



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Análisis de la rentabilidad económica de un sistema de gestión de presiones implantado en una red de abastecimiento (agua y ciudad)

Autor: Enrique Martínez Santa María

Institución: Asociación Española de Empresas de Ingeniería, Consultoría y Servicios Tecnológicos (Tecniberia)

e-mail: madgene@wasser.es

Otros Autores: Santiago Navarro Parras (Wasser SAE); Dionisio Pérez Bueno (Wasser SAE)

RESUMEN

Es de sobra conocido que las sobrepresiones que existen en una red de abastecimiento incrementan tanto el caudal fugado como el número de roturas que se produce en la red. Estas sobrepresiones son debidas a la necesidad de mantener una presión mínima en el punto más crítico del sistema a lo largo del día, apareciendo cuando la demanda baja. La gestión de presiones tiene por objeto reducir esos excesos de presión. Su implantación presenta unos costes de ingeniería, construcción, mantenimiento y explotación, frente a los beneficios mencionados de reducción del volumen de agua que entra en el sistema y reducción de roturas de tuberías. La comparación de ambos valores mediante el análisis de rentabilidad económica nos facilita la decisión entre la conveniencia de la implantación o no de la gestión de presiones. El análisis comprenderá los siguientes apartados: A. Definición de un sistema de gestión de presiones B. Ventajas e inconvenientes C. Opciones para la implantación. D. Costes: Ø Diseño Ø Construcción Ø Mantenimiento E. Beneficios: Ø Por ahorro de agua en fugas Ø Por reducción de roturas en tuberías Ø Rentabilidad En este informe se presenta la metodología para determinar cada uno de los factores indicados anteriormente, así como su aplicación práctica con un ejemplo real.

Palabras Clave: sistema de gestión de presión; análisis rentabilidad; red abastecimiento de agua

1 Introducción

El objetivo de todo sistema de distribución de agua potable es suministrar agua a los abonados con la requerida calidad. La calidad del suministro debe referirse tanto a parámetros hidráulicos, en particular suministrar el caudal requerido a una presión adecuada, como a parámetros sanitarios, por ejemplo asegurar una correcta concentración de desinfectante o unos niveles bajos de contaminantes.

Siguiendo el criterio de que el agua llegue con una presión suficiente a lo largo del día en el punto más crítico del sistema, se producen presiones más altas que las necesarias durante los periodos en que la demanda no es punta, y en aquellos puntos que tienen mejores condiciones hidráulicas.

La gestión de presiones tiene por objetivo reducir este exceso de presión, lo que produce un funcionamiento más homogéneo de la red, y una reducción en el caudal de fugas y en la aparición de roturas.

En este artículo se pretende analizar la viabilidad de la implantación de un sistema de gestión de presiones, desde el punto de vista de la rentabilidad económica, analizando los costes que implica su instalación, y los beneficios que produce.

2 Beneficios e inconvenientes

La decisión de la implantación de un sistema de gestión de presiones pasa por comparar los beneficios que se obtienen con los costes que se originan. Si la inversión inicial se realiza de forma eficiente y los costes de mantenimiento y conservación se minimizan, entonces los beneficios serán máximos y la gestión de presión estaría justificada en la mayoría de los casos.

Hay que destacar, tal y como ocurre en la mayoría de las actividades económicas, los rendimientos marginales serán decrecientes, es decir: los beneficios disminuirán cuanto más recursos se destinen, y por lo tanto menor será el grado en términos de agua ahorrada.

Los principales beneficios que se pueden conseguir son:

- **Reducción caudales de fuga:** como se sabe, el caudal que se fuga por un orificio es proporcional a un cierto exponente de la presión. Por tanto una reducción en la presión, significa una disminución en los caudales fugados. Ésta afecta tanto a las fugas latentes como a las producidas por las roturas.
- **Reducción de la frecuencia de rotura:** la presión no sólo afecta al caudal de las fugas, sino que también puede tener un efecto significativo en la frecuencia con la que aparecen las fugas y roturas, lo que representa a menudo el aspecto económico más interesante cuando se pretende llevar a cabo un programa de gestión de presiones.
- **Reducción de algunos componentes del consumo:** evidentemente todos aquellos consumos que dependen de la presión, tales como grifos, duchas, o riego se verán reducidos por la disminución de la presión. Es importante destacar que en general se considera la tendencia de dejar un grifo abierto más tiempo a caudal más bajo, está más que compensado por el caudal reducido, de forma que el volumen total consumido es menor.
- **Presión de suministro más uniforme:** sin una gestión de presiones, la presión de suministro a los abonados es función de la de entrada al sistema, menos las pérdidas de carga a la red de distribución. Teniendo en cuenta esto, la presión puede variar considerablemente entre el día y la noche y entre los diferentes días de la semana.
- **Reducción de los costes energéticos:** la reducción de la presión del sistema a menudo conlleva el beneficio de disminuir los costes energéticos, como consecuencia de reducir el consumo de los equipos de bombeo cuando se realiza la inyección directa del agua a la red.

Entre los inconvenientes cabe destacar los siguientes:

- **Dificultad en encontrar las fugas:** al haber menos presión, las fugas hacen menos ruido, y cuestan más hallarlas.
- **Mantenimiento:** la instalación de los equipos necesario para realizar la gestión de presiones implica un mantenimiento para que funcione de forma adecuada.
- **Disminución de los ingresos:** la reducción del consumo, supone también una merma en los ingresos que percibe la compañía suministradora.
- **Calidad del agua:** el cierre de las válvulas de contorno de los sectores puede producir ramales ciegos que ocasionen problemas de baja calidad del agua.

3 Sistemas de control

Entre las diversas opciones para implantar un sistema de gestión de presiones, quizá una de las más utilizadas es mediante la instalación de válvulas reductoras de presión. El funcionamiento de estos dispositivos es producir una pérdida de carga de forma que se reduce la presión a la salida de la válvula. En la actualidad, existen dispositivos que permiten obtener una presión variable a la salida de la válvula, en función de la hora, del caudal circulante, o de la presión en otro punto del sector. Los sistemas de control más frecuentes son los siguientes:

- a. **Salida fija:** este es el método tradicional de control, mediante el cual la presión de salida de la válvula se mantiene en un valor fijo de forma que, bajo las condiciones de caudal punta, se obtenga una presión mínima en el punto crítico. Esta opción es la más barata de instalar, y requiere un mínimo mantenimiento.

Cuando las válvulas se instalan con una presión de salida fija, la pérdida de carga producida en el sector supone que las presiones en los puntos de consumo variarán de acuerdo con la demanda de los usuarios.

Por lo tanto, este tipo de válvulas es efectivo para zonas con bajas pérdidas de carga, demandas que no varían mucho estacionalmente, y características de presiones uniformes. En otras zonas pueden ser ineficientes, ya que las presiones de salida tienen que fijarse lo suficientemente altas como para que se satisfagan las presiones mínimas en el punto crítico durante la demanda punta. A medida que la demanda del sistema disminuye, normalmente por la noche, las pérdidas de carga en el sistema se reducen y la presión del sistema tiende hacia la presión estática, que en muchos casos resulta excesiva para satisfacer la demanda nocturna y la demanda de protección contra incendios.

Las desventajas derivadas de este sistema podrían ser corregidas si el sector se alimentase desde dos o más puntos, de forma que se redujesen considerablemente las pérdidas de carga, con respecto a su valor para un único punto de alimentación.

Esta solución no siempre se puede llevar a la práctica debido a la posibilidad de interacción entre las válvulas, como consecuencia de una falta de resistencia en el sistema, que tienda a cerrar una de ellas. En general, una única VRP puede ser la solución más adecuada cuando las pérdidas de carga entre la válvula y el punto crítico sean menores de 10 m bajo cualquier condición de caudal. (UK Water Industry, 1994g).

- b. **Modulación basada en el tiempo:** este es el sistema más simple para realizar un control avanzado de la presión y también el más barato. Se realiza mediante un dispositivo de control que dispone de un reloj interno, de manera que se varía la presión de tarado de la válvula en función de la franja horaria del día, de acuerdo con el patrón de demandas.

Se trata de un método efectivo para realizar la reducción de presión en aquellos sistemas en donde existe un patrón constante de demanda diaria, pudiendo ser una solución óptima para reducir el exceso de presiones por la noche, cuando la mayoría de los usuarios se encuentran durmiendo (conticinio) y la demanda es mínima.

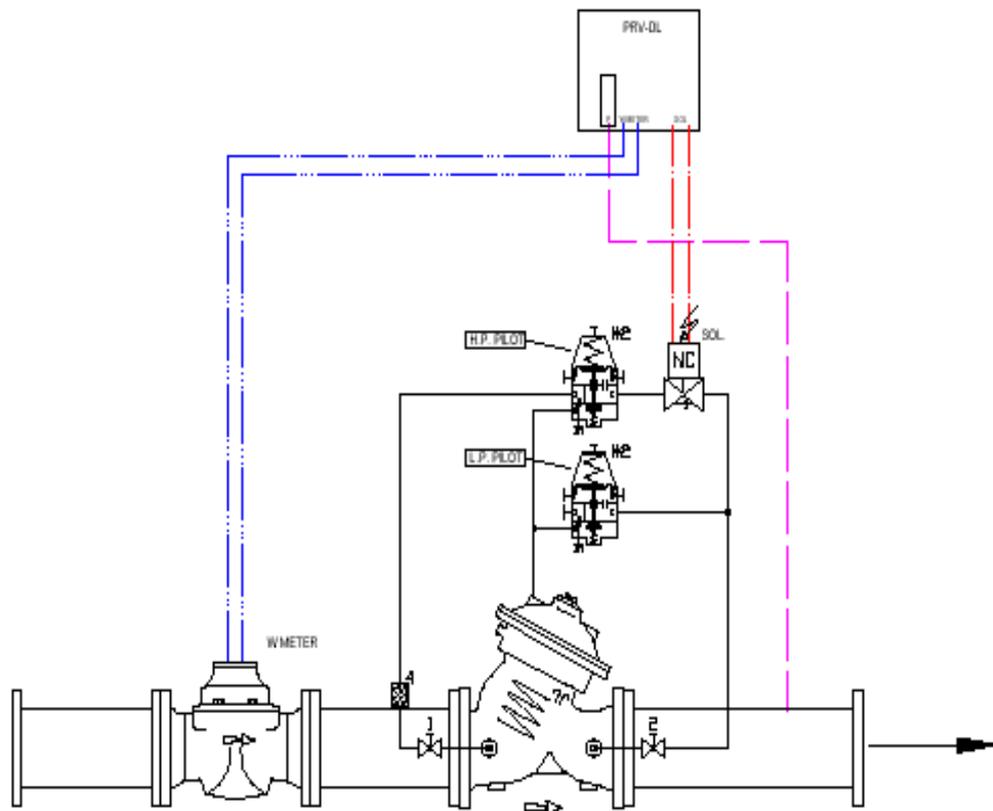
Este sistema tiene el inconveniente que ante una variación repentina de caudal (por ejemplo, debido a una demanda para protección contra incendios) durante las horas en que la presión de salida de la válvula es más baja, el sistema de control es incapaz de responder a la nueva situación, lo que puede dar lugar a que las presiones en la zona sean bajas, a menos que la presión de salida sea fijada con un margen de seguridad suficiente para garantizar el nivel mínimo de servicio ante dichas situaciones, lo que conllevará un cierto exceso de presiones en condiciones normales.

- c. Modulación basada en el caudal:** este sistema proporciona una mayor flexibilidad que el anterior, aunque en contrapartida tiene un coste que puede ser aproximadamente el doble. Mediante este sistema se puede controlar la presión a la salida de la válvula de acuerdo con la demanda del sistema, por medio de la conexión del sistema de control a un caudalímetro que se encuentre próximo a la válvula. De esta manera, la pérdida de carga que se produce en el sector se compensa con la variación de la presión a la salida de la válvula, con objeto de mantener una presión uniforme en el punto crítico. Esta solución es el más adecuado para aquellas zonas con condiciones de suministro variables que requieran un control avanzado de la presión.

El control se puede realizar mediante un patrón prefijado, que tenga en cuenta la relación entre el caudal y la pérdida de carga en el distrito. Esta relación se deberá calcular o bien obtener mediante mediciones de campo, y deberá ser introducida en el sistema de control. De forma alternativa, el sistema de control se puede mejorar mediante su conexión vía radio o teléfono a un medidor de presión en el punto crítico, de forma que se ajuste la presión a la salida de la válvula para que no exista exceso de presión en el punto crítico en ningún momento del día. Esta segunda opción supone un mayor coste debido al sistema de comunicaciones necesario, aunque permite obtener un mayor ahorro de agua, así como garantizar los caudales requeridos para protección contra incendios, lo que hace que en ocasiones este tipo de control sea más ventajoso.

En la figura nº 1 se muestra una configuración típica (propuesta por BERMAD):

Figura nº 1: Configuración de una modulación basada en el caudal



4 Costes

Los principales costes, que analizaremos posteriormente, y que hay que considerar al evaluar la rentabilidad de un sistema de gestión de presiones, son los siguientes:

- Costes de diseño.
- Costes de construcción.
- Costes de mantenimiento y explotación.

Costes de diseño

Estos costes son los necesarios para estudiar y definir cuál es la alternativa más adecuada de gestión de presiones en cada sector. Como es evidente dependen mucho del tipo de red y de sus condiciones particulares. Puede incluir también, todas aquellas pruebas o estudios pilotos necesarios para encontrar la tipología más adecuada. Aunque cuantitativamente son costes no muy elevados, si que tienen una importancia capital. Pues de encontrar la solución óptima, depende que los beneficios esperados, y por tanto la rentabilidad de la instalación sea máxima.

Un valor aproximado de estos costes estarían entre 4000 € a 6000 € por instalación.

Costes de construcción

En el presente apartado es valorar los costes de construcción de una cámara tipo para el alojamiento de los elementos de maniobra y control así como la valoración de suministro e instalación de estos elementos necesarios para una regulación de presiones.

Existen múltiples disposiciones para realizar la gestión de presiones: de dos líneas en paralelo, de dos líneas en serie-paralelo, en tres líneas, etc. En la figura nº 2 se puede ver un ejemplo de una configuración típica serie-paralelo.

Figura nº 2: Disposición mixta serie-paralelo



Con las siguientes hipótesis, el coste de construcción de una instalación es aproximadamente el que se muestra en la tabla nº 1:

- Diámetro de entrada: 300 mm
- Diámetro de salida: 200 mm
- PN=16 atm
- Obra Civil:
 - Movimiento de tierras:
 - Cota roja: 2,50 m
 - Talud de excavación: 1H:5V
 - Anchura de trabajo en la base de la excavación: 0,50 m
- Hormigones:
 - Espesor de hormigón de limpieza: 0,10 m
- Reposiciones:
 - Espesor del firme de la calzada: 0,30 m
- Varios:
 - Seguridad y Salud: 4% del P.E.M.

Tabla nº 1. Costes de construcción (Presupuesto de Ejecución Material) de una cámara para válvula reguladora de presión

	P.E.M.	
	VRP	VRP
	con modulador	sin modulador
Obra Civil	21.000 €	21.000 €
Valvulería	27.000 €	27.000 €
El. Electrónicos	21.000 €	10.000 €
Varios	3.500 €	3.000 €
TOTAL=	72.500 €	61.000 €

Costes de mantenimiento y explotación

Las principales actividades que engloba el mantenimiento y explotación, y que por tanto hay que tener en cuenta en el análisis de la rentabilidad del sistema, son las siguientes:

- Revisión periódica de las instalaciones.
- Suministro de energía eléctrica.
- Transmisión de datos vía GSM.
- Mantenimiento y reparaciones de obra civil.
- Mantenimiento y reparaciones de obra hidráulica.
- Mantenimiento y reparaciones de instalaciones electrónicas.
- Mantenimiento del telecontrol.

Estos costes se pueden expresar en función del coste de construcción, obtenido en el apartado anterior, de la obra civil, de la hidráulica y de las instalaciones electrónicas. Por ejemplo:

Costes de mantenimiento para una instalación sin controlador de VRP:

$$C = 980 + 0,05 \cdot V + 0,07 \cdot H + 0,10 \cdot E$$

Costes de mantenimiento para una instalación con controlador de VRP:

$$C = 1500 + 0,05 \cdot V + 0,07 \cdot H + 0,10 \cdot E$$

Siendo:

C, el coste en €/año de cada instalación,

V, el valor de la obra civil,

H, el valor de la obra hidráulica,

E, el valor de las instalaciones electrónicas.

5 Ingresos

De todos los beneficios indicados anteriormente, los dos que vamos a considerar para evaluar la rentabilidad de un sistema de gestión de presiones son los siguientes: los ingresos derivados por el ahorro de agua, y los derivados por la reducción de averías y reparaciones. Los ingresos derivados por el ahorro de energía, pueden tener su importancia en aquellos sistemas en que los bombeos sea una parte esencial. En este caso, el ahorro producido estaría relacionado también con el ahorro de agua, y se podría valorar conociendo éste, las alturas de bombeo y el precio de la energía.

6 Obtención del ahorro de agua

La metodología más utilizada para evaluar la eficiencia de los sectores desde el punto de vista del coste utiliza los principios *BABE* (acrónimo de *Burst and Background Estimate*), desarrollado originalmente en el Reino Unido (UK Water Industry, 1994 a 1994g), con objeto de calcular los componentes de las pérdidas reales basado en los parámetros que tienen influencia sobre ellos.

El objetivo de la metodología *BABE* es evaluar los componentes individuales de las fugas en una zona de suministro, y entonces comparar el valor estimado con el nivel de fugas obtenido a partir

de un balance de agua anual o del análisis de caudales nocturnos, o preferiblemente de ambos. Esta metodología no es una ciencia exacta, ya que esta basada en una serie de estimaciones e hipótesis, alguna de las cuales dependen de la disponibilidad de datos de buena calidad por parte de la compañía suministradora, otras son valores por defecto basados en promedios, y otras dependen del juicio ingenieril. No obstante, esto no resta validez a esta técnica, que puede considerarse similar a la modelización de redes de agua, en donde se utiliza una mezcla de datos medido en ensayos de campo y valores estimados.

De acuerdo con los conceptos *BABE*, las fugas se pueden dividir en varios componentes:

- Fugas latentes: este componente está formado por numerosas fugas que individualmente son pequeñas, con caudales comprendidos desde menos de 10 l/h hasta varios cientos de l/h, pero que pueden suponer una proporción significativa de las fugas totales, como consecuencia de que están presentes durante gran cantidad de tiempo. De hecho, muchas de las fugas latentes nunca van a ser reparadas, por lo que van a existir desde el momento que se produjeron hasta que el correspondiente componente de la red sea sustituido. La aparición de forma regular de nuevas pequeñas fugas, y el coste que supone su localización de forma individualizada, hacen que siempre exista una cierta cantidad de fugas latentes, a pesar de las operaciones de mantenimiento que reparan algunas de ellas. Estas fugas se producen normalmente en uniones y juntas de tuberías, válvulas, hidrantes, contadores, etc., tanto de la red de distribución como de las acometidas de los abonados.
- Roturas comunicadas: son aquellas que son puestas en conocimiento de la empresa suministradora, sin que hayan tenido que ser buscadas activamente. Esto puede suceder porque el agua llegue a la superficie y sea detectada por los viandantes, o bien porque la fuga produzca una reducción en el suministro de algunos abonados, con el resultado de presentar una reclamación a la empresa. Estas fugas suelen tener caudales más altos que las fugas latentes, normalmente entre 500 y 50.000 l/h (aunque puede existir alguna excepción), y son comunicadas a la empresa poco después de producirse. Se adopta un valor de 500 l/h puesto que normalmente se considera que es el mínimo caudal de fugas que puede ser detectado por técnicas acústicas, en el caso de tuberías metálicas enterradas con un recubrimiento normal de 1 metro. La reparación de estas fugas suele realizarse en un tiempo relativamente breve, con objeto de restablecer tanto el servicio de abastecimiento de agua como el de algún vial público que pueda haberse dañado como consecuencia de la rotura, por lo que su duración promedio suele ser de unas pocas horas o días. Por lo tanto, a pesar de que su caudal es elevado, el volumen total perdido por estas roturas es normalmente pequeño.

- Roturas no comunicadas: éstas tienen generalmente caudales más bajos que las comunicadas, pero mayores que las fugas latentes. Sólo se pueden encontrar mediante la realización de un control activo de fugas (siendo la monitorización de sectores uno de los métodos para llevar a cabo dicho control). Pueden estar presentes durante sólo unos días, pero pueden llegar a durar varios años, dependiendo de la intensidad con que se realice el control activo de fugas. Si no se efectúa dicho control activo, de forma que la empresa tan sólo interviene ante las roturas comunicadas, se dice que la empresa realiza un control pasivo de fugas, lo que sólo puede ser adecuado cuando el agua es abundante y barata, y no existe una regulación de la Administración respecto a la reducción de fugas.

Seguidamente se va a describir la metodología desarrollada (UK Water Industry, 1.994e y 1.994f). El caudal mínimo nocturno está formado por una serie de términos:

- Caudal entregado a los consumidores: es el caudal que llega a los consumidores, con independencia de sus clase (doméstico, comercial, industrial, etc.). Éste a su vez puede descomponerse en dos términos, uno que agruparía las fugas producidas en las instalaciones interiores de los abonados, y otro que correspondería al consumo intencionado de agua. Existen diferencias significativas entre ambos términos, puesto que el primero estará formado por consumos de duración temporal elevada, a un caudal aproximadamente constante, mientras que el segundo corresponderá a consumos de menor duración con caudales variables, cuya modulación temporal puede estar laminada por la existencia de depósitos de almacenamiento.

Con respecto a las fugas producidas en las instalaciones interiores, hay que indicar que éstas tan sólo tienen en cuenta la fugas producidas entre el “punto de entrega” del agua (límite de la propiedad) y el “punto de consumo” (lugar donde está situado el contador individual), puesto que las fugas que se producen ayuso del contador, se considera que forman parte del consumo del abonado, ya que son susceptibles de ser medidas (si bien en muchos casos no lo son, debido a los pequeños caudales circulantes, y a la clase metrológica y estado de conservación del contador). Las fugas latentes de las instalaciones interiores dependen del estado en el que se encuentra la instalación, y pueden estimarse utilizando los valores indicados en la Tabla nº 2.

Tabla nº 2. Fugas latentes en instalaciones interiores

Estado	Caudal promedio (l/abon./h)
Bueno	0,5
Medio	1,0
Malo	1,5

Por otra parte, el caudal consumido por los usuarios se puede dividir en tres categorías:

- **Consumo nocturno excepcional:** cualquier consumo individual, sea doméstico o no-doméstico, cuyo caudal supere la definición de una rotura (500 l/h), se considera como excepcional, y debe ser evaluado de forma separada. Estos usuarios pueden ser identificados a partir de los registros de los contadores. Para evaluar su consumo nocturno, normalmente se necesita disponer de un registro continuo de la lectura del contador durante la noche, o bien leer el contador a intervalos de 1 hora, entre la 1:00 h y las 5:00 h.

Algunos usuarios tendrán un consumo nocturno constante, mientras que el de otros mostrará una variación significativa de noche a noche, o de semana en semana. En este último caso, se deberán considerar diferentes registros de consumos nocturnos.

- **Consumos nocturno doméstico:** el caudal Q_d en l/h debido a los usuarios domésticos con un consumo “normal” puede ser evaluado mediante:

$$Q_d = Q_v \cdot N_v$$

Siendo:

Q_v : valor promedio del consumo nocturno doméstico, en l/propiedad/h;

N_v : número total de propiedades en el sector.

Según diversos estudios realizados en el Reino Unido, el valor de Q_v resulta 1,7 l/prop./h (o de forma equivalente 0,6 l/habitante/h). Se observa no obstante, que un pequeño porcentaje de viviendas activas con un consumo elevado puede tener una gran influencia en el caudal promedio nocturno, lo que explica que puedan observarse valores mayores o

menores que el valor promedio, especialmente en pequeños sectores. El valor promedio del consumo nocturno doméstico (1,7 l/prop./h) puede ser considerado que provenga, de forma aproximada, de un 17% de viviendas activas que utilizan 10 l/h cada una, lo que da lugar a una gran variabilidad del consumo nocturno, sobre todo en pequeños sectores.

- **Consumos nocturno no doméstico:** debido a las diferencias en cuanto a usos y características de las instalaciones interiores de los consumidores no domésticos, la variabilidad de sus consumos es todavía mayor que en el caso de los consumos domésticos. El caudal total debido a los usuarios no domésticos puede obtenerse de forma simplificada mediante una expresión similar a la ecuación (1), si bien teniendo en cuenta que en este caso el valor promedio del consumo nocturno es 8 l/no-prop./h. Sin embargo, este procedimiento a menudo subestima el consumo nocturno no doméstico, por lo que resulta más conveniente clasificar los usuarios no domésticos en diferentes categorías de consumo. Para ello, basta con contabilizar en el sector en estudio, el número de usuarios no domésticos de cada categoría, y multiplicar esos valores por el consumo medio de la categoría. Sumando los resultados de todos los grupos, se obtiene una estimación del consumo nocturno de los usuarios no domésticos. En la tabla nº 3 se indican las categorías propuestas en UK Water Industrie (1.994e).

Tabla nº 3. Consumo medio nocturno para usuarios no domésticos

Categoría	Tipo de usuario	Consumo medio (l/prop/h)
A	Estaciones de policía/bomberos, centralitas, bancos, iglesias, jardines, instalaciones tratamiento de aguas	0,9
B	Tiendas, oficinas, talleres, lavanderías, almacenes, grandes propiedades domésticas, pensiones, garajes, estaciones servicio, campings, granjas, comederos de ganado	6,2
C	Hoteles, escuelas, universidades, cafés, restaurantes, tabernas, residencias, establos	12,6
D*	Hospitales, fábricas (comida y manufactura), urinarios públicos, lugares de trabajo	20,5
E*	Residencias de ancianos, minas y canteras	60,6

*Una alternativa para grandes residencias y hospitales es 2,5 l/residente/h

- **Caudal perdido por fugas en la red:** dentro de este término se encuentran las fugas producidas en todos los elementos situados antes del punto de entrega del agua a los usuarios, por lo que se incluyen tanto las pérdidas en la red de distribución y depósitos de almacenamiento, como las producidas en las acometidas de los usuarios. Las pérdidas promedio anuales de las roturas comunicadas y no comunicadas en tuberías de distribución y acometidas dependen de la frecuencia, caudal y duración promedio. Las

fugas latentes ocurrirán en las juntas y accesorios de las tuberías de distribución y de las acometidas, si bien hay menores puntos donde pueden producirse fugas por metro de tubería de distribución que en una acometida.

Lambert y Hirner (2.000) proponen la siguiente ecuación general para el cálculo de las fugas latentes, que en dicho documento se denominan unavoidable average real losses (UARL).

$$UARL = \left[A \cdot \frac{L_{red}}{N_{acom}} + B + C \cdot \frac{L_{acom}}{N_{acom}} \right] \cdot P; \text{ donde}$$

los parámetros A, B y C han sido obtenidos estadísticamente tras el análisis de diferentes sistemas de abastecimiento en 20 países distintos:

A = 18 l/km.día.mca

B= 0,80 l/km.día.mca

C= 25 l/km.día.mca

L_{red} = Longitud total de tuberías (transporte + distribución) (km)

L_{acom} = Longitud total de acometidas (km)

N_{acom} = Número de acometidas

P= Presión media de operación (mca).

Otro método similar, aunque simplificado, propuesto en “Managing leakage” sugiere que el caudal nocturno se calcule a partir de la fórmula siguiente, donde únicamente se tiene en cuenta el número de acometidas y la longitud de las tuberías de distribución.

$$Q_{fl} = F \cdot N_a + G \cdot L$$

siendo:

Q_{fl} : caudal producido por fugas latentes en la red de distribución y acometidas en l/h;

F: caudal fugado por acometida, en l/acom./h;

G: caudal fugado por longitud de tubería, en l/km/h.

Los valores de F y G dependen del estado en que se encuentren las acometidas y la red de distribución, respectivamente, según se indica en la tabla nº 4:

Tabla nº 4. Fugas latentes en tuberías de distribución y acometidas

Estado	F(l/acom./h)	G(l/km/h)
Bueno	1,5	20
Regular	2,0	40
Malo	4,5	60

La metodología propuesta para realizar la evaluación de las fugas consiste en calcular cada uno de los componentes del caudal mínimo nocturno, de acuerdo con los valores aproximados que se han indicado anteriormente. Los datos que se precisan conocer son el número de usuarios, la presión media nocturna y los consumidores excepcionales, pudiendo estimarse el número de usuarios no domésticos a partir del porcentaje global de la compañía. Se trata por lo tanto de determinar el caudal mínimo al que se podría llegar si sólo existieran fugas latentes y consumos de usuario, lo que se puede considerar como el consumo nocturno inevitable de agua.

Puesto que el caudal mínimo nocturno depende de diversas variables, deben aplicarse factores correctores cuando se realiza una serie de mediciones, con objeto de tener los resultados referidos a una base común. Normalmente se consideran dos factores: el factor corrector de la presión y el factor corrector del periodo de muestreo, aunque dado que en este apartado se trata de estimar el caudal mínimo nocturno a partir de lo expuesto anteriormente y no de datos medidos, sólo se considerará el primer factor.

Con objeto de estandarizar los valores de los caudales nocturnos, se propone referir todos los caudales a una presión de 50 m.c.a., resultando los factores correctores de la presión (PCF) que vienen indicados en la tabla nº 5. Cuando se realiza una medición del caudal mínimo nocturno a una presión diferente de 50 m.c.a., se puede obtener un caudal estandarizado, dividiendo el caudal medido por el PCF correspondiente a la presión promedio nocturna de la zona (AZNP). Inversamente, las fugas latentes obtenidas mediante las tablas nº 3 y 4 pueden asimismo corregirse con este factor, si se pretenden realizar los cálculos a la presión a la que se han realizado las mediciones (en este caso las fugas latentes se multiplican por el PCF). Sin embargo, según la metodología propuesta se considera que el consumo intencionado de agua no depende de la presión, por lo que no se debe afectar con este factor.

Tabla nº 5. Factor corrector de la presión

AZNP (m)	20	30	40	50	60	70	80	90	100
PCF	0,329	0,529	0,753	1,000	1,271	1,565	1,884	2,226	2,592

Aparte de los caudales mínimos nocturnos determinados anteriormente es necesario conocer los siguientes datos:

- Evolución a lo largo de las 24 horas del día de:
 - Caudal inyectado al sector en estudio.
 - Presión en el punto de entrada
 - Presión en el punto promedio (también denominado AZP o average zone point en inglés). Se suele adoptar el punto de red que tiene una cota promedio, con la máxima densidad de población.
 - Presión en el punto crítico.

- Cotas de los siguientes puntos:
 - Punto de entrada (z_e).
 - Punto promedio o AZP (z_{AZ}).
 - Punto crítico (z_c).

La metodología de cálculo está basada en dos ecuaciones: por un lado la ecuación que relaciona los caudales de fuga a diferentes presiones; y por otro lado, una ecuación de pérdidas de carga que se utiliza para evaluarla para cada hora entre el punto de entrada, y los puntos promedio y crítico:

$$H_{L,AZP}(t) = K_{AZP}(t) * Q(t)^2$$

$$H_{L,crit}(t) = K_{crit}(t) * Q(t)^2$$

Siendo:

$H_{L,AZP}(t)$, $H_{L,crit}(t)$: pérdida de carga producida entre el punto de entrada y los puntos promedio y crítico, respectivamente para la hora t ;

$K_{AZP}(t)$, $K_{crit}(t)$: factor de fricción conjunto para el tramo comprendido entre la entrada y el punto promedio, y entre la entrada y el punto crítico, respectivamente para la hora t . Se considera que estos factores de fricción van a permanecer invariables cuando se realice la gestión de presión;

$Q(t)$: caudal inyectado en la hora t .

El proceso de cálculo conlleva las siguientes etapas:

1. Calcular el componente del caudal inyectado que es independiente de la presión, durante la hora de mínimo caudal nocturno t_{MNF} , el cual será igual a la suma de varios elementos:
 - Fugas latentes independientes de la presión. Se puede considerar, a falta de evidencias que muestren que una parte de las fugas latentes son independientes de la presión, que todas las fugas latentes son dependientes de la presión.
 - Consumo mínimo nocturno de todos los abonados.

$$Q_{indep.}(t_{MNF}) = \Sigma Q_{fli} + \Sigma Q_{con}(t_{MNF})$$

Siendo:

$Q_{indep.}(t_{MNF})$: caudal independiente de la presión durante la hora de mínimo caudal nocturno;

ΣQ_{fli} : suma de las fugas latentes independientes de la presión; producidas en tuberías de distribución, acometidas y propiedades;

$\Sigma Q_{con}(t_{MNF})$: suma del consumo mínimo nocturno debido al uso residencias, no residencial y excepcional (entendiendo como tal aquel consumo producido por algunos usuarios, cuyo caudal unitario es superior a 500 l/h, y que por lo tanto debe ser evaluado de forma individual).

2. Obtener el componente dependiente de la presión (que en general será igual a las fugas, si se considera que todo el consumo es independiente de la presión) durante la misma hora como diferencia entre el caudal inyectado y el componente independiente de la presión.

$$Q_{dep.}(t_{MNF}) = Q(t_{MNF}) - Q_{indep.}(t_{MNF})$$

Siendo:

$Q_{dep.}(t_{MNF})$: caudal dependiente de la presión durante la hora de mínimo caudal nocturno;

$Q(t_{MNF})$: caudal total inyectado durante la hora de mínimo consumo nocturno.

3. Calcular los valores del componente dependiente de la presión para las restantes 23 horas del día, a partir de la expresión siguiente, considerando la presión existente en AZP.

$$Q_{dep.}(t) = Q_{dep.}(t_{MNF}) * \left[\frac{P_{AZP}(t)}{P_{AZP}(t_{MNF})} \right]^N$$

Siendo:

$Q_{dep.}(t)$: caudal dependiente de la presión durante la hora t ;

$P_{AZP}(t)$: presión en AZP durante la hora t ;

$P_{AZP}(t_{MNF})$: presión en AZP durante la hora de mínimo caudal nocturno.

4. Conocidos los caudales inyectados y dependientes de la presión durante cada hora, se determinan los respectivos caudales independientes de la presión

$$Q_{indep.}(t) = Q(t) - Q_{dep.}(t)$$

5. Se calculan los factores de fricción $K_{AZP}(t)$ y $K_{crit}(t)$ para cada hora del día, a partir de las expresiones (2) y (3), así como las presiones registradas en los puntos de entrada, AZP y crítico.

$$H_{L,AZP}(t) = P_{entrada}(t) + z_e - (P_{AZP}(t) + z_{AZP})$$

$$H_{L,crit}(t) = P_{entrada}(t) + z_e - (P_{crit.}(t) + z_{crit})$$

6. Teniendo en cuenta la presión mínima aceptable en la red, así como las presiones registradas en el punto crítico, se selecciona una presión de salida fija para la válvula reductora de presión situada a la entrada del sector, y se recalculan las presiones en AZP y punto crítico, así como los nuevos caudales dependientes de la presión. Estos cálculos suponen un proceso iterativo para cada hora, empleando las ecuaciones (2), (3) y (4), y para ello se comienza asumiendo que el descenso que experimenta la presión en AZP es igual al de la presión en la entrada.
7. Se comprueban las nuevas presiones obtenidas en el punto crítico, y se ajusta la presión a la salida de la VRP si es necesario.
8. Mediante diferencia entre el caudal inyectado originalmente, y el que se obtiene una vez colocada la VRP, se determina para cada hora el ahorro de agua que se ha conseguido al haber reducido la presión.
9. Se repiten los pasos 6, 7 y 8 para una VRP cuya presión de salida esté modulada en el tiempo.

7 *Obtención del ahorro obtenido por reducción de averías y reparaciones*

Una de las más importantes ventajas de la gestión de presiones es la reducción en la frecuencia de rotura de las tuberías. Sin embargo, los estudios y la bibliografía relacionada con este aspecto es todavía reducida.

Es probable que la rotura de una tubería ocurra cuando los esfuerzos generados por el medio ambiente y la operación del sistema actúan sobre las tuberías, cuya integridad estructural ha estado comprometida por, la picadura de la corrosión, la degradación, la fractura, el arrastre, el ablandamiento del material, la erosión producida por una cantidad significativa de fugas, una instalación inadecuada o por defectos de fabricación. Los tipos de rotura han sido clasificados (por O'Day y Col., 1986) en tres categorías: (1) la rotura circunferencial causada por tensiones longitudinales; (2) las roturas longitudinales causadas por tensiones transversales (esfuerzo anular); y (3) las generadas en la unión tipo "espiga-campana", causada por tensiones transversales en las juntas de las tuberías.

Esta clasificación puede complementarse por tipo adicional, como lo es la de los orificios debidos a la corrosión.

Las roturas circunferenciales debidas a los esfuerzos longitudinales es típicamente el resultado de una o mas de las siguientes ocurrencias: (1) la contracción térmica, debido a una baja temperatura del agua en las tuberías y del medio que las recubre, actuando sobre una tubería restringida de movimiento; (2) el esfuerzo flector (fallo en viga) debido al movimiento diferencial del suelo (especialmente en terrenos arcillosos) o a los grandes vacíos en el lecho de la tubería como resultado de las fugas; (3) una zanja y ejecución del lecho inadecuados; y (4) la interferencia por parte de terceros (por ejemplo, roturas accidentales, etc.). La contribución de la presión interna en la tubería a la tensión longitudinal, aunque pequeña, puede aumentar el riesgo de las roturas circunferenciales cuando ocurre simultáneamente con uno o más de las otras fuentes de tensión.

Las roturas longitudinales debido a las tensiones transversales es típicamente el resultado de uno o más de los siguientes factores: (1) la tensión anular debido a la presión en la tubería; (2) la tensión anular debido a la carga de la cobertura de tierra; (3) la tensión anular debido a las cargas

vivas causadas por el tráfico; y (4) el aumento de las cargas anulares, debido a la humedad congelada expandida sobre el suelo, cuando se produce una penetración de las heladas.

Como hemos mencionado anteriormente, no hay muchos estudios relacionados con este tema. Lambert (2.001) y Trow (2.003) sugieren que el cambio en la frecuencia de rotura puede ser referido a una potencia del cambio de presión. Es decir:

$$B_1/B_0 = \left(P_1/P_0 \right)^{N_2}; \text{ donde}$$

B_1 es la frecuencia de rotura después de la gestión de presiones,

B_0 es la frecuencia de rotura antes de la gestión de presiones,

P_1 es la presión después de la gestión de presiones,

P_0 es la presión antes de la gestión de presiones,

N_2 es el exponente que hay que ajustar.

Estudios recientes en el Reino Unido (UKWIR, 2.003) concluyen que no hay una relación convincente entre frecuencias de rotura y presiones antes y después de la gestión de presiones; pero el mismo estudio revela que una relación basada en el cuadrado de la relación de presiones frente a la relación de roturas puede ser usada del lado de la seguridad, como el peor de la predicciones por efecto de la gestión de la presión, teniendo en cuenta que los resultados obtenidos deberían mejorarse, debido al efecto estabilizador de la gestión de presiones. Thornton y Lambert (2.005) sugieren que N_2 debe estar comprendido entre 0,5 y 6,5.

Hay que considerar dos aspectos en el ahorro por reducción de averías y reparaciones. Por una parte el derivado de los trabajos de localización de la fuga o avería, que se pueden estimar alrededor de unos 350 €/Ud. Por otra parte, los propios de la reparación de la avería, que como se puede comprender, puede variar bastante en función de las características de la tubería y del tipo de reparación que se tenga que hacer.

8 Rentabilidad

En los apartados anteriores hemos analizado las posibles soluciones para la regulación de la presión, cada una de las cuales debe adaptarse a las condiciones del sector en estudio, produciendo unos beneficios que deben ser estimados según los procedimientos mencionados. Asimismo, cada solución tendrá un coste, que debe ser comparado con el beneficio para determinar la viabilidad económica de la gestión de presiones en el sector y el sistema de control más efectivo. El análisis de rentabilidad también nos ofrece una prelación de actuaciones, al comparar todos los sectores desde un mismo punto de vista.

La comparación entre el coste y beneficio se puede realizar calculando una serie de ratios normalmente utilizados. Estos son:

- Valor Actual Neto (VAN): se llama Valor Actual Neto, o valor presente, de una cantidad “S” a percibir al cabo de “n” años, con una tasa de interés “i”, a la cantidad que, si se dispusiera de ella hoy, nos generaría al cabo de “n” años la cantidad “S”. Si lo reflejamos en una expresión matemática sería:

$$VAN = \frac{S}{(1+i)^n}$$

Lo habitual en un proyecto de este tipo es contar con un primer desembolso para el total de la inversión y, en periodos sucesivos tener unos flujos de caja (ingresos-gastos) que en general serán variables. Por lo tanto la expresión anterior para el cálculo del VAN, queda:

$$VAN = -I + \frac{FC_1}{(1+i)} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} = -I + \sum_{k=1}^n \frac{FC_k}{(1+i)^k}; \text{ donde:}$$

I es la inversión total, en la que hay que tener en cuenta los gastos de ingeniería actualizados,

FC_k es el flujo de caja en el periodo k,

i es la tasa de interés, y

n es el número de periodos (años).

Para aceptar un inversión deberá tener un VAN positivo, lo cual significa que la valoración de los flujos de caja, o cashflows, es superior al desembolso inicial de la misma. Entre dos proyectos será más rentable el que tenga un VAN superior.

- Tasa Interna de Retorno (TIR): la Tasa Interna de Retorno es el valor de la tasa de interés que hace nulo el Valor Actual Neto. Empleando la expresión anterior, se tiene:

$$0 = -I + \sum_{k=1}^n \frac{FC_k}{(1 + TIR)^k}$$

Esta tasa interna se puede interpretar como la tasa de interés que el proyecto de inversión es capaz de proporcionar y, por tanto, si es superior a la tasa de interés a la que la empresa puede obtener fondos, la inversión será en general deseable, siempre y cuando este incremento compense el grado de riesgo que la empresa asume al acometer el proyecto.

Entre dos proyectos comparables, siempre será más rentable el que tenga un TIR superior.

- Periodo de retorno (PAY-BACK): se define el Periodo de retorno como el plazo de tiempo que ha de transcurrir para que la inversión se recupere. Más concretamente es el número de periodos necesarios para que la diferencia entre el flujo de caja acumulado y la inversión del proyecto sea nula.

En este sentido un proyecto será tanto más rentable, cuanto menor sea su periodo de retorno.

En el ejemplo que se desarrolla a continuación, las hipótesis que se han tenido en cuenta son las siguientes:

- Coste del agua: 0,45 €/m³.
- Incremento de precios anuales: 4 %.
- Amortización: 15 años.
- Inversión: la determinada en los apartados “Costes de diseño”, y “Costes de Construcción”.
- Costes de mantenimiento y explotación: los obtenidos en los indicados anteriormente.

- Ingresos: los indicados en los apartados “Obtención del ahorro de agua” y “Obtención del ahorro obtenido por de averías y reparaciones”.
- Gastos generales: 1% de los ingresos.
- Interés: 4 %.

9 Aplicación práctica

Como aplicación práctica de lo anteriormente citado, se desarrolla un ejemplo. Los datos necesarios son los siguientes:

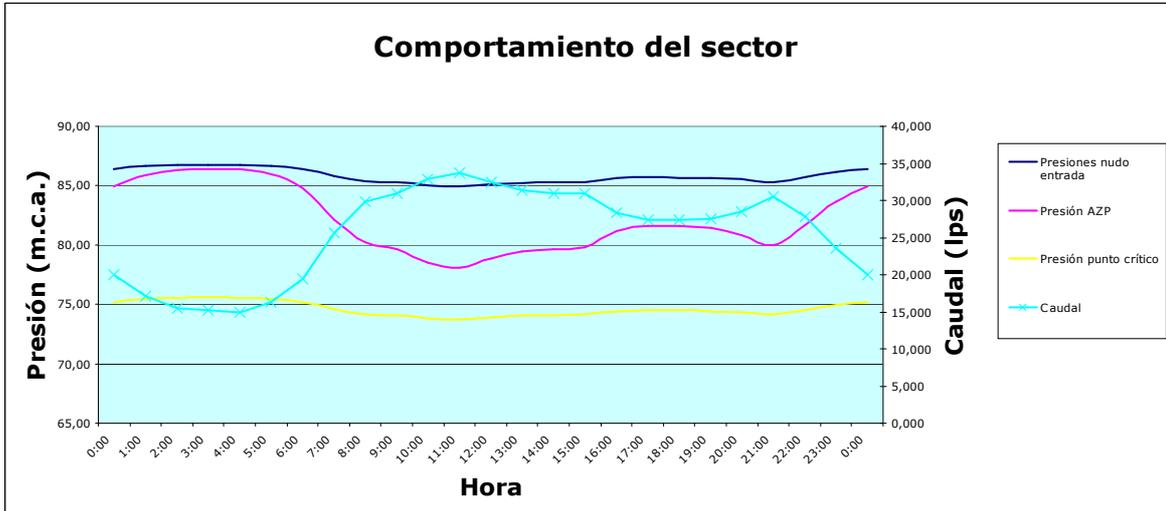
- Número de habitantes del sector: 23000.
- Longitud de las tuberías del sector: 25,0 km.
- Número de acometidas: 975.
- Cota en el punto de entrada (Z_e): 310,00.
- Cota en el punto promedio o AZP (Z_{AZP}): 307,80.
- Cota en el punto crítico (Z_c): 307,50.
- Presión mínima admisible en la red: 25 m.c.a
- Caudal esperado en fugas latentes en distribución (Q_{fld}): 40 l/km/h
- Caudal esperado en fugas latentes en acometidas (Q_{fla}): 2 l/acom./h

Por lo tanto:

El caudal de fugas latentes se estima en 2950 l/h; y el caudal mínimo nocturno en 13800 l/h.

En la figura nº3 se muestran las curvas de comportamiento del sector: caudal y presiones a la entrada, en el AZP, y en el punto crítico. Es importante señalar que el volumen entregado diario es de 2225700 litros.

Figura nº 3: Curvas de comportamiento del sector



10 Cálculos:

1. La componente del caudal independiente de la presión en el momento de mínimo consumo es: 16750,00 l/h.
2. La componente del caudal dependiente de la presión en el momento de mínimo consumo es: 37214,00 l/h.
3. Los valores del caudal dependiente de la presión en el resto del día son los que se muestran en la tabla nº 6.

Tabla nº 6. Caudales dependientes de la presión

Hora	$Q_{dep}(t)$
------	--------------

l/h

0:00 36589,676

1:00 36972,882

2:00 37162,332

3:00	37218,306
4:00	37214,000
5:00	37011,633
6:00	36503,563
7:00	35366,863
8:00	34557,395
9:00	34307,665
10:00	33816,818
11:00	33631,673
12:00	33941,683
13:00	34217,246
14:00	34303,360
15:00	34376,556
16:00	34940,600
17:00	35147,273
18:00	35125,745
19:00	35078,382
20:00	34815,736
21:00	34428,224
22:00	35164,496
23:00	36029,938

Total	847922,045
--------------	-------------------

4. Los caudales independientes de la presión durante el resto del día son los que se muestran en la tabla nº 7:

Tabla nº 7. Caudales independientes de la presión

Hora	Q_{indep}(t)
	l/h
0:00	35338,324
1:00	24767,118
2:00	18745,668
3:00	17357,694
4:00	16750,000
5:00	21488,367
6:00	33408,437
7:00	56865,137
8:00	73046,605
9:00	77076,335
10:00	84407,182
11:00	87688,327
12:00	83058,317
13:00	78642,754
14:00	77224,640
15:00	76935,444
16:00	67119,400
17:00	63276,727
18:00	63730,255
19:00	64209,618
20:00	67964,264



21:00 75335,776

22:00 64699,504

23:00 48642,062

Total 1377777,955

11 Soluciones:

- a. Válvula reductora con consigna fija de salida a 36 m.c.a. Los resultados se muestran en la tabla nº 8.

Tabla nº 8. Solución con VRP con consigna fija

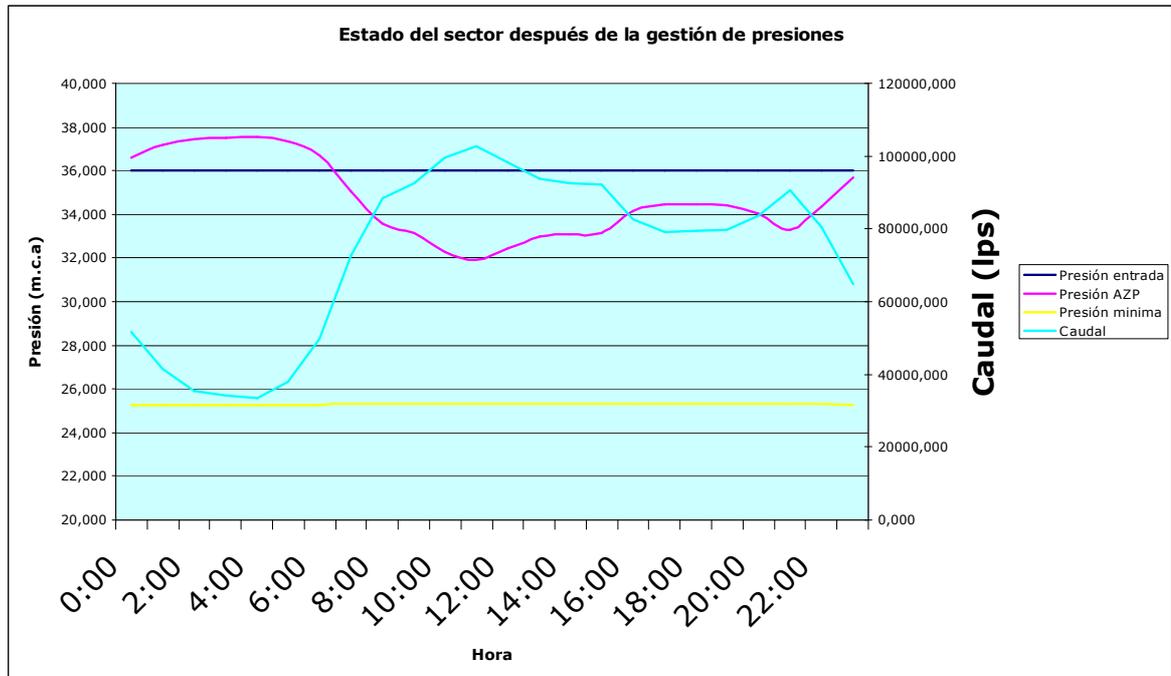
Hora	Q _{dep} (t)	Q _{indep} (t)	Q(t)	H _{L,AZP} (t)	P _{entrada} (t)	P _{AZP} (t)	H _{L,crit} (t)	P _{crit} (t)
	l/h	l/h	l/h	m	m	m	m	m
0:00	16396,5608	35338,324	51734,885	1,590	36,000	36,610	13,214	25,286
1:00	16568,2829	24767,118	41335,401	1,015	36,000	37,185	13,217	25,283
2:00	16653,1792	18745,668	35398,847	0,744	36,000	37,456	13,219	25,281
3:00	16678,2621	17357,694	34035,956	0,688	36,000	37,512	13,220	25,280
4:00	16676,3327	16750,000	33426,333	0,664	36,000	37,536	13,220	25,280
5:00	16585,648	21488,367	38074,015	0,861	36,000	37,339	13,218	25,282
6:00	16357,9716	33408,437	49766,409	1,471	36,000	36,729	13,214	25,286
7:00	15848,5939	56865,137	72713,731	3,141	36,000	35,059	13,204	25,296
8:00	15485,8552	73046,605	88532,460	4,657	36,000	33,543	13,194	25,306
9:00	15373,9464	77076,335	92450,281	5,078	36,000	33,122	13,191	25,309
10:00	15153,9878	84407,182	99561,170	5,889	36,000	32,311	13,186	25,314
11:00	15071,021	87688,327	102759,348	6,274	36,000	31,926	13,183	25,317



12:00	15209,9422	83058,317	98268,260	5,737	36,000	32,463	13,187	25,313
13:00	15333,4277	78642,754	93976,182	5,247	36,000	32,953	13,190	25,310
14:00	15372,017	77224,640	92596,657	5,094	36,000	33,106	13,191	25,309
15:00	15404,8178	76935,444	92340,262	5,066	36,000	33,134	13,191	25,309
16:00	15657,5772	67119,400	82776,977	4,071	36,000	34,129	13,198	25,302
17:00	15750,1913	63276,727	79026,918	3,711	36,000	34,489	13,200	25,300
18:00	15740,544	63730,255	79470,799	3,752	36,000	34,448	13,200	25,300
19:00	15719,32	64209,618	79928,938	3,796	36,000	34,404	13,199	25,301
20:00	15601,6228	67964,264	83565,887	4,149	36,000	34,051	13,197	25,303
21:00	15427,9713	75335,776	90763,747	4,895	36,000	33,305	13,192	25,308
22:00	15757,9092	64699,504	80457,413	3,846	36,000	34,354	13,199	25,301
23:00	16145,7309	48642,062	64787,793	2,494	36,000	35,706	13,208	25,292
Total	379970,713	1377777,955	1757748,668					

En la figura nº 4, se puede ver el comportamiento del sector una vez realizada la gestión de presiones.

Figura nº 4: Curvas de comportamiento del sector. Solución a)



b. Válvula reductora de presión con la siguiente consigna en función del caudal:

- Caudales mayores de 20 l/s, las presiones se reducen a 36 m.c.a.
- Caudales inferiores a 20 l/s, las presiones se reducen según la fórmula: $p=0,13 q + 34,6$

Los resultados se muestran en la tabla nº 9:

Tabla nº 9. Solución con VRP con consigna en función del caudal

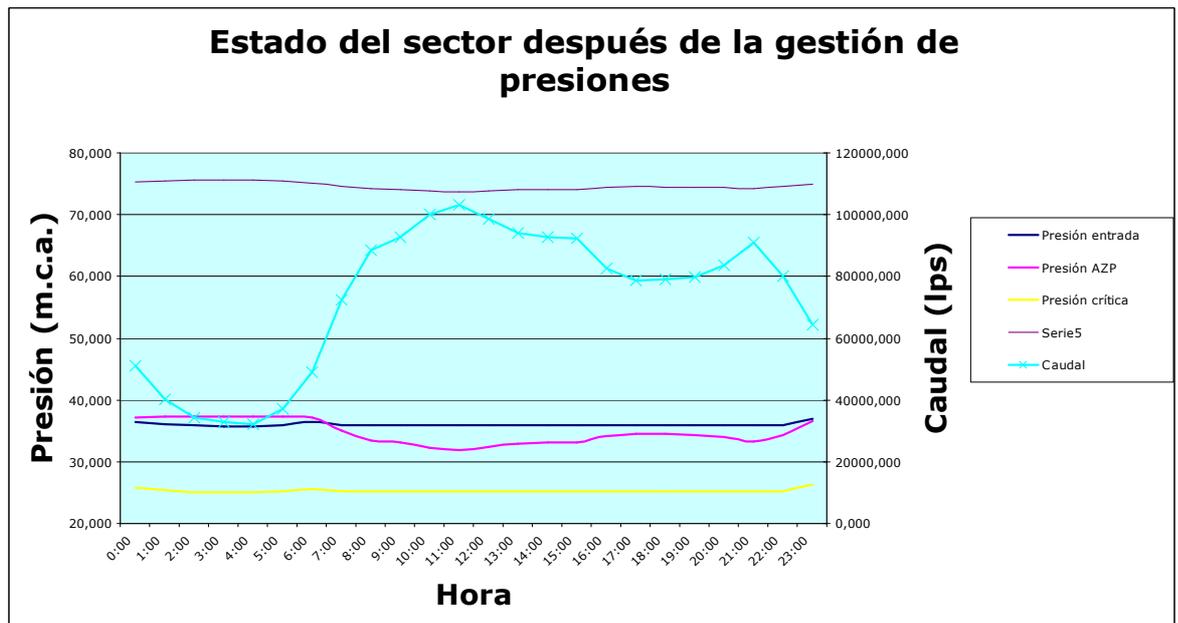
Hora	$Q_{dep}(t)$	$Q_{indep}(t)$	$Q(t)$	$Q(t)$	$P_{entrada}(t)$	$H_{L,AZP}(t)$	$P_{AZP}(t)$	$H_{L,crit}(t)$	$P_{crit}(t)$
	l/h	l/h	l/h	l/s	m	m	m	m	m
0:00	15685,694	35338,324	51024,018	14,173	36,443	1,547	37,096	13,214	25,729
1:00	15518,479	24767,118	40285,597	11,190	36,055	0,964	37,291	13,218	25,337



2:00	15423,241	18745,668	34168,910	9,491	35,834	0,694	37,340	13,219	25,114
3:00	15401,284	17357,694	32758,979	9,100	35,783	0,638	37,345	13,220	25,063
4:00	15391,681	16750,000	32141,681	8,928	35,761	0,614	37,347	13,220	25,041
5:00	15466,643	21488,367	36955,010	10,265	35,934	0,811	37,323	13,219	25,216
6:00	15655,220	33408,437	49063,658	13,629	36,372	1,430	37,142	13,215	25,657
7:00	15500,451	56865,137	72365,588	20,102	36,000	3,111	35,089	13,204	25,296
8:00	15500,451	73046,605	88547,056	24,596	36,000	4,658	33,542	13,194	25,306
9:00	15500,451	77076,335	92576,786	25,716	36,000	5,092	33,108	13,191	25,309
10:00	15500,451	84407,182	99907,633	27,752	36,000	5,930	32,270	13,185	25,315
11:00	15500,451	87688,327	103188,778	28,664	36,000	6,326	31,874	13,183	25,317
12:00	15500,451	83058,317	98558,769	27,377	36,000	5,771	32,429	13,187	25,313
13:00	15500,451	78642,754	94143,205	26,151	36,000	5,266	32,934	13,190	25,310
14:00	15500,451	77224,640	92725,092	25,757	36,000	5,108	33,092	13,191	25,309
15:00	15500,451	76935,444	92435,895	25,677	36,000	5,077	33,123	13,191	25,309
16:00	15500,451	67119,400	82619,851	22,950	36,000	4,056	34,144	13,198	25,302
17:00	15500,451	63276,727	78777,178	21,883	36,000	3,687	34,513	13,200	25,300
18:00	15500,451	63730,255	79230,706	22,009	36,000	3,730	34,470	13,200	25,300
19:00	15500,451	64209,618	79710,069	22,142	36,000	3,775	34,425	13,199	25,301
20:00	15500,451	67964,264	83464,715	23,185	36,000	4,139	34,061	13,197	25,303
21:00	15500,451	75335,776	90836,227	25,232	36,000	4,902	33,298	13,192	25,308
22:00	15500,451	64699,504	80199,955	22,278	36,000	3,822	34,378	13,199	25,301
23:00	15896,159	48642,062	64538,221	17,927	36,931	2,475	36,656	13,208	26,223
Total	372445,622	1377777,955	1750223,577						

En la figura nº 5, se puede ver el comportamiento del sector una vez realizada la gestión de presiones.

Figura nº 5: Curvas de comportamiento del sector. Solución b)



12 Rentabilidad:

La comparación de los principales valores económicos y rentables para cada una de las soluciones se muestra en la tabla nº 10:

Tabla nº 10. Comparación de soluciones

	Solución a	Solución b
Ahorro de agua (l)	467951	475476
Ahorro en reparaciones (€/año)	1500,00	1500,00
Costes de ingeniería (€)	5000	5000
Costes de construcción (€)	61000	72500
Gastos de explotación (€/año)	4920	6540
T.I.R (%)	63,92	51,74
VAN (€)	1832572	1743022
B/C	5,05	4,02
PAY-BACK (años)	3	3

Se puede observar la enorme rentabilidad que presenta, en este ejemplo, la implantación de un sistema de gestión de presiones. En el mismo, la solución óptima consistiría en la colocación de una Válvula Reductora de Presión a consigna fija de 36 m.c.a. a la entrada del sector.

13 Referencias

- RS Mckenzie, H Mostert and T de Jager. Leakage Reduction through Pressure Management in Khayelitsha: two yeas down the line. 2004
- A.O. Lambert, Timothy G. Brown, M. Takizawa, D. Weimer. A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems. 2000
- Ronnie Mckenzie. Pressure Management Program. 2001
- Vicente García Carrasco, Jorge García-Serra García. Control y Reducción de Fugas mediante la Sectorización y la Gestión de Presiones.