

Sistema de Ayuda a la Decisión para el diseño de planes de gestión de presiones y la estimación de fugas en redes de distribución de agua urbana

D.J.Vicente^a, R.Sánchez^b, L.Garrote^c y F.Salazar^a

^a(Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Madrid, 41, 9º Izq., Madrid, djvicente@cimne.upc.edu; fsalazar@cimne.upc.edu)

^b(Universidad Politécnica de Madrid. Dpto. de Ingeniería Agroforestal, Av/ Complutense, s/n, 28040 Madrid, España, raul.sanchez@upm.es).

^c(Universidad Politécnica de Madrid. Dpto. de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente, C/Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España, l.garrote@upm.es).

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

RESUMEN

En el presente estudio se describe una herramienta para asistir en la toma de decisiones en maniobras de regulación de presión mediante Válvulas Reductoras de Presión (VRPs) en redes de abastecimiento de agua. La herramienta se focalizado en dos etapas. (a) Diseño: antes la existencia de cada vez más técnicas de regulación se ha detectado una falta de estandarización, tanto en la selección de la más adecuada como en el diseño de sus consignas de regulación óptimas. (b) Explotación: para evaluar los beneficios de la gestión de presiones – disminución de fugas y consumos (para escenarios de escasez de agua), mejora de servicio a usuarios, etc. – existe una gran variedad de métodos de análisis. La herramienta también asiste en la selección de la metodología más adecuada en cada caso, en función de las características de la zona de estudio. El potencial de la herramienta se plasma con algunos ejemplos prácticos.

Palabras clave | red de distribución de agua; sistema de ayuda a la decisión; modelación numérica; EPANET; gestión de presiones; Válvulas Reductoras de Presión; Caudal Mínimo Nocturno; fugas.

INTRODUCCIÓN

La gestión de presiones en sistemas de distribución de agua se ha convertido en una de las actividades más habituales llevadas a cabo por los operadores de este tipo de infraestructuras. Esto se debe a los múltiples beneficios que proporciona, entre los que destacan la *reducción de pérdidas en fugas*, el *ahorro de agua* (relevante en periodos de escasez de agua) y la *mejora del servicio a usuarios*. La utilización de elementos disipadores de energía como las Válvulas Reductores de Presión (VRPs) para ejercer esta labor de regulación, es una de las estrategias más extendidas en redes con exceso de presión. Aunque estos dispositivos vienen utilizándose desde hace más de un siglo (Mateo 2006), en los últimos años han cobrado especial relevancia debido a las nuevas técnicas de control que han emergido asociadas a este tipo de válvulas.

De forma global, los controladores se pueden clasificar en dos tipos: hidro-mecánicos (pilotos automáticos que se valen de la propia presión de la red para ejercer la acción reguladora) o electrónicos, cuyo control es inducido por dispositivos tipo CLPs (Controladores Lógicos Programables) (Vicente et al. 2015). La gran ventaja que supone este amplio abanico de técnicas, presenta a su vez el inconveniente de requerir un mayor conocimiento a la hora de seleccionar para cada caso la técnica de control más adecuada y definir el valor o la curva de consigna óptima.

Por otro lado, para valorar el impacto que tiene la regulación de presiones, existe un gran número de métodos, especialmente en lo concerniente a la disminución de fugas. Un enfoque, es a través de modelos numéricos de análisis hidráulico. Otro enfoque, ampliamente utilizado en la práctica profesional, es la utilización de expresiones simplificadas que permiten al operador de la red tener una estimación rápida del caudal de agua perdido. En esta línea, destacan los métodos basados en el concepto de Caudal Mínimo Nocturno (CMN) (UKWI 1994), habiéndose detectado un gran número de sub-variantes y criterios asociados al mismo. Esta heterogeneidad ha llevado a una falta de estandarización en la formulación que, en ocasiones, introduce un nivel de incertidumbre elevado en la estimación de los resultados.

Para ayudar en la toma de decisiones, tanto en las fases de diseño como en la de explotación (evaluación del impacto de este tipo de maniobras) se ha desarrollado esta herramienta con un doble objetivo: (1) asistir en la selección de la técnica de control más adecuada y definir la consigna de regulación óptima y (2) mejorar la precisión en el cálculo del impacto de estas maniobras. La aplicación se ha desarrollado íntegramente en Matlab, con un carácter adaptativa y multi-criterio en función de los datos disponibles y de las características de cada caso de estudio, integrando opciones tanto para el análisis de modelos numéricos como de casos de los que se disponga de series de datos monitorizados.

MATERIAL Y MÉTODOS

En esta sección se describe de forma somera el proceso llevado a cabo para la elaboración de la herramienta de ayuda a la toma de decisiones.

Como primer paso se han elaborado una serie de propuestas metodológicas conceptuales, implementadas en forma de algoritmo. Estas propuestas están enfocadas a mejorar el estado actual de los dos principales objetivos propuestos en el estudio: (I) metodología para optimizar el diseño de consignas de regulación de presión atendiendo a diferentes criterios (función objetivo y restricciones), y (II) metodología para reducir la incertidumbre en el cálculo del impacto de las maniobras de regulación.

El segundo paso ha sido el desarrollo de un entorno de simulación de análisis de redes hidráulicas, basado en una formulación que considera la relación entre consumos y presión – modelos de tipo ‘*pressure-driven*’ en inglés.

Por último se ha generado la aplicación que integra todos los aspectos anteriores y es capaz de asistir a las empresas operadoras de agua en las fases de diseño y de explotación de este tipo de procesos. La aplicación se complementa con una serie de funcionalidades de pre y post-proceso, conformando una herramienta integral que sirva como herramienta de ayuda a la toma de decisiones. Estos pasos se recogen esquemáticamente en la Figura 1.

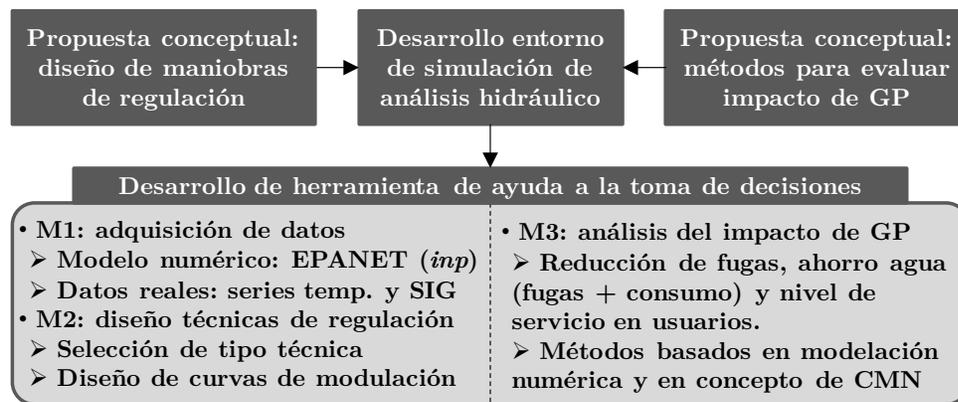


Figura 1 | Esquema general llevado a cabo para la construcción de la herramienta de ayuda a la toma de decisiones.

Propuesta conceptual (I): diseño de consignas de regulación

En la actualidad existen múltiples técnicas de regulación de presión mediante VRPs, más o menos sofisticadas. Los cuatro tipos tratados en este estudio son algunos de los más relevantes y extendidos globalmente (Vicente et al. 2015): Salida Fija (SF), Programación Temporal (PT), Modulación en función del Caudal (MC) y Modulación basada en Presión en punto remoto (MP).

Los valores de consigna, generalmente, se definen de forma ‘ad-hoc’ para cada proyecto según lecturas tomadas ‘in-situ’ o en base a la experiencia del encargado del diseño del plan (Kovac 2007). Otro enfoque es el cálculo de los valores óptimos mediante problemas de optimización. Los problemas de optimización suelen aplicarse sobre modelos numéricos, para los que se define tanto la función objetivo del problema como sus restricciones matemáticas. En el caso de problemas asociados a técnicas

de regulación de tipo SF se establece un valor único de consigna mientras que en el resto se define una curva que relacione presión de tarado con una variable independiente de la que depende: tiempo para PT, caudal para MC y presión en punto remoto para MP. La restricción más habitual introducida en estos casos, a parte de las inherentes al cumplimiento de balance energético y de caudales en la red, es establecer que todos la presión en todos los nodos sea superior a un valor preestablecido de referencia (Araujo 2006; Nicolini et al. 2010; Kanakoudis et al., 2014).

Proyectos con técnicas de regulación avanzadas como la PT o MC, que requieren curvas continuas como consigna, pueden introducir nuevas expresiones en su formulación (AbdelMeguid y Ulanicki 2010). No obstante, la restricción anterior suele mantenerse en todos ellos. Esto hace que en ocasiones, el problema de optimización sea demasiado “rígido” y su aplicación en la práctica real no sea idónea desde varios puntos de vista: beneficio económico a la empresa operadora, perspectiva medioambiental, etc. Este hecho se agrava considerando las particularidades de la zona de regulación.

Con esta finalidad se propone un algoritmo multi-criterio para diseñar valores/curvas de consigna. Se proponen diferentes criterios y expresiones como funciones objetivo y restricciones del problema para añadir flexibilidad en esta tarea, acorde a las necesidades de cada proyecto. La Figura 2, recoge esquemáticamente los pasos principales del algoritmo desarrollado:

- Primero se establece el problema de optimización a través de la definición de la función objetivo y las restricciones del problema.
- En segundo lugar se calcula la curva óptima para el rango de caudales aplicable sobre cada caso de estudio. El método planteado para obtener esta curva se ha fundamentado en el método de optimización basado en simulación de escenarios hidráulicos de forma determinista (rango de valores factible con parámetros medios).
- Tercero y último, se ajustan los parámetros asociados a cada tipo de consigna a la curva óptima deducida anteriormente. En este paso se deben tener en consideración restricciones y las limitaciones propias de cada técnica de regulación.

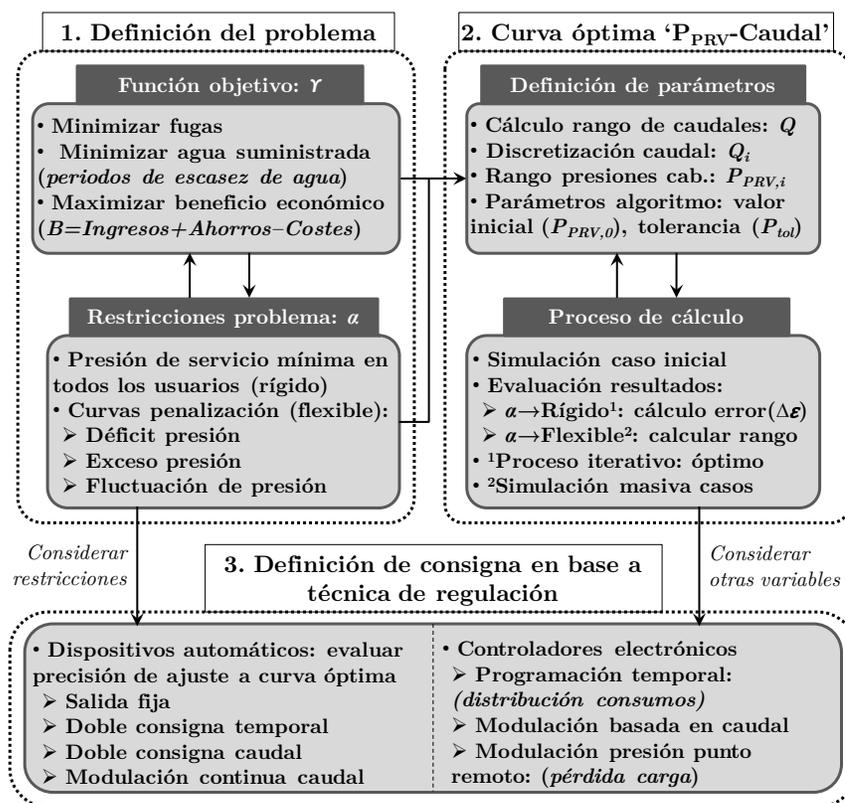


Figura 2 | Esquema para el diseño de consignas de regulación avanzadas de presión.

Propuesta conceptual (II): evaluación del impacto de las maniobras de gestión de presiones

Las finalidades que se han introducido en la herramienta como posibles objetivos perseguidos con la regulación de presión son tres: (a) disminución de caudal fugado, (b) ahorro de agua inyectada (suma de reducción de fugas y reducción de consumos) y (c) mejora del servicio a usuarios. Cada uno de estos se han programado a partir de una serie de indicadores de gestión para el caso de análisis de modelos numéricos.

En el caso de trabajar con datos reales se debe disponer de series temporales de datos en una serie discreta de puntos, siendo generalmente los siguientes: cabecera de sector, punto crítico y punto representativo de presión media. Para evaluar la reducción de fugas con a partir de datos de esta naturaleza se presenta una metodología basada en el concepto de ‘Caudal Mínimo Nocturno’. Este método se basa en un enfoque “de abajo hacia arriba” (*bottom-up* en inglés) según la Ecuación (1).

$$F(t) = F(CMN) \frac{P_{med}(t)^{NI}}{P_{med}(CMN)^{NI}} \tag{1}$$

Donde $F(t)$ y $F(CMN)$ son las fugas durante un instante genérico t y el periodo de CMN respectivamente, $P_{med}(t)$ y $P_{med}(CMN)$ son la presión media durante un instante genérico t y el periodo de CMN respectivamente y NI es el exponente que relaciona presión con caudal fugado.

A partir de esta expresión simplificada se han detectado múltiples criterios y sub-métodos. Mediante la herramienta desarrollada se pretende ofrecer un entorno multi-criterio y adaptativo que asista en los pasos a acometer, en función del tipo de datos disponibles y las características del sector analizado. La Figura 3 recoge de forma esquemática el diagrama de flujo global de este método.

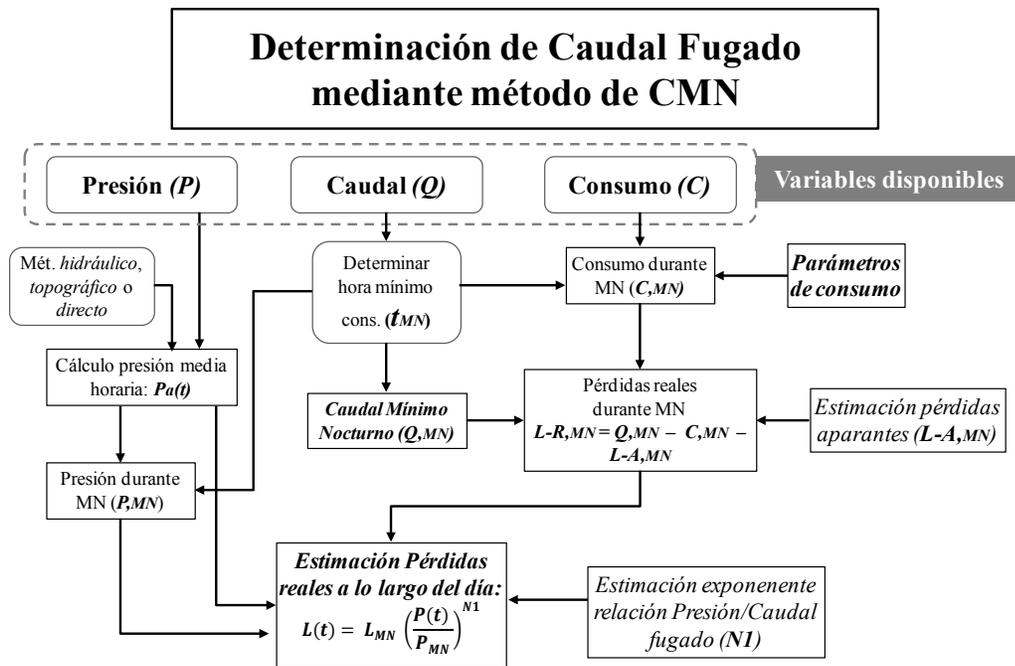


Figura 3 | Metodología global para evaluar la disminución de fugas mediante el concepto de CMN.

Cada paso que se ejecuta puede inducir un nivel de incertidumbre significativo en el cálculo final. Los puntos más relevantes en este sentido son los siguientes: (i) cálculo de caudal de referencia de CMN antes y después del inicio de maniobras – $Q_a(CMN)$ y $Q_d(CMN)$ respectivamente –, (ii) cálculo de pérdidas reales durante el periodo nocturno $F(CMN)$ a partir de la descomposición de Q en sub-componentes (consumo, pérdidas reales y pérdidas aparentes), (iii) cálculo de la presión media P_{med} durante periodo nocturno y durante el resto del día y (iv) extrapolación de las fugas al resto de horas a través del exponente

NI. De cada uno de estos apartados, se han propuesto diversos sub-métodos cuya idoneidad y aplicabilidad dependerá de los datos disponibles y de las características de la zona de estudio.

Entorno de simulación de análisis hidráulico

Para el análisis de modelos numéricos se ha utilizado una formulación de tipo dirigida a la presión ‘*pressure-driven*’ (Cheung et al. 2005; Giustolisi et al. 2008; Pathirana 2010; Liserra et al. 2014). Ésta, permite obtener resultados más realistas que la formulación clásica, ante escenarios de dependencia de la presión. La diferencia fundamental de esta formulación con respecto a los modelos clásicos de tipo ‘*demand-driven*’ es que en el sistema de ecuaciones resultantes, basado en las ecuaciones de conservación de energía y balance de masas, aparece una dependencia entre los términos de consumo en los nodos de altura piezométrica desconocida y la presión en dichos nodos.

Las expresiones para representar dos aspectos fundamentales (simulación de fugas y tipo de relación entre consumo y presión de la red) se incorporan directamente desde la aplicación según las expresiones siguientes:

- a) **Fugas de fondo** – Se han representado de acuerdo a la formulación propuesta por Germanopoulos (1985), Ecuación (2).

$$F_k(P_{k,med}) \begin{cases} \beta_k L_k P_{k,med}^{\alpha_k} & \text{si } P_{k,med} > 0 \\ 0 & \text{si } P_{k,med} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Donde el subíndice k representa cada conducción del modelo, $P_{k,med}$ la presión media en la tubería, L_k su longitud, y β_k y α_k los parámetros de las fugas. Esta expresión ha sido incorporada con éxito en este tipo de modelos (Giustolisi et al. 2014; Berardi et al. 2015; Laucelli y Meniconi 2015), presentando resultados más realistas por el término de caudal nulo ante escenarios de presión negativa.

- b) **Relación entre consumo y presión de la red** – Otro de los grandes aportes de esta formulación es poder representar de forma más realista escenarios en los que el consumo depende de la presión: tipos de usos dependientes total o parcialmente de la presión y escenarios hidráulicos con déficit de presión, entre otros. En este sentido se ha incorporado la posibilidad de representar los consumos en función del tipo de uso y su relación con la presión de la red, distinguiendo entre tres opciones: usos independientes de la presión (o basados en volumen), usos totalmente dependientes y usos parcialmente dependientes (o basados en parte en decisión del usuario). Las expresiones utilizadas para simular el consumo en cada nodo (c_i) se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1 | Expresiones para determinar el consumo c_i en función del tipo de uso en cada nodo i y su relación con la presión P_i

Tipo de uso	Independientes (3)	Totalmente dependientes (4)	Parcialmente dependientes (5)
Consumo: $c_i(P_i)$	$\begin{cases} d_i \rightarrow P_i > P_{min} \\ 0 \rightarrow \text{si } P_i < P_{min} \end{cases}$	$\begin{cases} C_i \sqrt{P_i} \rightarrow P_i > P_{min} \\ 0 \rightarrow \text{si } P_i < P_{min} \end{cases}$	$\begin{cases} d_i \rightarrow P_i > P_{serv} \\ C_i \sqrt{P_i} \rightarrow P_{min} < P_i < P_{serv} \\ 0 \rightarrow \text{si } P_i < P_{min} \end{cases}$
Coef. veloc. (C_i)	–	1	$\frac{d_i}{\sqrt{P_{serv}}}$

Donde c_i es el consumo real en cada nodo i , d_i es la demanda inicial, P_i es la presión resultante del análisis hidráulico, P_{min} la presión mínima necesaria para que haya consumo (asignándose a este un valor igual a 0 m.c.a.), P_{serv} un valor de presión de servicio a partir del cual se diferencia el comportamiento del consumo (para tipos de uso parcialmente dependiente) y C_i el coeficiente de velocidad.

- El primer caso, usos independientes de la presión, se ha formulado de forma que si la presión es mayor a una presión mínima de servicio, el consumo es igual a la demanda de usuarios según la Ecuación (3). Este es el caso de tipos de usos domésticos como lavadoras, lavavajillas, cisternas, etc., también llamados usos ‘basados en el volumen’.

- El segundo caso, usos totalmente dependientes de la presión, se formula como un caudal de agua fluyente de forma incontrolada por orificio libre (fórmula de Torricelli) con un coeficiente de velocidad (C_v) correspondiente al tipo de dispositivo por el que se libera el flujo según la Ecuación (4).
- El tercer y último caso, usos parcialmente dependientes – o basados en decisión humana – están asociados a usos en los que el consumo se divide en dos escalones: una en la que interviene la decisión del usuario (para presiones en un rango más bajo) y otro en la que el consumo es igual al total de la demanda (para rangos de presiones más elevados). Esta relación de difícil generalización, se formula en este estudio según la propuesta realizada en Giustolisi et al. (2012). La expresión resultante viene recogida en la Ecuación (5).

Estructura y módulos principales de la herramienta

Finalmente, y con la formulación expresada en los apartados anteriores, se ha desarrollado una aplicación interactiva con el usuario en lenguaje de programación MATLAB. La motivación para seleccionar este lenguaje de programación ha sido su potencial para el desarrollo de interfaces de usuario que integren funcionalidades de análisis. Esta aplicación se ha estructurada de forma modular, existiendo tres Módulos principales (M1, M2 y M3):

- (M1) Adquisición de datos. El primer módulo de la herramienta se ha concebido para incorporar de forma automática los datos y parámetros que se utilizarán en el análisis. La naturaleza de los datos puede ser de dos tipos: modelos numéricos y datos reales provenientes de sistemas de auscultación.
- (M2) Diseño de técnicas de regulación. En el caso de modelos numéricos, la aplicación asiste en la evaluación de diferentes alternativas de regulación. Para ello, primero define una curva de consigna óptima (en función del objetivo deseado y las restricciones impuestas) y a continuación se evalúa la precisión alcanzada con cada técnica de control seleccionada por el usuario. En este paso, se tienen en cuenta características de la zona de regulación, como la orografía, el número de entradas y el patrón de consumo.
- (M3) Análisis del impacto. El tercer módulo consiste en una serie de métodos para evaluar el impacto de las maniobras de regulación atendiendo a tres objetivos: reducción de caudal fugado, ahorro de agua inyectada en la red (fruto de la reducción de fugas más la disminución de consumos) y mejora del nivel de servicio a usuarios.

CASO DE ESTUDIO

Se presenta un modelo numérico esquemático, proveniente de un modelo tipo *benchmark* extraído de la literatura especializada (Berardi y Giustolisi 2016). El esquema utilizado representa el modelo numérico de la red ‘C-Town’. Se trata un esquema representativo de un tramo de red muy adecuado para los propósitos de este estudio al representar un sub-tramo de red con estructura sectorizada y variación de patrón de demanda a lo largo del día.

Se ha dividido la red completa en sub-tramos o sectores asociados a cada uno de los patrones de consumo que tienen lugar. Es decir, en cada sector, todos los nodos interiores de consumo siguen un mismo tipo de patrón, si bien la demanda base puede ser diferente. Esta sub-división se puede contemplar en la Figura 4 (izquierda). Una vez descompuesto el modelo en los 5 sub-modelos (S1, S2, S3, S4 y S5), se han tomado el correspondiente al S1 – ver Figura 4 (derecha).

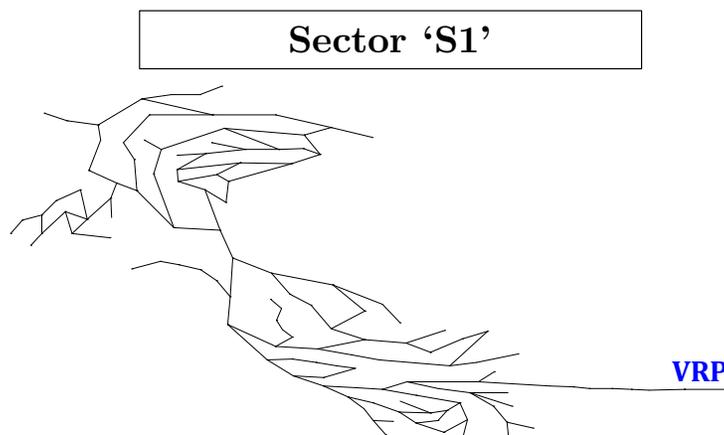
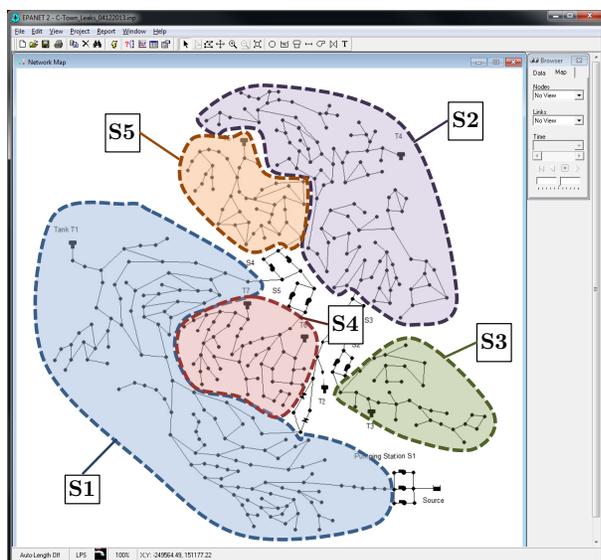


Figura 4 | Esquema de caso de estudio utilizado: sector 'S1' de modelo numérico *benchmark* (Berardi y Giustolisi 2016).

RESULTADOS – PRESENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Módulo 1 (M1): importación de datos

El primer módulo ha sido desarrollado con el objetivo de poder importar y configurar los datos de cada caso de estudio. La naturaleza de los casos se divide en dos grandes grupos:

- Series de datos reales – En el caso de disponer de datos provenientes de sistemas de auscultación (series temporales de presiones, caudales y consumos), se ha creado una serie de vínculos con fuentes externas de distinta naturaleza: hojas de cálculo, bases de datos, archivos de texto y capas tipo SIG (ver Figura 5).

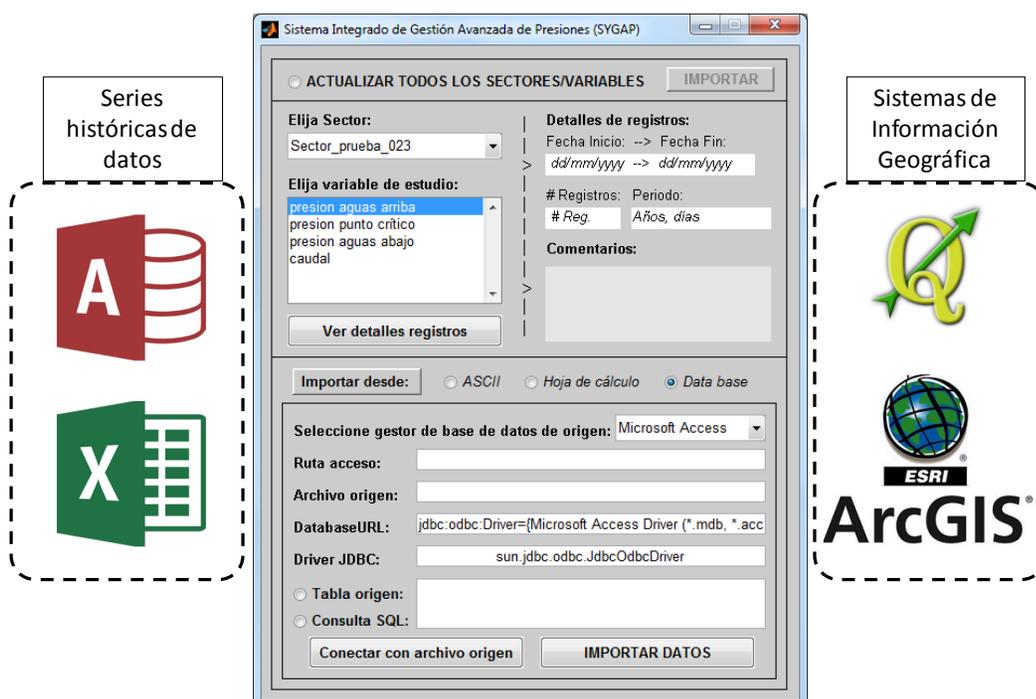


Figura 5 | Interfaz de conexión con fuentes de información externas para importar datos reales provenientes de sistemas de auscultación y sistemas de información geográficos.

b) Modelos numéricos – Se ha desarrollado un código para la interpretación automática de esquemas de red definidos a través de archivos con formato estandarizado de tipo ‘input file’ (.inp) propios del software EPANET (Rossman 2000). La interfaz para incorporar este tipo de modelos está en fase de desarrollo. En la Figura 6, se puede observar el proceso de conversión automática de la información de los archivos de entrada en los datos necesarios para formular el problema de análisis hidráulico.

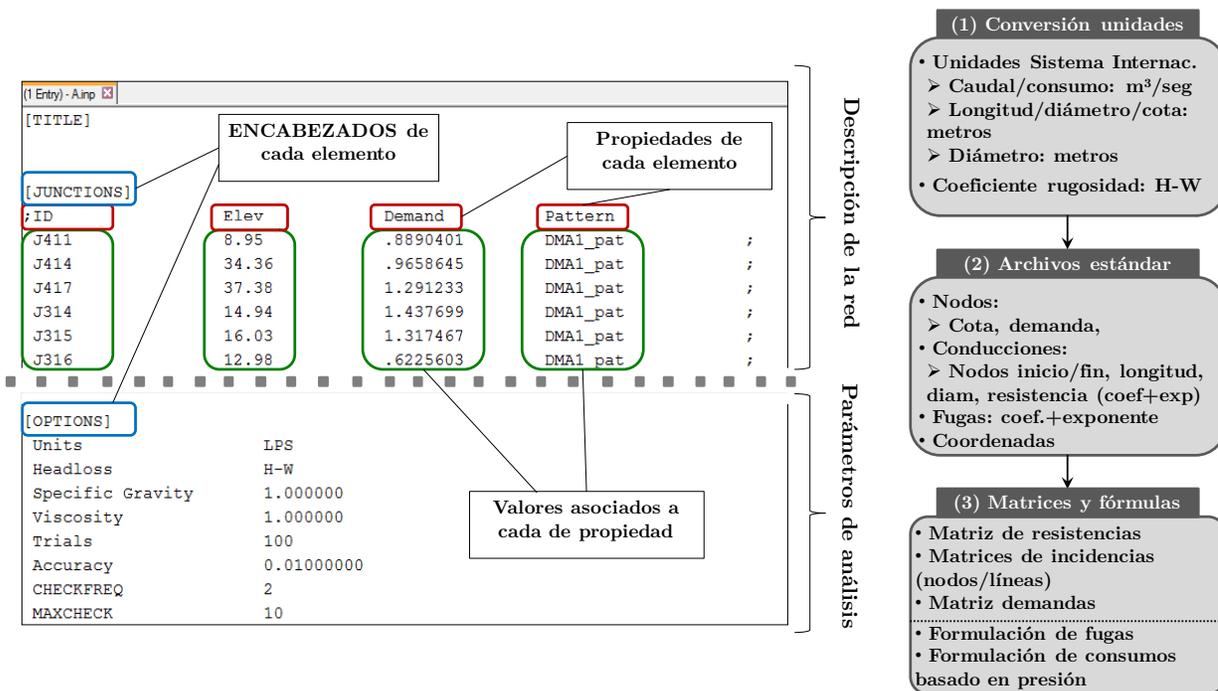


Figura 6 | Estructura de módulo de importación de modelos numéricos. Estructura de archivos tipo ‘.inp’. (Izquierda). Esquema de conversión de datos para su estandarización como variables internas del programa (Derecha).

El carácter dinámico de la aplicación comienza en esta fase, tras la interpretación de los datos introducidos. En función del tipo de datos disponibles, se podrán utilizar unos métodos u otros para el análisis hidráulico. Destaca en este sentido que el módulo M2 está específicamente diseñado para modelos numéricos, mientras que los dos restantes pueden ser utilizados con ambos tipos de datos, si bien los sub-métodos de cálculo serán diferentes. Se procede a continuación a explicar con un ejemplo la funcionalidad de cada apartado.

Módulo 2 (M2): Selección y diseño de curvas consignas de regulación

El segundo módulo consiste en la configuración y programación de las técnicas de regulación avanzada de presión que se desean analizar. Se han incluido dos enfoques para el diseño de estas consignas:

a) *Introducción de consignas para la evaluación de datos reales* – Se ha creado una interfaz para definir valores/curvas de consigna ‘ad-hoc’ y puedan utilizarse para compararse los valores ideales con planes de regulación ya implantados (ver Figura 5). Por lo tanto, esta funcionalidad está pensada para el análisis basado en datos reales. En el caso del modo de regulación de salida fija tan sólo se solicita un valor invariante a lo largo del tiempo. En los casos PT y MC, se deben introducir las respectivas curvas que relacionen presión de consigna con las variables ‘tiempo’ y ‘caudal’ respectivamente. La técnica MP, puede elegirse entre un valor único o una curva en función del tiempo. Para su diseño se ha creado una interfaz que facilite la generación de las curvas de modulación para los casos de regulación avanzada y vincule estas consignas con los puntos de regulación deseados en el caso de los modelos numéricos (Figura 7). Para un mismo caso, se pueden introducir diferentes consignas a lo largo del tiempo – ‘Número de eventos’ –introduciendo el tipo de consigna deseada y las fechas entre las que se desea representar la misma.

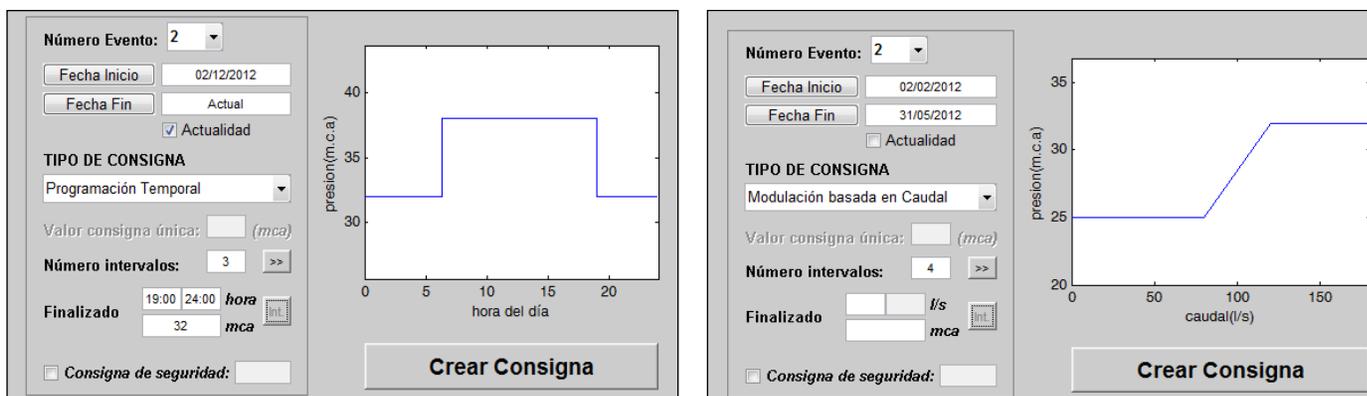


Figura 7 | Interfaz para el diseño de consignas de presión para técnicas de regulación avanzadas: programación temporal (izquierda) y modulación basada en caudal (derecha).

b) *Diseño óptimo de consignas* – En el caso de disponer de modelos numéricos sobre los que se desee estudiar diferentes alternativas de regulación, se pueden establecer diferentes criterios de optimización para diseñar la curva de consigna óptima. Sobre el caso de estudio presentado anteriormente (Figura 4) se ha ejecutado el módulo de diseño de curvas óptimas para diferentes tipos de regulación. La restricción aplicada en todas ellas ha sido que en todo momento, todos los nodos de la red reciban una presión mínima de servicio (P_{ser}).

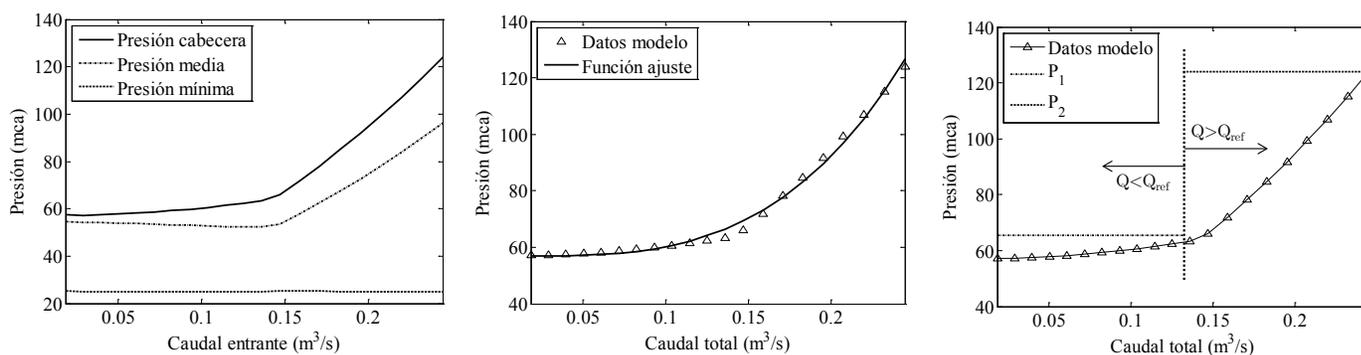


Figura 8 | Curva de consigna óptima para diferentes técnicas de regulación basadas en el caudal: modulación continua con controlador electrónico (izquierda), modulación continua basada en ecuación potencial asociada a dispositivos de control hidro-mecánicos (centro) y controlador hidro-mecánico con dos pilotos de salida fija (derecha).

Sobre el mismo caso de estudio se ha aplicado este módulo para el diseño de consignas de tipo control basado en punto remoto. La mayor parte de estudios fijan en uno el punto crítico. La presente herramienta determina los puntos críticos (ver Figura 9), en función del caudal, para basarse en la señal de cada uno de ellos para cada rango de caudales.

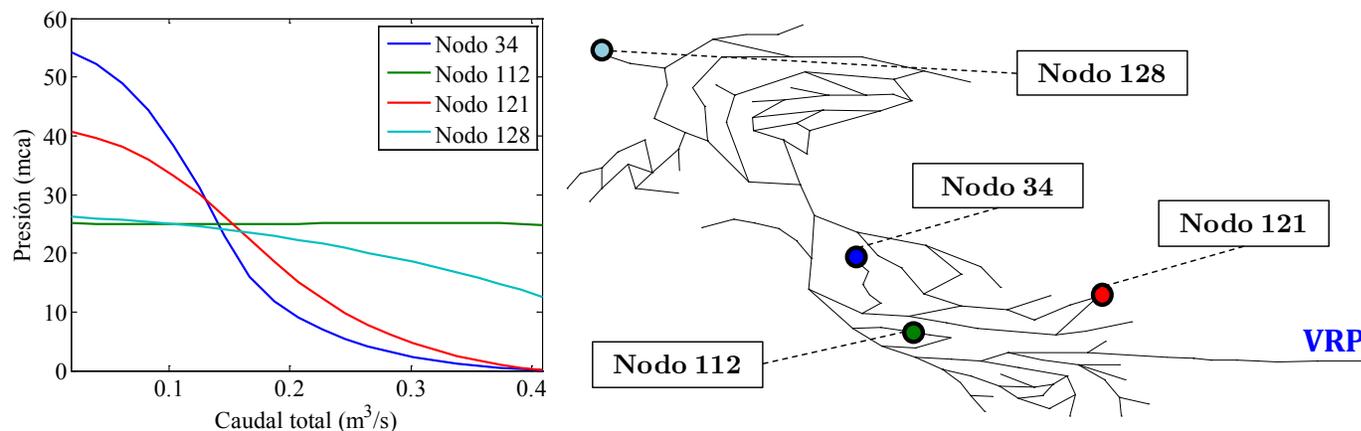


Figura 9 | Detección de puntos críticos en función del caudal para localización de puntos remotos como punto crítico.

Módulo 3 (M3): Análisis del impacto

Este módulo contempla un amplio abanico de opciones para evaluar los resultados obtenidos tras la implantación de planes de regulación de este tipo. De entre todos los criterios y métodos implementados, se muestran algunos ejemplos.

- a) *Análisis de la precisión de las maniobras de regulación* – Este apartado está pensada para las series de datos reales. Se evalúa la precisión de la maniobras de regulación y el error cometido o desviación entre la presión ideal consignada y la que realmente se está midiendo aguas abajo de la VRP. Los indicadores introducidos son: (1) *Error consigna* – representa la desviación entre la presión consignada y la presión real medida aguas abajo de la VRP, y (2) *Correlación (error/variable hidráulica)* (ver Figura 10 derecha) – Correlación entre el error y algunas de las variables hidráulicas independientes a la presión aguas abajo: caudal entrante, consumo total, presión aguas arriba, entre otras.

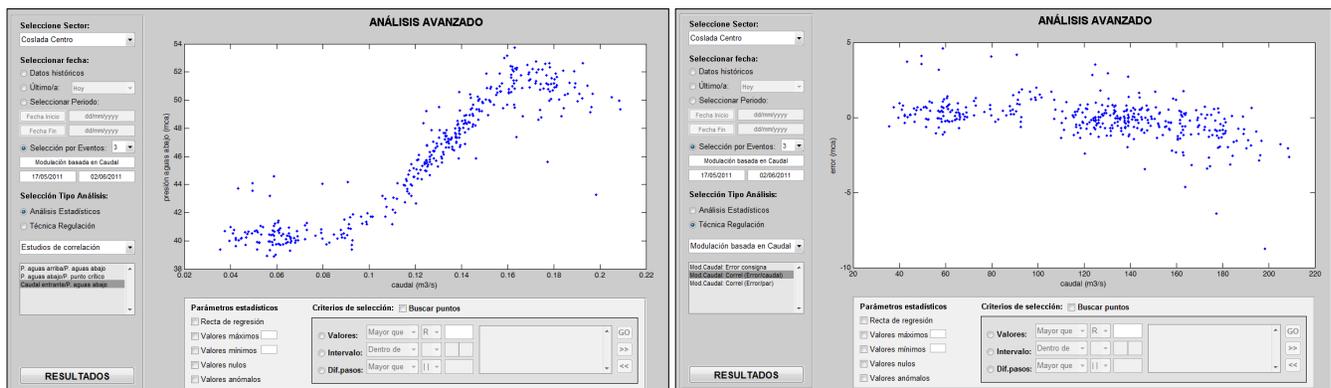


Figura 10 | Interfaz para analizar el error en la precisión de las maniobras de regulación.

Cálculo de presión media – La presión media es un parámetro utilizado tanto para determinar la afección de las maniobras de regulación en los usuarios como para estimar la reducción de fugas en la red. A través de la herramienta se han introducido una serie de procesos para calcular la presión media. Algunos ejemplos clásicos son el método hidráulico (disponible sólo con modelos numéricos) o el método topográfico (utilizando la suposición de que la pérdida de carga es despreciable y basándose por tanto en la presión estática de la red). Otros métodos se proponen originalmente a través de la herramienta como son los siguientes:

- *Método de pérdida de carga* – Método propuesto basado en mediciones reales recabadas en varios puntos diferentes al punto representativo i_{Pmed} . Este método surge como respuesta ante una necesidad detectada en la práctica profesional. A pesar de la conveniencia de monitorizar el punto de presión media para la estimación de fugas (EC 2015), aún son muchas las empresas que no han estandarizado en su práctica habitual la localización y monitorización de dicho punto. En cambio, es habitual encontrarse un control continuo en dos puntos clave: punto de entrada y punto crítico. A partir de las mediciones en ambos se deduce la pérdida de carga en función del caudal y se aplica esta pérdida sobre la presión en cabecera. Este método, mejora el método topográfico, el cual no considera la pérdida de carga. La Figura 11 representa el error cometido por cada uno de los dos métodos (topográfico y pérdida de carga), en función del caudal, en comparación con la presión media real deducida a partir de modelación numérica (aplicación sobre modelo de Figura 4). En esta gráfica se muestra cómo el método de pérdida de carga mejora notablemente el método topográfico, en mayor medida cuando mayor sea el caudal circulante.

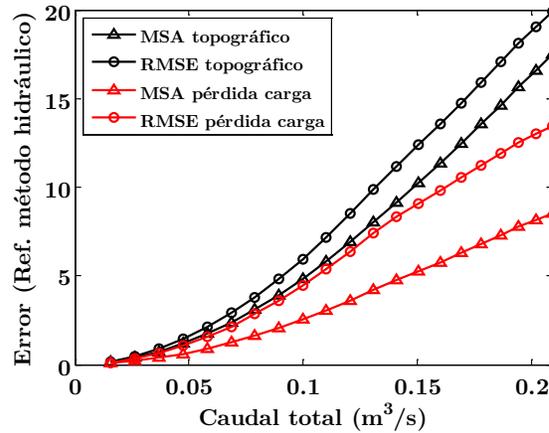


Figura 11 | Error entre métodos topográfico y de pérdida de carga en comparación con presión media real calculada a través de modelo numérica.

- *Método de medición directa a partir de varios puntos* – Cuando la pérdida de carga generada es significativa, los nodos más cercanos a la presión media pueden variar a lo largo del tiempo. En este caso, es relevante considerar varios nodos como referencias para tomar sus valores en función del caudal. La Figura 12 recoge una serie de mapas de isolíneas que recogen la diferencia entre la presión en cada nodo y la presión media, para poder definir el punto representativo para cada tramos de caudales Q_i .

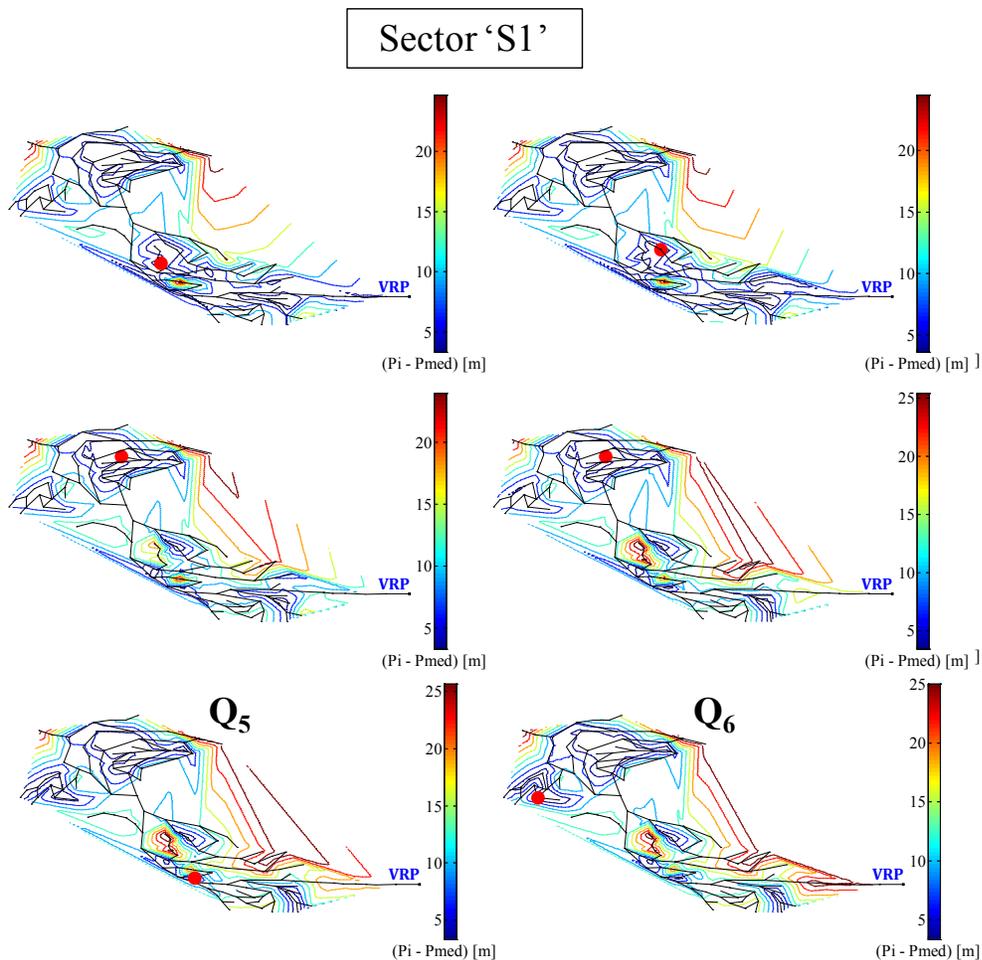


Figura 12 | Mapa de isolíneas de diferencia entre presión en cada nodo y presión media para una serie de valores de caudal Q_i .

- *Método basado en matriz de sensibilidad* – Se propone en este caso un método para identificar el campo de sensibilidad de cada nodo de la red ante la ocurrencia de variaciones de presión en el resto de nodos. Este método se basa en los estudios de sensibilidad de presión aplicados a otro contexto de las redes de distribución: la localización de fugas y su aislamiento a partir de la instalación de sensores de presión. Son múltiples los estudios que recurren a técnicas de “sensibilidad nodal a la presión” para el objetivo citado (Pérez et al. 2011; Casillas et al. 2013; Bort et al. 2014).

En esta propuesta se adapta este método para la búsqueda de la influencia de cada variación de consumo en un punto de un sector en la presión en el resto de nodos. Se crea así una matriz que denominaremos “matriz de Sensibilidad de regulación en cabecera, representada gráficamente mediante la Figura 13 (arriba izquierda). A continuación se genera una matriz binaria (Figura 13 arriba derecha) estableciendo un valor de referencia, para determinar si un nodo es sensible a otro ante la variación de presión en el segundo. Por último, y en conjunción con el método anterior, se calculan los puntos necesarios para minorar el error en el cálculo de la presión media (Figura 13 abajo).

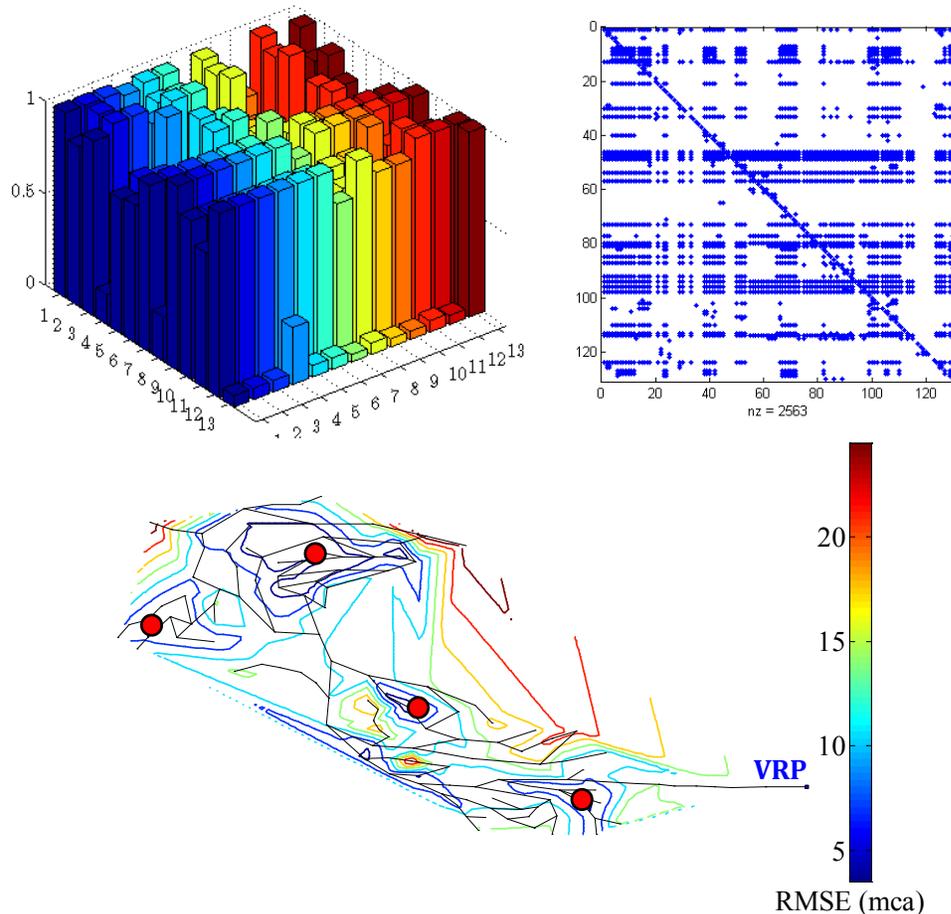


Figura 13 | Proceso para el cálculo de puntos representativos de presión media mediante método de matriz de sensibilidad.

CONCLUSIONES

Las maniobras de regulación de presión en redes de distribución de agua mediante VRPs es una operación cada vez más utilizada por los múltiples beneficios que ofrece. No obstante, el gran número de alternativas de control hace que exista una falta de métodos objetivos para implantar la técnica más adecuada. Por otro lado, la heterogeneidad de métodos para evaluar el impacto de estas maniobras hace que se pueda introducir un elevado grado de incertidumbre en el cálculo.

No se han detectado herramientas centradas en el análisis específico de este tipo de operaciones con el grado de detalle planteado en el presente estudio (contemplando las fases de diseño y explotación). El diseño de un sistema de ayuda a la

decisión, no sólo conlleva la definición de una serie de algoritmos de cálculo, sino también una estructuración adecuada de la fase de importación de datos y configuración de parámetros de estudio y también en el desarrollo de un interfaz que permita interactuar al usuario con la aplicación.

La formulación utilizada para la simulación de redes, de tipo ‘*pressure-driven*’ es más adecuada que la clásica al presentar resultados más realistas a la hora de simular procesos dependientes de la presión, como son las fugas o las componentes de consumo dependientes de la presión, incluyendo escenarios de presión escasa de forma generalizada.

El diseño de consignas de regulación en la actualidad, generalmente, se determina ‘ad-hoc’ para cada caso o mediante modelos de optimización acotados a la búsqueda de problema específico o a una técnica de control concreta. La introducción de mayor flexibilidad en este diseño permite a los encargados de definir estas operaciones mejorar los resultados obtenidos y adaptarlos a los objetivos deseados.

En relación a los métodos para evaluar el impacto de las maniobras de regulación se han detectado un gran número de criterios y sub-métodos que introducen una gran incertidumbre en el cálculo. En particular, el cálculo de la presión media es un paso clave para evaluar tanto la afección en usuario como el nivel de fugas. Los métodos existentes para su cálculo, en ocasiones pueden ser mejorados notablemente con una monitorización adecuada de la red de estudio. En este sentido, los métodos propuestos ayudarán a mejorar este cálculo reduciendo el error cometido y mejorando la eficiencia de las maniobras.

REFERENCIAS

- AbdelMeguid, H., y Ulanicki, B. (2010). “Pressure and leakage management in water distribution systems via flow modulation PRVs”. *Proc. of the 12th Water Distribution Systems Analysis Conf.*, ASCE, Tucson, Arizona, U.S., 1124-1139.
- Araujo, L. S., Ramos, H. y Coelho, S. T. (2006). “Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management”. *Water resources management*, 20(1), 133-149.
- Berardi, L., Laucelli, D., Ugarelli, R., y Giustolisi, O. (2015). Leakage management: planning remote real time controlled pressure reduction in Oppergård municipality. *Procedia Engineering*, 119, 72-81.
- Berardi, L., y Giustolisi, O. (2016). Special issue on the battle of background leakage assessment for water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(5), 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000667.
- Bort, C. G., Righetti, M., y Bertola, P. (2014). Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity and correlation analysis in water distribution systems. *Procedia Engineering*, 89, 1561-1568.
- Casillas, M. V., Garza-Castanon, L. E., y Puig, V. (2013, July). Extended-horizon analysis of pressure sensitivities for leak detection in water distribution networks: Application to the Barcelona network. In *Control Conference (ECC), 2013 European* (pp. 401-409). IEEE.
- Cheung, P. B., Van Zyl, J. E., y Reis, L. F. R. (2005). Extension of EPANET for pressure driven demand modeling in water distribution system. *Computing and Control for the Water Industry*, 1, 311-316.
- EC – European Commission (2015). EU Reference document Good Practices on Leakage Management WFD CIS WG PoM – Main Report. ©European Union, 2015. ISBN 978-92-79-45069-3, DOI: 10.2779/102151.
- Germanopoulos, G. (1985). A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Civil Engineering Systems*, 2(3), 171-179.
- Giustolisi, O., Savic, D., y Kapelan, Z. (2008). Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(5), 626-635.
- Giustolisi, O., y Walski, T. M. (2012). “Demand components in water distribution network analysis.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(4), 356-367.

- Giustolisi, O., Berardi, L., Laucelli, D., Savic, D., Walski, T., y Brunone, B. (2014). Battle of background leakage assessment for water networks (BBLAWN) at WDSA conference 2014. *Procedia Engineering*, 89, 4-12.
- Kanakoudis, V. y Gonelas, K. (2014). “Applying pressure management to reduce water losses in two Greek cities’ WDSs: Expectations, problems, results and revisions.” *16th Conference in Water Distribution System Analysis, WDSA 2014, Bary, Italy. 14-17 July*
- Kovac, J. (2007). “Case studies in applying the IWA WLTF approach in the West Balkan region: pressure management”. *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2007*, IWA, Bucharest, Romania, 199-215.
- Laucelli, D., y Meniconi, S. (2015). Water distribution network analysis accounting for different background leakage models. *Procedia Engineering*, 119, 680-689.
- Liserra, T., Maglionico, M., Ciriello, V., y Di Federico, V. (2014). Evaluation of reliability indicators for WDNs with demand-driven and pressure-driven models. *Water resources management*, 28(5), 1201-1217.
- Mateos, M. (2006). *Válvulas reductoras de presión: clasificación, descripción, errores y soluciones*. 2ª Edición, Ed. Bellisco, Madrid, España.
- Nicolini, M., Giacomello, C., y Deb, K. (2010). “Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 134-142.
- Pathirana, A. (2010). “EPANET2 desktop application for pressure-driven demand modeling”. *Proc. 12th Annual Int. Conf. on Water Distribution Systems Analysis*, ASCE, Tucson, Arizona, U.S.
- Pérez, R., Puig, V., Pascual, J., Quevedo, J., Landeros, E., y Peralta, A. (2011). Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks. *Control Engineering Practice*, 19(10), 1157-1167.
- Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 user’s manual, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- UKWI – United Kingdom Water Industry editor (1994). *Managing leakage – Report E: Interpreting measured night flows*. UK Water Industry, Engineering and Operations Committee. ISBN: 1 898920 10 9.
- Vicente, D. J., Garrote, L., Sánchez, R., y Santillán, D. (2015). Pressure Management in Water Distribution Systems: Current Status, Proposals, and Future Trends. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(2), 04015061.