de emulación del comportamiento de válvulas en función de las variables medidas. Las variables de ajuste se indican con ?

Para la simulación del comportamiento de las bombas es fundamental conocer en cada momento el estado de marcha o paro de las mismas, así como su velocidad de giro si las bombas son BVV. Una solución práctica para ajustar las curvas características cuando se conoce la altura de bombeo y el caudal total consiste en asumir que, si la bomba es única entonces es una BVV, y si se trata de una EB que una de ellas es una BVV y las demás son fijas. Si $H_{BVF,i}(Q)$ es la curva asignada a la bomba de velocidad fija i , y $H_{BVV}(Q, \alpha)$ la curva de la bomba de velocidad variable, el caudal bombeado por cada una de las bombas fijas en operación para la altura H_b medida será $Q_{BVF,i} = H_{BVF,i}^{-1}(H_b)$, y si el caudal total medido es Q_b , la velocidad de giro de la BVV deberá ser:

$$\alpha = H_{BVV}^{-1}(H_b, Q_{BVV}) \quad , \quad \text{con} \quad Q_{BVV} = Q_b - \sum_{Bon} Q_{BVF,i} \tag{11}$$

De este modo, fijadas las bombas en operación y calculada la velocidad de giro α de la BVV, una vez ajustada la presión de impulsión para un instante dado, el caudal total bombeado quedará también ajustado automáticamente para ese mismo instante.

En resumen, para modelar el comportamiento de un elemento de regulación se requiere conocer su curva de respuesta y el modo de operación en cada instante. Sin embargo, en el caso de las válvulas, en lugar de reproducir el modo de operación, si se mide una de las tres variables asociadas (caudal, presión aguas arriba y presión aguas abajo), ésta puede forzarse en el modelo, y si además se miden alguna de las otras dos, deberán dejarse como variables de ajuste. En el caso de las bombas, si se mide la altura ésta deberá ajustarse en el proceso de calibración, mientras que si se mide también el caudal, éste puede vincularse a la altura asumiendo que una de las bombas es una BVV, y calculando a continuación la velocidad de giro ficticia conveniente, con lo que en cualquier caso tendremos una sola variable de ajuste (o dos si se trata de un rebombeo directo con la presión de aspiración determinada por el comportamiento de la red).

Ajuste de las cotas de los nudos

Otro problema que puede presentarse en la calibración del modelo de una red es la asignación en el modelo base de unas cotas en los depósitos, embalses o puntos de medida de presión incompatibles con las leyes de la hidráulica. En efecto, la ley de los vasos comunicantes nos dice que las alturas piezométricas de dos nudos conectados entre los que no circula caudal deben ser iguales. Si medimos la presión en ambos, las cotas asignadas a los nudos deben cumplir dicha condición. En general, aunque el flujo no sea nulo, habrá una situación de flujo mínimo entre ambos a lo largo del periodo de simulación (normalmente en las horas nocturnas) y en tal caso podremos afirmar que la piezométrica en el nudo aguas arriba menos las pérdidas deberá ser igual a la piezométrica en el nudo aguas abajo, esto es, $(p_i/\gamma + z_i) - \sum_{L_{ij}} \text{sign}(q_{min}) * h_\ell(q_{min}) = (p_j/\gamma + z_j)$, donde el sumatorio de las pérdidas se extiende a todos los segmentos ℓ del tramo L_{ij} que va del nudo i al nudo j , para el valor mínimo absoluto de éstas. En general, si dicha condición no se cumple, y asumimos que las medidas de presión en los nudos i y j son correctas, habrá que corregir debidamente la cota z_i , la cota z_j ó ambas. En general dicha condición deberá cumplirse para cualquier par de puntos de medida de presión elegidos, cuando las pérdidas sean mínimas (o nulas). Si para ello hay que corregir alguna cota, queremos además hacerlo en la menor cantidad posible y para el menor número de ellas.

Una forma práctica de aplicar esta condición consiste en resolver el siguiente problema de minimización sin restricciones:

$$\text{Min } \sum_{j \in P} \left((p_i/\gamma + z_i) - \sum_{L_{ij}} \text{sign}(q_{min}) * h_\ell(q_{min}) - (p_j/\gamma + z_j) \right)^2 \quad (12)$$

formulado en las variables z_j (z_i) correspondientes a las cotas de todos los puntos de medida de presión, excluidos depósitos y embalses cuyas cotas admitiremos en principio fijas para no afectar a los flujos (no obstante podrían revisarse tras analizar los resultados). Cada término del sumatorio representa un trayecto entre dos puntos de medida consecutivos i y j , estando las pérdidas calculadas para la condición de flujo mínimo entre ambos puntos.

Una forma práctica de elegir dichos trayectos consiste en trazar un árbol de máxima expansión y mínimas pérdidas (Christofides, 1975) desde la fuente de suministro principal, para cada uno de los instantes de simulación, y seleccionar de entre todos ellos las situaciones de mínimas pérdidas entre cada par de puntos de medida adyacentes.

Finalmente se resuelve el problema de mínimos derivando la expresión general respecto a cada una de las cotas z_j a revisar, las cuales se obtendrán como solución de un SEL (las pérdidas en los trayectos actúan como constantes, al mantener por ahora los coeficientes de rugosidad asignados y asumir que los caudales obtenidos al equilibrar la red no cambian al corregir las cotas).

Identificación de los cortes de calibración

Ajustados los caudales, y corregidas las cotas si fuera necesario, antes de pasar a corregir las rugosidades queda por hacer aún un paso fundamental, que caracteriza el método propuesto. Se trata de introducir una serie de cortes de calibración en cada uno de los puntos de entada o salida de los sectores de inyección (o de demanda) antes definidos, al objeto de aislar éstos del resto y facilitar así la calibración por etapas.

El corte típico sería el mostrado en la Tabla 2, caso a), al que también denominaremos de tipo DEM-INY, donde la línea en la que se ha medido el caudal aparece punteada, para indicar su cierre provisional. En el nudo aguas arriba se extrae el caudal medido Q , y en el nudo aguas abajo se inyecta el mismo caudal Q . Los dos nudos extremos, cada uno perteneciente a un sector, pasan así a ser nudos de caudal fijo, cuya presión está por determinar, pero sea cual sea finalmente su valor, deberán coincidir las presiones de un extremo y otro, lo que constituye un primer objetivo a alcanzar con la calibración. Sin embargo, si en el mismo punto en que se mide el caudal se mide también la presión, caben entonces tres opciones más para declarar dicho corte, como se muestra en la misma Tabla 2. Así podemos forzar la presión en el nudo aguas abajo y el caudal en

el nudo aguas arriba, caso b), en cuyo caso el corte será de tipo DEM-EMB; forzar ambas variables en los extremos contrarios, caso c), en cuyo caso el corte será del tipo EMB-INY, o bien forzar la presión en ambos extremos, caso d), en cuyo caso el corte será del tipo EMB – EMB.

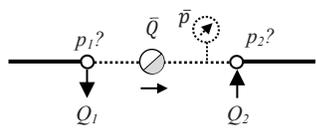
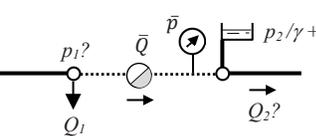
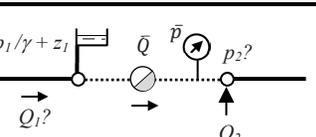
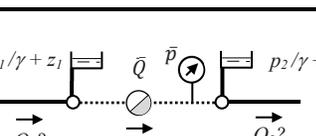
a) DEM - INY		Medidas	\bar{Q} (\bar{p} opcional)
		Forzado	$Q_1 = Q_2 = \bar{Q}$
		Ajustes	$p_1 = p_2?$ ($p_1 = p_2 = \bar{p}?$)
b) DEM - EMB		Medidas	\bar{Q} y \bar{p}
		Forzado	$Q_1 = \bar{Q}$, $p_2 = \bar{p}$
		Ajustes	$p_1 = \bar{p}?$, $Q_2 = \bar{Q}?$
c) EMB - INY		Medidas	\bar{Q} y \bar{p}
		Forzado	$Q_2 = \bar{Q}$, $p_1 = \bar{p}$
		Ajustes	$p_2 = \bar{p}?$, $Q_1 = \bar{Q}?$
d) EMB - EMB		Medidas	\bar{Q} y \bar{p}
		Forzado	$p_1 = p_2 = \bar{p}$
		Ajustes	$Q_1 = Q_2 = \bar{Q}?$

Tabla 2 | Distintos tipos de cortes de calibración, en función de las variables forzadas y las variables de ajuste..

Tendremos ahora un reto adicional a cumplir, en el caso a) que las presiones en ambos nudos sean iguales, y en caso de medir la presión, además que coincidan con ésta. En el caso b) que el caudal entrante al embalse sea igual al caudal medido y la presión en el nudo de inyección igual a la medida, y al contrario en el caso c). Finalmente en el caso d) que los dos caudales de los embalses sean iguales al caudal medido (recordemos que en un corte de calibración el caudal siempre es medido)

El aislamiento total de un sector de inyección mediante cortes de calibración solo podrá hacerse si en el sector existe alguna medida de presión, ya sea en un punto de entrada/salida del caudal o en su interior.

Ajuste de las rugosidades de las tuberías

Llegamos finalmente a la etapa de calibración de las rugosidades, la cual abordaremos por fases, centrando cada una sobre los elementos de un determinado sector de inyección o de demanda. Así como la revisión de las cotas se hizo para la situación de caudales mínimos, la revisión de las rugosidades se hará para la situación de caudales máximos, cuando las pérdidas sean mayores. Por otra parte, como no hay garantía de medir las presiones en todos los puntos de corte, conviene realizar la calibración desde los sectores más alejados, avanzado en el sentido aguas arriba hasta llegar a las fuentes de suministro.

El procedimiento propuesto para ajustar las rugosidades de las tuberías está basado de nuevo en la creación de un árbol de máxima expansión y máximo coste, en este caso a nivel de sector, tomando como función de costes los caudales circulantes en valor absoluto, obtenidos tras equilibrar la red para las rugosidades actuales y la situación de máximo consumo, como ya se ha dicho. Una vez trazado el árbol, se utilizará el mismo para definir los trayectos que unen la raíz, o punto de presión de partida con los extremos del lado del sector de cada uno de los cortes, y también con los puntos de medida de presión interiores si los

hubiera. Las rugosidades serán modificadas para alcanzar la diferencia de alturas piezométricas medida entre el inicio y el final del trayecto para los caudales circulantes medidos.

Finalizado el proceso de calibración de un sector (o sectores contiguos), se pueden ya abrir los cortes que lo aislaban y restaurar la red original en esa parte, eliminando los caudales aplicados en los extremos de éstos o los embalses ficticios declarados. Si todo ha ido bien, no deberá apreciarse ningún cambio. El proceso de calibración continuará con los sectores adyacentes en el sentido aguas arriba como se ha dicho, hasta completar toda la red.

La forma de proceder propuesta permite analizar los problemas que puedan ir surgiendo paso a paso. Cada vez que se calibra un sector (o un conjunto de sectores contiguos), sabemos que dicha calibración es definitiva, y no se verá afectada por la calibración de otros sectores. Por otra parte, realizada la calibración la primera vez, y definidos todos los trayectos utilizados para ello, éstos pueden mantenerse para futuras calibraciones y automatizar así el proceso, cuyo coste computacional será mínimo al tratarse de un procedimiento determinista y directo.

APLICACIÓN A UN CASO REAL Y RESULTADOS

La red de suministro de agua a Valencia y su área Metropolitana se alimenta desde dos plantas de tratamiento, ambas distantes más de 10 km de la ciudad, con diferentes garantías de suministro y calidad del agua en origen, distintos costes de producción, y depósitos de almacenamientos de diferente capacidad y cota, siendo necesario bombear el agua antes de aportarla a la red. Desde dichas plantas el agua es distribuida mediante gravedad a la ciudad y los 45 municipios que constituyen el área metropolitana, a través de una red en alta de 200 Km de longitud, que alimenta directamente a las redes de distribución en baja de cada municipio. Las presiones son reguladas gracias a un conjunto de válvulas y depósitos intermedios, todos ellos controlados y operados en tiempo real desde un Centro de Control donde se recibe la información de 175 estaciones remotas.

El carácter mallado de red y la interconexión de los distintos sistemas de demanda le confiere un grado de flexibilidad importante para responder ante situaciones imprevistas, si bien su control exige un conocimiento profundo del sistema y una operación en tiempo real, lo que motivó desde hace años la confección de un modelo matemático como herramienta de apoyo. Dicho modelo, disponible desde 1993 y revisado en diversas ocasiones, es actualmente un modelo estratégico que alcanza hasta las tuberías de 200 mm. Tiene 625 km de longitud, 6.660 nodos, 28 depósitos, 47 bombas y 219 válvulas de regulación, de las cuales 115 son válvulas hidráulicas reductoras de presión y el resto válvulas motorizadas operadas desde el centro del control. Dicho modelo se alimenta a partir de las medidas recibidas en tiempo real y diferido a través del sistema de telemando. La figura 1 muestra el trazado de la red y la distribución de los elementos de regulación en GISRed.

La complejidad del sistema hidráulico y el gran volumen de datos disponible, convertía en un verdadero reto la calibración de dicho modelo para reproducir con precisión los valores de campo observados día a día y hora a hora. Ante este desafío, se aplicaron los principios descritos en la introducción de este trabajo y la metodología expuesta en los apartados siguientes.

El primer paso para ello fue hacer un inventario detallado de todas las señales disponibles, diferenciando las variables en tiempo real. Todas ellas se declararon en la base de datos de SCARed y se registró la correspondencia entre su nombre en el SCADA y en el modelo. En la BdD se crearon tablas para el almacenamiento de los valores históricos de todas las variables cada 5 min, 15 min y 1 hora, alojando un total 20.000 datos diarios con frecuencia horaria, ó 80.000 datos diarios con frecuencia de 15 min y hasta 240.000 datos a intervalos de 5 min. El proceso de captura y almacenamiento de las variables diferidas se diseñó para contemplar todo tipo de incidencias, y se desarrollaron algoritmos para sincronizar y filtrar todas las variables, incluidos estados de bombas y posición de válvulas.

Seguidamente, a partir de la localización de los caudalímetros y depósitos, se identificaron 97 sectores de demanda con sus correspondientes curvas de modulación y 21 sectores de inyección, los cuales se utilizaron para ajustar los consumos internos de los sectores de demanda. para poder reproducir finalmente los caudales inyectados y las variaciones de nivel en los depósitos.

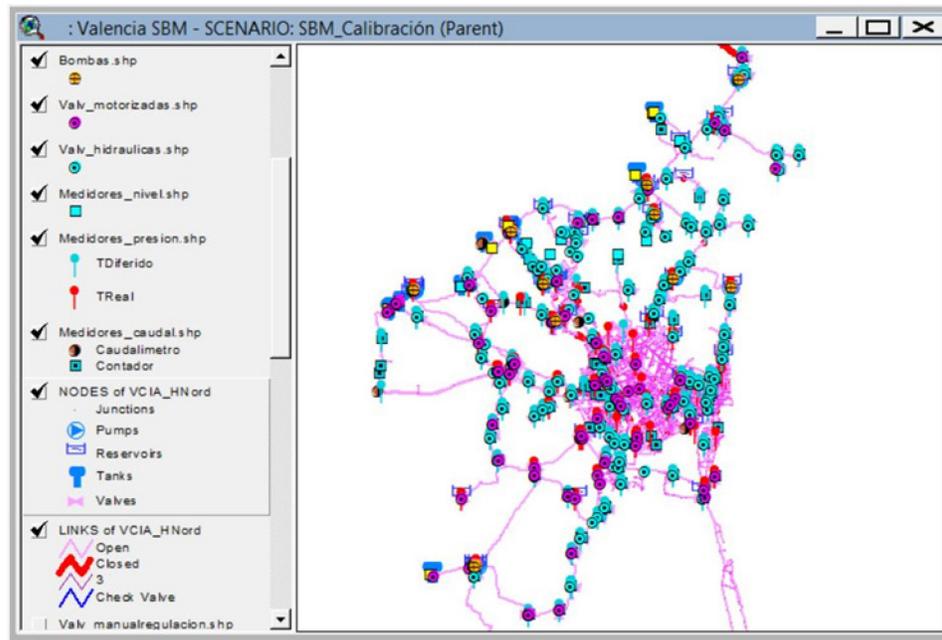


Figura 1 | Trazado de la red de suministro a Valencia y su área metropolitana sobre GISRed, y distribución de los elementos de regulación.

A continuación se analizaron las medidas disponibles en válvulas y bombas. Todas las válvulas automáticas disponían de medidas de caudal y de presión aguas arriba y aguas abajo, y se modelaron como PRV. De las válvulas motorizadas, 49 disponían de las 3 medidas, 36 solo las presiones en ambos extremos y 6 el caudal y una sola presión; teniendo en cuenta la información disponibles se modelaron 38 válvulas como PRV, 17 como FCV y 37 como TCV. Las variables no forzadas quedaron como variables de ajuste. Por su parte, las 47 bombas se agruparon en 14 estaciones de bombeo, y se asumió que por cada EB una bomba era BVV dado que se conocía la altura de bombeo y el caudal total en todas ellas. La imposición de todas las magnitudes forzadas en los elementos de regulación, supuso la creación de 5200 leyes de control horarias por cada día de simulación. Los 15.000 datos diarios restantes se consideraron variables de ajuste.

Como día de calibración se eligió el 28 de enero 2016. Con las demandas ajustadas, y emulados los elementos de regulación, se procedió a ajustar las cotas proporcionadas por la empresa de los 384 puntos de medida de presión. Como resultado, hubo que corregir 127 puntos hasta en 0,5 m, 92 hasta en 1 m y 46 hasta en 2 m. El resto mantuvo su valor.

El paso siguiente fue declarar los cortes de calibración para aislar los 17 sectores de inyección identificados. En total se declararon 41 cortes, de los cuales 8 fueron del tipo DEM-INJ, 14 del tipo RES-INY y 19 del tipo DEM-RES de acuerdo con las variables impuestas y las variables reservada para ajustar las rugosidades. La imposición de los valores forzados supuso añadir 72 curvas de modulación adicionales a las propias de las demandas. En la figura 2 se muestra uno de los sectores de inyección y los cortes de calibración declarados.

A continuación se identificaron los trayectos de calibración de cada uno de los 17 sectores y se ajustaron las rugosidades necesarias por subtrayectos, tratando de modificar el mínimo las rugosidades asignadas inicialmente a las tuberías, por materiales y edad. El proceso de calibración fue avanzando desde los sectores más alejados hasta los más próximos a las fuentes de suministro. Cada vez que se calibraba un sector se abrían los cortes que comunicaban éste con los sectores y calibrados, y se validaban los cambios realizados. Tras el proceso de calibración, el 23 % de las rugosidades quedaron por debajo de 0,1 mm, el 16 % entre 0,1 y 0,5 mm, el 15 % entre 0,5 y 1 mm, el 25 % entre 1 y 5 mm, y el resto por encima de los 5 mm.

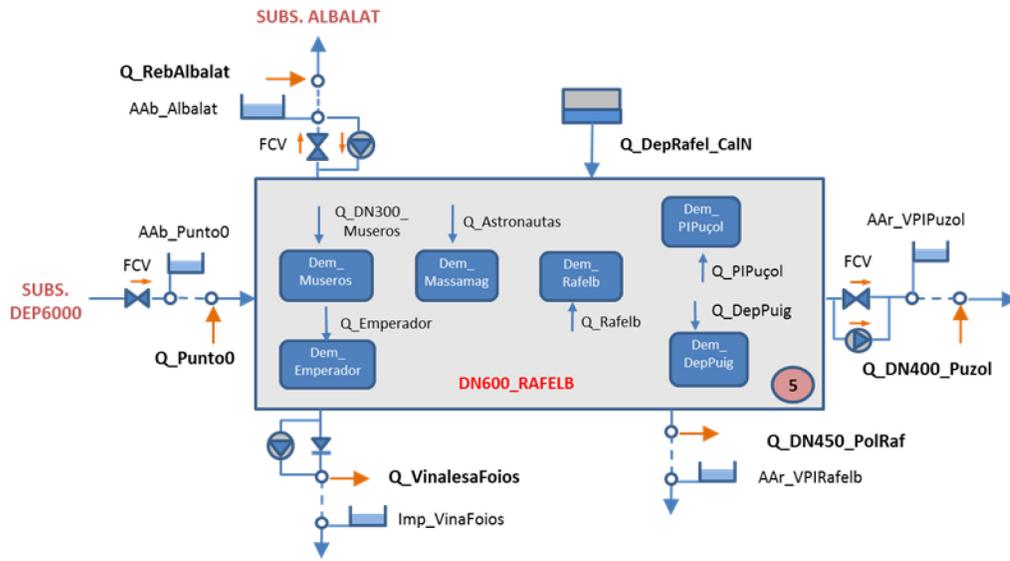


Figura 2 | Uno de los sectores de inyección y los cortes de calibración declarados para calibrar las rugosidades de las tuberías por trayectos.

A pesar del elevado número de medidas, el modelo actual ha sido calibrado para un día piloto de 24 horas, siguiendo la metodología propuesta, con un error medio del 1,2 % (0,49 m) para los 359 puntos de medida de presión, del 2,7 % (0,1 m) para los 25 puntos de medida de nivel, y del 6,5 % (10,5 l/s) para los 184 puntos de medida de caudal, habiendo reproducido con exactitud las variaciones de nivel en todos los depósitos, y los estados de todas las bombas y válvulas.

En la figura 3 se muestran los gráficos comparativos de algunos niveles, caudales y presiones relevantes.

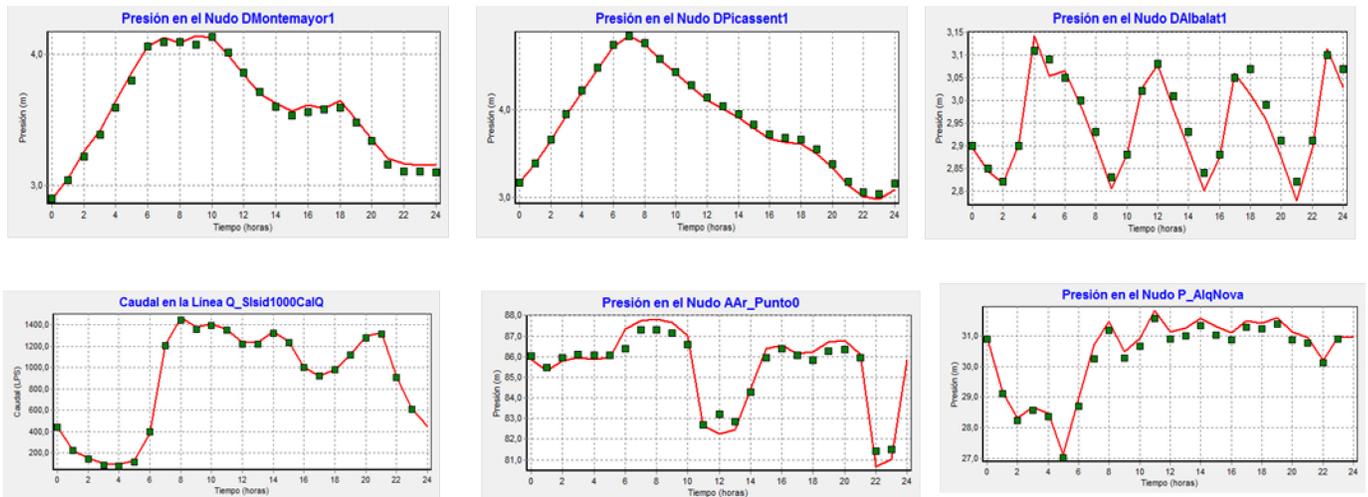


Figura 3 | Gráficos comparativos entre los resultados del modelo y las medidas de campo (recuadros) para algunas variables más relevantes.

Como resultado de este esfuerzo, la empresa que gestiona la red dispone actualmente de un modelo hidráulico del sistema completo, siempre ajustado y dispuesto para su uso en tiempo real. Dicho modelo es utilizado por los operadores de la red para simular escenarios en tiempo presente, pasado o futuro, como parte del Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones (DSS). (Martínez et al, 2013)

El modelo, una vez calibrado, se está utilizando con diversos fines, como analizar el comportamiento de la red bajo diversos escenarios, obtener una serie de indicadores basados en los balances continuos de agua y energía, como herramienta de

apoyo a la toma de decisiones en la operación diaria del abastecimiento, en el análisis de escenarios de emergencia para la gestión temprana de alertas, o en la planificación del crecimiento de la red (Conejos et al, 2017).

DISCUSIÓN

El procedimiento de calibración propuesto ha demostrado ser efectivo en un caso real muy complejo. Lo que parecía en principio una utopía, aplicando principios básicos de hidráulica y criterios racionales basados en la máxima ‘divide y vencerás’ han permitido abordar con éxito la calibración de un sistema altamente variable, sometido a un sistema de regulación dependiente en unos casos del juicio de los operadores del Centro de Control, y en otros casos de la programación de un conjunto de PLCs, todo ello coexistiendo en único sistema hidráulico conectado.

Con el fin de aprovechar los pasos seguidos para la calibración del día de referencia elegido a otros días distintos, se han definido una serie de ficheros de configuración donde se declaran entre otros los variables de campo involucradas, las diferentes sectores de inyección y demanda identificados, las reglas seguidas para la emulación de bombas y válvulas, los cortes de calibración y su tipología, así como los trayectos de calibración para cotas y rugosidades.

La propuesta que se persigue para el futuro es mantener el modelo vivo y fiable en todo momento. Al finalizar cada día, una vez se disponga de todos los datos de campo (medidos o estimados), el modelo actual debe reproducir con fidelidad el comportamiento de la red en el día anterior. Un informe de calibración será enviado cada día al personal de Operación de Red, bien de forma resumida si todo ha ido bien, o más detallado si se detectan discrepancias. Los operadores decidirán finalmente si hay que recalibrar el modelo, proceso que tardará solo unos pocos minutos, y vistos los resultados, determinarán si el nuevo modelo debe sustituir o no al actual. En tal caso, el modelo anterior permanecerá en los archivos para reproducir las simulaciones mientras funcionó correctamente, y el nuevo sustituirá al anterior a partir de la fecha establecida. Solo así el modelo hidráulico actual (o los modelos anteriores validados entre ciertas fechas) podrán ser utilizados para la toma de decisiones en el futuro con todas las garantías.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha abordado el problema de calibrar una red hidráulica compleja y real, configurada por numerosos elementos de regulación, pero en la que también se dispone de un elevado número de puntos de medida, la mayoría de ellos centrados en torno a dichos elementos. La red combina una parte de suministro en alta (área metropolitana) con otra de suministro en baja afectada por la sectorización (zona urbana), ambas conectadas sin depósitos intermedios. Frente a las clásicas formulaciones del problema de calibración, en que primero se identifican las variables a calibrar y a continuación se intentan ajustar sus valores mediante un proceso global de optimización con ciertas restricciones para minimizar los errores entre valores medidos y calculados, siguiendo para ello la mayoría de las veces procedimientos heurísticos, un análisis a fondo del comportamiento hidráulico del sistema nos ha conducido a formular una propuesta alternativa, original y novedosa, que ha permitido calibrar con éxito el modelo, siguiendo una serie de pasos secuenciales, en los que se tienen en cuenta sucesivamente el balance de caudales, la caracterización de los elementos de regulación, la corrección de posibles errores en la determinación de las cotas, y finalmente el ajuste de las rugosidades de las tuberías en caso necesario, siguiendo los flujos principales del agua.

Para aplicar todo este proceso con éxito, ha habido que resolver antes numerosos problemas de captura, tratamiento y filtrado de los datos procedentes del SCADA, identificar correctamente todas las variables en juego y configurar adecuadamente los sectores de demanda y los trayectos de calibración.

Finalmente, el procedimiento de calibración seguido se ha sistematizado a través de un software provisto de un conjunto de ficheros de configuración, en los que se definen los procedimientos a seguir en los procesos de carga del modelo y de identificación de sus parámetros. Dicho software constituye el módulo de conexión entre el modelo hidráulico y los datos de campo, el cual forma parte de la aplicación SCARed, desarrollada por el IIAMA de la UPV en colaboración con Global

Omnium Gracias a los ficheros de configuración, dicho módulo actualmente es adaptable a cualquier sistema de distribución por complejo que éste sea. Así, la personalización puede realizarse sin tener que recompilar el código, el cual está listo para integrarse, a través de una serie de servicios API-REST, en cualquier otro entorno de trabajo o interfaz gráfica orientada a la explotación del modelo en tiempo real por parte de los usuarios.

No obstante, la personalización del módulo de conexión a cada caso particular exige una labor de ingeniería importante, pues no existen dos redes de abastecimiento iguales, al menos en grandes poblaciones, ni tampoco de transporte de agua en alta. Éstas se conciben para cada situación en función de la disponibilidad de los recursos, la orografía del terreno, la distribución de la población, etc. En cada caso hay que identificar primero las variables de campo que entran en juego (o sugerir nuevos puntos de medida) y verificar los procesos de filtrado y tratamiento de los datos, y a continuación declarar los sectores de demanda y de calibración apropiados, determinar el tratamiento más adecuado para los elementos de regulación, lidiar con la calidad y continuidad de los datos, etc. Dicha labor difícilmente puede realizarse desde la Universidad, ni probablemente forme parte de sus objetivos. Afortunadamente se cuenta para ello con la experiencia de Global Omnium, empresa que ha colaborado intensamente en el desarrollo del modelo presentado, y que cuenta con la experiencia necesaria para implantarlo en cualquier abastecimiento, gracias a un convenio de transferencia tecnológica suscrito en exclusiva entre dicha empresa y la UPV.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es fruto de la estrecha colaboración entre la UPV y las empresas EMIMET y EMIVASA, ambas del grupo Global Omnium, a lo largo de muchos años de cooperación continuada. La verificación exhaustiva de todo el volumen de datos tratado ha llevado numerosas horas de trabajo, tanto por parte de los autores de esta comunicación como de otro personal técnico de dichas empresas e investigadores del grupo REDHISP (Redes Hidráulicas y Sistemas a Presión) del IIAMA, a los que los autores están profundamente agradecidos por su colaboración.

REFERENCIAS

- Bou, V., Martínez, F., Conejos, P. 2006. SCA-Red, a general purpose SCADA application for taking decisions in real time with the aid of a hydraulic model. *8th Int. Conf. WDSA*, Aug. 2006, Cincinnati, EEUU
- Christofides, N. 1975. *Graph Theory: An Algorithmic Approach*. Academic Press. London. ISBN 0121743500
- Conejos, P., Martínez Alzamora, F., Gamón, A., Urbán, P., Alonso, J.C 2017. La simulación hidráulica como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en Global Omnium – Grupo Aguas de Valencia. *XXXIV Jorn. AEAS*, Mayo 2017, Tarragona
- Martínez, F.; Bartolín, H.; Sancho, H.; Ayza, M. 2004. GISRed v1.0: Una herramienta SIG de ayuda para la confección de modelos y Planes Directores de redes de distribución del agua. *Tecnología del agua*. Nº 250, pp 32 -41
- Martínez Alzamora, F. Fernández Bono, J. 2005. Consideraciones sobre las pérdidas de carga en tuberías. *V Curso sobre Diseño e Instalación de Tuberías para transporte de agua*, 21-25 novbre. Univ. Salamanca, Avila
- Martínez Alzamora, F., Bou, V., Conejos, P., Diaz, J. 2013. Conexión SCADA-modelo para la simulación en tiempo real del sistema de abastecimiento de agua a Valencia y su área metropolitana, *III Jornadas Ingeniería del Agua, JIA 2013*, 23-24 Octubre, Valencia
- Ostfeld, A. Salomons, E, et al 2012. Battle of the Water Calibration Networks. *J. Water Resour. Plann. Manag.*, 2012, 138(5) 523-532
- Rossman L.A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH 45268

Savic, D., Kapelan, Z., Jonkergouw, P. 2009. Quo vadis water distribution model calibration? *Urban Water Journal*. March 2009

Sedgewick, Robert; Wayne, Kevin (2011). *Algorithms* (4th ed.). Addison-Wesley Professional. ISBN 978-0-321-57351-3.

Sophocleous, S., Savic, D., Kapelan, Z., Shenb, Y., Sage, P. 2016. A graph-based analytical technique for the improvement of water network model calibration. *12th International Conference on Hydroinformatics, HIC 2016*, August 2016, Korea.