

Hacia el diseño óptimo de un plan de Gestión de Presiones en redes de distribución de agua urbana

David J. Vicente¹, Elías H. Sánchez², Raúl Sánchez³, Ángela Martínez¹, Alejandro Pinilla², Luis Garrote¹

1) Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética (Universidad Politécnica de Madrid)

2) Canal de Isabel II

3) Departamento de Ingeniería Rural (Universidad Politécnica de Madrid)

davidjesus.vicente@upm.es

Resumen

Habitualmente para diseñar un plan de gestión de presiones en redes de distribución de agua urbana, se han venido utilizando herramientas de simulación que permiten al ingeniero seleccionar diseños alternativos, basándose fundamentalmente en su experiencia profesional. Este procedimiento se traduce en un análisis parcial del problema, al verse limitado el número de soluciones contempladas. Por otro lado, las técnicas de optimización de diseño de redes hidráulicas sólo pueden establecer una solución óptima tras considerar importantes simplificaciones, dada la complejidad de representar analíticamente el comportamiento hidráulico de cada uno de los elementos que conforman la red.

Este hecho ha desembocado en que no exista en la actualidad una metodología integral para poner en marcha un plan de control de presiones en grandes redes de abastecimiento, ya que las experiencias realizadas hasta ahora han sido parciales, bien porque afectan sólo a parte de los componentes del sistema o porque se han aplicado en redes pequeñas. En el presente trabajo, se han establecido las bases necesarias para optimizar el diseño e implantación de este tipo de planes. Para ello, primero se establece una clasificación de las técnicas de regulación existentes en la actualidad, desde la más antigua regulación de salida fija, hasta las más recientes controladas por un dispositivo electrónico externo. Asimismo se propone una serie de parámetros e índices de los factores más relevantes en el ejercicio de la reducción de presiones para poder llevar a cabo esta metodología propuesta.

Para realizar este estudio se ha comparado un importante número de casos de estudio en el ejercicio de la gestión de presiones, integrados en un marco tanto teórico como práctico. De cada caso han sido seleccionados los aspectos más relevantes que lo conforman o aquellas particularidades que le confieren un carácter singular a la práctica llevada a cabo. Se han analizado también las pruebas llevadas a cabo recientemente en esta materia por la empresa Canal de Isabel II, responsable de la gestión del ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid.

1 Introducción

El control de presiones en las redes de abastecimiento de agua se concibe como una de las operaciones más importantes para el correcto comportamiento hidráulico de este tipo de sistemas. Pero no solo es una variable que deba controlarse para un funcionamiento adecuado de la red, sino que se percibe como un modo óptimo de alcanzar objetivos que mejoren el servicio suministrado. Así, una buena gestión de la presión puede ser la base para la consecución de objetivos tan dispares como la reducción de caudal fugado, la disminución de la frecuencia de averías por roturas en conducciones o una eficaz herramienta para el ahorro de agua en épocas de sequía, entre otros.

La identificación y caracterización de los elementos más influyentes que conforman el ejercicio de la reducción de presiones debe ser el primer paso para establecer una metodología óptima de implantación de este tipo de operaciones. Tras la identificación de estos factores de especial relevancia debe definirse las características más adecuadas para cada uno de ellos en función de: el objetivo perseguido en el proyecto, las variables hidráulicas

de la zona a regular y de la infraestructura existente. Una posible selección de estos factores puede ser la siguiente – (1) Sector de regulación. Se deben examinar los parámetros más significativos de la zona a regular: tamaño, aislamiento del sector, puntos de entrada de caudal, etc. (2) Instrumentación. Básicamente son tres los tipos de dispositivos que compondrán la operación de reducción de presiones: válvulas reductoras de presión (VRP), controladores electrónicos externos y sensores de presión y caudal. (3) Tipo de regulación. La determinación de la técnica de regulación más apropiada para cada objetivo planteado y los parámetros que la definen es uno de los aspectos más importantes y complejos en este tipo de sistemas. (4) Cámara de válvulas. Se han de explorar los aspectos constructivos de este tipo de instalaciones, la disposición en la que deben configurarse las válvulas entre sí y la instrumentación aneja a la principal ya mencionada para el correcto funcionamiento del conjunto del sistema. (5) Control y monitorización del sistema. Por último se debe estudiar las posibles estructuras y estrategias de control existentes, así como los puntos y parámetros del sector que han de ser supervisados.

Por otro lado, cada uno de estos factores debe ser caracterizado mediante una serie de parámetros e índices cuyos valores óptimos se determinarán en función del objetivo para el que se ha diseñado el plan. Entre estos objetivos destacan – (1) Reducción de caudal fugado, (2) disminución de roturas y alargamiento de vida útil, (3) ahorro de agua consumida, (4) ahorro de energía y (5) mejora de la calidad de servicio.

2 Antecedentes

A pesar de la importancia que conlleva este tipo de maniobras en la gestión de las redes de abastecimiento, son muy escasos los estudios que hagan referencia a una metodología integral de instauración de un plan de reducción de presiones. Sin embargo, sí que existen estudios proponiendo soluciones a aspectos concretos del proceso. Así, existen estudios referentes a la interferencia de las válvulas en una red para optimizar su funcionamiento hidráulico, tratándose aspectos como la consigna de regulación óptima [Jowitt et al, 1990], el número de válvulas a colocar y su localización [Araujo et al, 2006].

Otras investigaciones van en la dirección de optimizar la zona a regular incidiendo en un aspecto esencial como es su tamaño. Algunas de las más importantes se fundamentan en el desarrollo de fórmulas empíricas basadas en la optimización económica del tamaño del sector teniendo en cuenta el coste del caudal fugado y las roturas [Hunaidi et al, 2008]; otras en cambio, se basan en programas para optimizar el tiempo de detección y arreglo de potenciales roturas [MacDonald et al, 2005].

Sin embargo la mayoría de estos estudios realizan su análisis de forma parcial en lo que se refiere a propósitos a alcanzar en un plan de regulación, centrándose la mayoría de casos en tan solo un objetivo. Esto impide la generalización de sus conclusiones a la totalidad de proyectos de este tipo. La combinación de propósitos es por tanto un aspecto al que cada vez se está prestando más atención. Esto queda patente en recientes estudios como los correspondientes a combinación de reducción de fugas con ahorro de energía [Skworcow et al, 2009; AbdelMeguid, 2011], o el ahorro de agua consumida con la reducción de caudal fugado [Fantozzi et al, 2007; Siew et al, 2009].

3 Metodología

Debido a la abundante literatura sobre casos de estudio llevados a cabo a lo largo del mundo, se ha aprovechado este tipo de documentos como base del presente trabajo. Así, se ha optado por una metodología basada en el análisis cualitativo, en la que se examina los casos más relevantes, comparándose entre sí y obteniendo mediante razonamiento inductivo las oportunas conclusiones.

Pese al desprestigio que parte de la comunidad científica trata de atribuir a la metodología de investigación cualitativa frente a la cuantitativa, son múltiples las ventajas que ofrece para cierto tipo de estudios como es el del presente estudio, entre las que destacan:

- Ofrecer una visión conjunta del problema, sin ceñirse a un aspecto concreto, lo cual daría una visión sesgada o parcial del fenómeno.
- Permitir trabajar con problemas que manejan un gran número de variables como es la reducción de presiones, lo cual impide realizar modelos generalizables a todos los casos.
- No requerir datos cuantitativos, en ocasiones difíciles de obtener.

- Perfecta adaptabilidad a la realidad dinámica de este tipo de maniobras al tratarse de una operación con continuas mejoras tecnológicas en su haber.

A continuación se muestra un esquema con la metodología de trabajo llevada a cabo, basada en el ya mencionado análisis de casos de estudio:

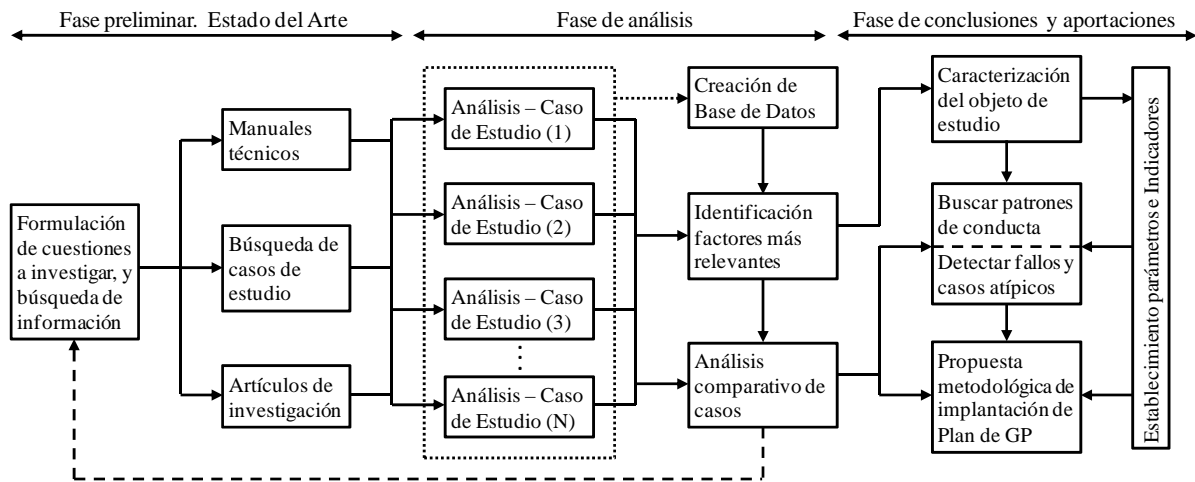


Figura 1. Esquema de metodología de trabajo seguida

3.1 Fase preliminar. Estado del arte

Como primer paso para alcanzar los objetivos propuestos se ha realizado una amplia y exhaustiva búsqueda de información basada fundamentalmente en tres tipos de documentos: manuales técnicos, publicaciones de investigación basadas en metodologías de análisis cuantitativo y casos de estudio de proyectos realizados.

3.2 Fase de análisis.

La primera parte de esta fase se corresponde con la selección de casos de estudio que “a posteriori” deben ser analizados. Con todos ellos se ha realizado una base de datos en la que se recoge – (1) condiciones iniciales de la zona a regular, destacando las variables hidráulicas y la infraestructura existente; (2) características más relevantes del plan de reducción de presiones llevado a cabo y el aspecto en el que se centra; (3) resultados obtenidos tras la instauración del proyecto. El almacenamiento de estos datos ha permitido realizar el posterior análisis y comparación de casos con mayor facilidad.

Como segundo paso, tras el análisis de la literatura recopilada y junto a la experiencia aportada por la empresa Canal de Isabel II, se han determinado aquellos elementos más influyentes en la operación de reducción de presiones y los parámetros que los caracterizan, siendo los siguientes – (1) Sector de regulación, (2) tipo de regulación, (3) instrumentación, (4) cámara de válvulas, (5) control y monitorización del sistema.

Por último, se ha llevado a cabo una comparación entre los distintos proyectos, buscando patrones de conducta y detectando fallos y casos atípicos que permitan extraer conclusiones sobre el comportamiento de este tipo de maniobras.

3.3 Fase de conclusiones-aportaciones

A partir de un análisis detallado de las experiencias llevadas a cabo y de su comparación, se ha procedido a sistematizar los distintos aspectos que deben tomarse en consideración, realizando una propuesta de alternativas sobre cómo debe abordarse cada uno de ellos en función de los objetivos perseguidos y los recursos disponibles.

En primer lugar, de la comparación realizada anteriormente se han extraído los patrones de conducta para, por razonamiento inductivo, deducir ciertos comportamientos y tendencias. Asimismo, se ha prestado atención a aquellos casos que han incurrido en algún tipo de fallo para deducir las causas de estos errores. Tras llevar a cabo este examen se desarrollan como aportaciones del presente estudio los siguientes aspectos:

- Clasificación de las técnicas de regulación disponibles.
- Propuesta de metodología de acción sistemática para instaurar un plan de regulación de presiones de forma generalizada.
- Propuesta de relación de indicadores de diseño de zona de regulación. Pese a haberse determinado como esenciales para el diseño de un plan de este tipo un total de cinco factores, se ha profundizado en este factor al tratarse de uno de los más complejos debido al elevado número de variables que influyen en su caracterización.

4 Resultados y Discusión

4.1 Clasificación de técnicas de regulación

En lo que respecta al tipo de regulación son escasos los estudios que determinen la mejor técnica para cada caso según las condiciones hidráulicas de la zona a regular y la infraestructura existente, no existiendo una clasificación clara en la literatura actual sobre este tema. La información a este respecto suele limitarse a presentar la regulación elegida en cada caso de estudio, sin realizar un análisis crítico sobre la elección tomada o los parámetros elegidos para caracterizar la operación.

Así, se plantea como primer objetivo realizar una completa clasificación de las técnicas de regulación existentes. Heimann [2009], realizó una primera aproximación a esta categorización. Sin embargo, se centra solamente en dos de los objetivos planteados en este estudio –reducción de pérdidas y disminución de roturas– además de considerar tan solo tres tipos de regulación de las múltiples posibilidades.

A continuación se presenta en forma de tabla las principales técnicas existentes en la actualidad y los objetivos para los que se consideran más convenientes su elección:

Tabla 1. Clasificación de técnicas de regulación de presiones

Grupo	Técnica de Regulación		Objetivos recomendados ¹
Regulación automática (sin controlador electrónico)	Salida de presión fija		1+2, 3 ²
	Reducción proporcional		1+2, 3
	Doble consigna (dos pilotos)		1+2+5
	Variable con caudal		1+2+5
Regulación a través de controlador electrónico	Programación temporal	Reducción a un valor fijo	4
		Doble consigna	1+2, 4
		Modulación temporal	1+2+5
	Programación basada en flujo	Doble consigna	1+2+5
		Modulación	1+2+5
	Combinación de programación temporal y basada en flujo	Prioridad de programación temporal	1+2+4
		Prioridad de programación basada en flujo	1+2+5
	Programación basada en punto remoto		5

¹ Los números se corresponden con objetivos más habituales para los que se establece un plan de este tipo, siendo esta relación: 1) Reducción pérdidas; 2) Disminución roturas; 3) Ahorro consumo; 4) Ahorro energía; 5) Calidad usuario.

² El símbolo (+) indica la combinación de varios objetivos.

Los objetivos recogidos en la tercera columna no son los únicos que puedan ser regulados mediante la técnica respectiva, pero sí se concibe adecuada la técnica propuesta para la consecución de éste o combinación de ellos.

4.2 Propuesta de metodología de implantación de plan de reducción de presiones

Tras el análisis exhaustivo realizado de cada caso de estudio así como de la correspondiente información referente a diseño de sistemas, se propone un esquema metodológico para la implantación de un plan de gestión de presiones. A continuación se procede a explicar dicho método cuyo esquema se puede ver en la figura al respecto más adelante (Figura 2):

Primero – La primera tarea al abordar este problema es tener claro el objetivo que se persigue con la implantación de la regulación. Las consideraciones que habrá que hacer para uno y otro serán distintas, y una mala determinación del objetivo puede llevar a un diseño poco eficaz de la operación. En el caso de que exista más de un objetivo, habrán de hacerse los estudios pertinentes que combinen todos ellos, o bien siendo alguno restrictivo y por tanto predominante sobre los demás, o bien realizando estudios de optimización multipropósito acordes al estudio.

Segundo – Tras determinar los objetivos hay que analizar las variables hidráulicas del sistema entre las que destacan presión y caudal consumido. Su examen debe centrarse en sus valores medios, extremos, variabilidad y estacionalidad. Solo un estudio exhaustivo de estas permitirá definir los parámetros de diseño correctamente.

Tercero – A continuación se debe analizar la zona de implantación el plan destacando como cuestión fundamental si se trata de una zona ya definida, o si en cambio se va a realizar un diseño de partida sobre la misma. La forma a proceder será bien distinta dadas las restricciones propias del primer caso o la libertad de partir de cero a la hora de adaptar el sector al objetivo perseguido. Asimismo cobra gran importancia la posibilidad de rediseñar o no la zona regulada.

Cuarto – Una vez diseñado adecuadamente el sector se debe elegir el tipo de regulación más adecuado al objetivo perseguido, dependiendo tanto de la zona a regular como de las variables hidráulicas del sistema. Las diferentes técnicas de regulación se pueden ver más adelante (Tabla 1).

Quinto – Elegido el tipo de regulación ya se conoce la instrumentación requerida. La consideración más importante a este respecto es si se trata de una técnica que requiera un controlador electrónico externo o no, y que características debe incluir este para poder llevar a cabo la técnica elegida.

Sexto – Con la instrumentación ya elegida, hay que analizar de nuevo las hidráulicas del sistema y determinar el número de válvulas necesarias. En el caso de que se requiera más de una, habrá que estudiar la configuración más adecuada para llevar a cabo la operación.

Séptimo – Ya instaurada completamente la instrumentación ha de diseñarse el plan de monitorización más adecuado acorde a la técnica de regulación elegida y la zona a regular.

Por último – Tras monitorizar toda la maniobra se deben comparar los resultados obtenidos con los esperados, y proceder en consecuencia si estos no son los deseados.

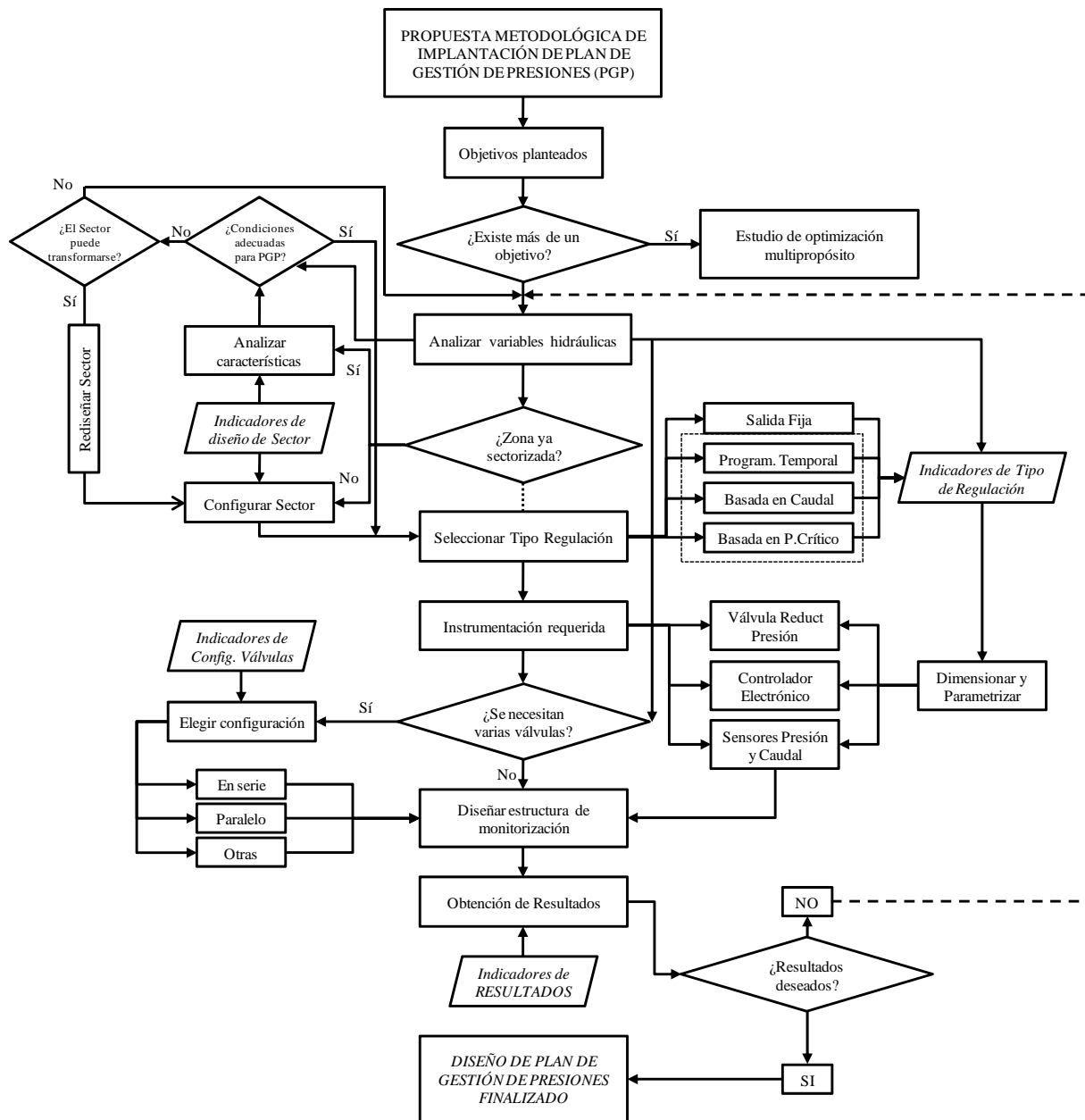


Figura 2. Propuesta metodológica de implantación de un plan de gestión de presiones

4.3 Propuesta de indicadores de diseño de sector

Como se puede ver en el esquema metodológico propuesto, para la elaboración del plan se recurre a una serie de indicadores, tanto para el diseño y elección de los diferentes factores característicos, como para la comparación y análisis final de resultados.

En cuanto a indicadores sobre resultados, existe bibliografía al respecto que propone un número determinado para cada objetivo planteado [Mays, 2004]. En cambio la bibliografía sobre los grupos identificados como indicadores y parámetros de diseño es muy escasa. A continuación se propone un amplio listado para el diseño de la zona a regular o *sector de regulación* al tratarse de uno de los factores más complejos dado el elevado número de variables que intervienen en su diseño:

Tabla 2. Parámetro e índices para diseño de sector de regulación

Características del sector		Parámetros e indicadores (uds.)	Observaciones
Tamaño	Parámetros	$L_T \equiv$ Longitud de tuberías principales (km)	Parámetro muy representativo de la red.
		$N_{aco} \equiv$ N° acometidas (uds.)	Al igual que el anterior muy representativo
		$S_T \equiv$ Superficie total del sector (m ²)	Área del polígono de la proyección en superficie de la zona ocupada por la red de un sector
		$S_O \equiv$ Superficie ocupada del sector (m ²)	Suma de las áreas ocupadas en superficie por elementos estructurales (edificios, mobiliario urbano, etc.).
	Indicadores	$D_R \equiv$ Densidad red (km/m ²) = L_T / S_T	Permite conocer la concentración de tuberías por m ² . Relevante a la hora de localizar fugas y roturas
		$I_{Obs} \equiv$ Índic. Obstaculosidad (-) ³ = S_T / S_O	Mide accesibilidad a tuberías de la red
Entradas o conexiones con la red de alta	Parámetros	$N_{Con} \equiv$ N° conexiones (uds.)	Dato de gran relevancia, por las implicaciones hidráulicas que conlleva
		$D_{Con} \equiv$ Distancia mínima entre entradas (km)	Al igual que el anterior muy representativo
	Indicadores	$I_{Con,Sup} \equiv$ Índice de conectividad superficial = N_{con} / S_T	Mide la posible afección del número de conexiones de entrada en relación con el tamaño del sector
		$I_{Con,Hid} \equiv$ Índice de Conectividad hidráulica = N_{con} / L_T	Representa mejor que el indicador anterior la posible afección del número de entradas sobre el comportamiento hidráulico del sistema
Condiciones Piezométricas de la red	Parámetros	$\Delta H^{(-)} = H_{Ent} - H_{P.Pésimo} \equiv$ Desnivel máximo negativo (m)	Importante para la calidad de servicio sobre el usuario
		$\Delta H^{(+)} = H_{Ent} - H_{P.mím,altura} \equiv$ Desnivel máximo positivo (m)	Importante para la disminución de fugas y roturas en la red
		$\Delta H_T = \Delta H^{(+)} - \Delta H^{(-)} \equiv$ Desnivel Máximo Total (m)	Un elevado valor de este parámetro puede indicar un sector mal dimensionado, el cual debería dividirse en zona alta y zona baja
		$L_{E,P,C} \equiv$ Distancia entre Punto de entrada y Punto Crítico (km)	Cuanto mayor sea este parámetro, mayores serán las pérdidas de carga sufridas y por tanto más margen de presión de consigna habrá que dejar
	Indicadores	$I_{Desv.Cotas} \equiv$ Índice de Desviación de Cotas (-) = $-\Delta H^{(-)} / \Delta H^{(+)}$	El signo negativo es para que sea siempre un índice positivo. Se considera que puede ser de los más significativos para la correcta programación de objetivos simultáneos tales como: “Reducción fugas” + “Reducción Roturas” frente a “Calidad sobre usuario”
		$I_{Cap,Hid,F} \equiv$ Índice de Capacidad Hidráulica (m/km) ⁴ = $\Delta H^{(-)} / L_T$	Puede dar una idea de la capacidad de suministrar la presión mínima al punto crítico

³ (-): Índice adimensional.

		$I_{Cap,Hid,R} \equiv$ Índice de Capacidad Hidráulica $Real = \Delta H^{(-)}/L_{E,P,C}$	Igual que el anterior pero con un enfoque hidráulico más representativo. En ocasiones difícil de definir $L_{E,P,C}$
Elementos de regulación internos (válvulas, depósitos, bombas)	Parámetros	$N_{Reg} \equiv$ N° de elementos de Regulación Internos (uds.)	Se puede subdividir en cada uno de los distintos elementos de regulación: $N_{Depósito}$; N_{Bombas} ; $N_{Válvulas}$
		$D_{Reg} \equiv$ Distancia desde el punto de entrada al elemento regulador interno (km)	Muy importante para distinguir entre la zona afectada solamente por la VRP y a la que afectan también los elementos reguladores internos
		<i>Otros parámetros propios de cada elemento Regulador.</i>	Algunos de los parámetros más importantes son: - Depósito: Altura, capacidad, etc. - Bomba: Curva característica, rendimiento, etc. - Válvula Reguladora: Tipo de válvula, presión de consigna, etc.
Aislamiento sector	Parámetros	$N_{V,C} \equiv$ N° válvulas de cierre, “fronterizas” ⁵ (uds.)	Un mayor número de válvulas de cierre, conllevará mayor riesgo de que se produzcan fallos de aislamiento
		$N_{V,SC} \equiv$ N° válvulas de “semicierre”, situadas en la frontera (uds.)	Habitualmente se trata de válvulas anti retorno. Se colocan para poder aportar caudal extra al sector en el que caso de que lo requiera
	Indicadores	$I_{ap} \equiv$ Índice de apertura (-) = $N_{V,SC} / N_{V,C}$	Ayuda a medir la capacidad del sistema de “reaccionar” ante solicitudes de gasto excepcionales
Tipos de usos o categorías	Parámetros	$N_{Cat} \equiv$ N° categorías (doméstico, industrial, etc.) ⁶	Se entiende por <i>Categorías</i> a los diferentes grupos en los que la empresa operadora del servicio de distribución de agua divide sus posibles consumidores, dentro del uso urbano: <ul style="list-style-type: none"> • Doméstico • Comercial • Industrial • Institucional • Riegos • Otros Este conlleva un estudio particularizado de cada <i>categoría</i> al regirse por condiciones diferentes, tanto de consumo como temporales
	Indicadores	$\% N_{Cat,i} \equiv$ Porcentaje de cada Categoría = $N_{aco,i} / N_{aco,T}$	Reparto de porcentajes “concentrados” en unas pocas categorías, indica homogeneidad en el sector. En cambio, una distribución desagregada puede significar demasiada heterogeneidad, pudiendo no ser correcto el diseño del sector, en cuanto a esta condición se refiere
Características de las conducciones	Parámetros	$D_i \equiv$ Diámetro de la tubería (<i>i</i>)	Parámetro fundamental para el cálculo comportamiento hidráulico de la red
		$M_i \equiv$ Material de (<i>i</i>)	Fundamental en la previsión de roturas

⁴ A pesar de parecer que puede tratarse de un Índice adimensional, se tratan de unidades de longitud referentes a unidades diferentes: (m) hace referencia a nivel de altura, y (km) a longitud de la red de tubería

⁵ El concepto *Fronterizo* hace referencia al hecho de que las válvulas estén situadas en el perímetro del sector, no teniéndose en cuenta a estos efectos cada una de las válvulas de cierre de las tuberías localizadas íntegramente dentro de la zona de control de presiones.

⁶ No confundir con los tipos de *Usos* a los que se puede abastecer (Urbano, Regadío, Industrial, Recreativo, Hidroeléctrico, etc.). Todas estas *Categorías*, corresponden al mismo uso: Uso Urbano, que es el objeto de estudio de este trabajo.

		$E_i \equiv$ Edad de la tubería (i)	Fundamental en la previsión de roturas
		$R_i \equiv$ Rugosidad de la tubería (i)	Depende principalmente del <i>Material</i> , aunque la <i>Edad</i> también afectará sobre este siendo su relación difícil de definir
	Indicadores	$\% (P_k)_j \equiv$ Porcentaje del valor (j) de cada parámetro (k)	P_k es cada uno de los parámetros mencionados: diámetro, material, etc. y (j) sus posibles valores. En el caso de variables discretas será cada valor (D, M), y en el de variables continuas rangos (E, R)

5 Conclusiones

La metodología de trabajo desarrollada para llevar a cabo este estudio y basada en el estudio de casos se concibe como una buena herramienta para caracterizar una maniobra compleja como la del presente estudio, cuya comprensión analítica completa aún es difícil de alcanzar debido al gran número de variables implicadas en el proceso. De esta forma, el esquema propuesto en la Figura 1, puede ser aplicable al estudio de otro tipo de operaciones complejas de similares a la estudiada.

Los continuos avances, sobre todo en materia tecnológica, que rodean este tipo de operaciones confieren al problema un *carácter dinámico* el cual desemboca en ocasiones en una dificultad manifiesta para conocer todas las técnicas existentes y cuál es la mejor elección para cada propósito planteado en cada proyecto. La clasificación expuesta en la Tabla 1 trata de resolver este problema proponiendo la técnica más adecuada para cada objetivo o combinación de estos.

La metodología sistemática y general de implantación propuesta trata de ser generalizable a la mayor parte de proyectos de gestión de presiones y puede servir de útil guía tanto para su diseño como explotación. Sin embargo, la multitud de variables que afectan a cada sistema de abastecimiento concreto hacen que deban tenerse en cuenta las particularidades de cada caso, con las consiguientes afecciones sobre la estructura general propuesta.

La técnica de regulación elegida y los parámetros y consignas que la definirán se concibe “a priori” como el elemento fundamental para el correcto comportamiento de la red. No obstante el resto de factores mencionados y en particular la zona de regulación pueden ser los elementos determinantes en muchos casos. La caracterización del sector de regulación no es sencilla ya que depende a su vez de múltiples variables. Por ello los indicadores propuestos pueden ser de gran ayuda al estar clasificados según estas variables e intentan dar una explicación a ciertos problemas que puedan ocurrir en la red regulada.

6 Referencias

AbdelMeguid H. (2011). “*Pressure, Leakage and Energy Management in Water Distribution Systems*” Tesis doctoral, Monfort University. March 2011.

Araujo L.S., Ramos H., Coelho S.T. (2006). “*Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management.*” *Water Resources Management* (2006) 20: 133–149.

Fantozzi M., Lambert A. (2007). “*Including the effects of pressure management in calculations of Short-Run Economic Leakage Levels*” *Proceedings of IWA Special Conference 'Water Loss 2007'*, Bucharest, Romania, 23-27 September 2007.

Heimann A. (2008). “*PRV Use for Leakage Reduction: Various Technical*”.

Hunaidi O., Brothers K. (2008). “*Optimum Size of District Metered Areas*”. *Proceedings of IWA Special Conference 'Water Loss 2007'*, Bucharest, Romania, 23-27 September 2007.

Jowitt P.W., Xu C. (1990). “*Optimal Valve Control in Water Distribution Networks*” *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, July/August. 455–472.

Mays L.W. (2004). *Urban Water Supply Management Tools*. Ed. Mc Graw Hill

McDonald G., Yates C.D. (2005). “*DMA Design and Implementation, a North American Context*” IWA 'Leakage 2005' Conference – Halifax, Canada - September 2005.

Siew C., Tanyimboh T. (2009). “*Augmented Gradient Method for Head Dependent Modelling of Water Distribution Networks*”. Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers. May 17-21, 2009, Kansas City, Missouri.

Skworcow P., AbdelMeguid H., Ulanicki B., Bounds P. and Patel R. (2009). “*Combined Energy and Pressure Management in Water Distribution Systems*”. Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers. May 17-21, 2009, Kansas City, Missouri.