

¿A QUE NIVEL SE PUEDEN REDUCIR LAS PERDIDAS REALES DE AGUA A TRAVES DE LA GESTION DE PRESION?

Mauro Raúl Iriart¹, Ignacio Peña²

JOAT Group – Durban, Sudáfrica

Postnet Suite 23, Private Bag X4, KLOOF, 3640 (Sudáfrica); Tel: +27(0)317009853

¹mauroraul.iriart@polito.it; ²ignacio.pena@joat.co.za

En todo sistema presurizado de abastecimiento de agua las pérdidas reales son aquellos volúmenes de agua perdidos dentro de un determinado período de tiempo a través de todo tipo de fugas, roturas y reboses de tanques de almacenamiento. Estas pérdidas se ubican en líneas principales, secundarias, reservorios, tanques, y conexiones a los usuarios; siempre antes de los medidores de las conexiones de servicio. La magnitud del flujo en cada pérdida es directamente proporcional a la presión de agua en el sistema, lo cual hace necesario realizar una correcta gestión de la presión para minimizar dichas pérdidas. Esto comprende la regulación de la presión del agua a un nivel óptimo de servicio de manera que asegure un suministro suficiente y eficiente a través del tiempo, a la vez que se reduzcan las presiones excesivas innecesarias y se eliminen las fluctuaciones de presiones fuertes y transitorias.

El objetivo de este artículo es facilitar el entendimiento de la estimación de las pérdidas reales de un sistema así como la evaluación técnica de los posibles ahorros de agua a través de la regulación de la presión. Para esto se analizan diferentes Sectores de Gestión de Presión (SGP) implementados en la provincia de KwaZulu Natal en Sudáfrica; en los que se realizó exitosamente una correcta gestión de la presión y reducción de pérdidas reales. Se estudian casos con diversas Densidades de Conexiones (Dc), Longitud de la Red (Lr), Presión Promedio (PP), Factor Día Noche (FDN), entre otras variables. Todo el análisis se realiza utilizando los Indicadores de Desempeño Técnico recomendados por la Asociación Internacional del Agua (IWA por sus siglas en inglés), de manera que sea aplicable a cualquier sistema de agua potable. Con toda la información obtenida se logra obtener nuevas fórmulas que relacionan las pérdidas reales a cuatro variables: Dc, Lr, PP y FDN.

Palabras clave: Gestión de Presión, Fugas, Perdidas Reales, Válvula Reductora de Presión.

INTRODUCCION

Las pérdidas de agua ocurren en todas las redes de distribución de agua pero por razones técnicas y económicas es imposible eliminarlas completamente. Sin embargo durante los últimos años se ha avanzado mucho tanto en el conocimiento como en la tecnología, de manera que es posible reducirlas dentro de ciertos límites económicos. Según la Asociación Internacional de Agua (IWA) existen cuatro actividades básicas que ayudan a reducir las pérdidas reales de agua (ver Figura 1): a) Control Activo de Fugas, b) Reemplazo de Infraestructura, c) Velocidad y calidad de reparación de fugas, d) Gestión de presión.

Durante los últimos años se han estado aplicando estos métodos en muchos sistemas, obteniéndose resultados significativos. Uno de los países que con más énfasis se ha avocado a la reducción de las pérdidas reales es Sudáfrica, principalmente a través de la gestión de la presión en sus sistemas de distribución. Este documento pretende presentar los resultados obtenidos en distintas redes de la provincia de KwaZulu Natal en Sudáfrica durante los últimos dos años, en los que se ha reducido la presión a través de la instalación de Válvulas Reductoras de Presión (VRP) y controladores avanzados o inteligentes de presión. Finalmente se presentara una nueva teoría y fórmulas basadas en los resultados obtenidos.



Figura 1 - Los cuatro métodos principales de intervención para la reducción de pérdidas reales de agua, según la IWA.

PERDIDAS REALES

El volumen de pérdidas reales está constituido de todo el agua que ingresa en el sistema y que no es consumida por los usuarios, ya que se ha perdido en el proceso de distribución. Según su ubicación se pueden clasificar en tres categorías: fugas y reboses en tanques de almacenamiento, fugas en conexiones de servicio, o fugas en las cañerías de distribución. Todas estas pérdidas ocurren antes de los medidores pertenecientes a las conexiones de servicio (Ziegler, et al; 2011). Es importante destacar que las pérdidas que ocurren dentro de las instalaciones de los consumidores, tengan o no medidor domiciliario, no forman parte de las pérdidas reales.

El rango de caudales debido a fugas puede variar desde 10 l/h debido a una fuga en una válvula de la red, hasta caudales mayores a 10.000 l/h debido a una rotura en una cañería principal. Las de mayor caudal generalmente son las fugas visibles (>500 l/h), las cuales afloran a la superficie por lo cual no necesitan ninguna técnica especial para su detección y pueden ser reportadas fácilmente (ver Figura 2). También existen las fugas no visibles las cuales suelen tener un caudal menor a las visibles (entre 250 y 500 l/h), y por no ser visibles requieren de técnicas especiales para su detección. De esta manera las fugas no visibles no son reportadas por lo que pueden perdurar por largo tiempo en la red. Finalmente tenemos las fugas de fondo que están compuestas por fugas muy pequeñas (<250l/h). Este tipo de fugas es no visible por lo que no es reportada, siendo incluso muy difícil de detectar usando métodos acústicos. (Thornton, et al; 2008).

Una fuga reportada de 5000 l/h (por ejemplo una rotura de una cañería) que es reparada 1 día después de haber aparecido produce una pérdida de 120 m³. En cambio una fuga de fondo de 28 l/h que permanece en el sistema por una año pierde un volumen total de 240 m³, el doble del volumen perdido por la fuga reportada. Generalmente el volumen de agua perdido a través de las fugas de fondo es mayor al volumen perdido por los demás tipos de fuga, debido a que son más numerosas y no se aplican métodos para combatirlas. Si bien son muy difíciles de detectar, se puede reducir el volumen perdido aplicando una correcta gestión de presión de la red.

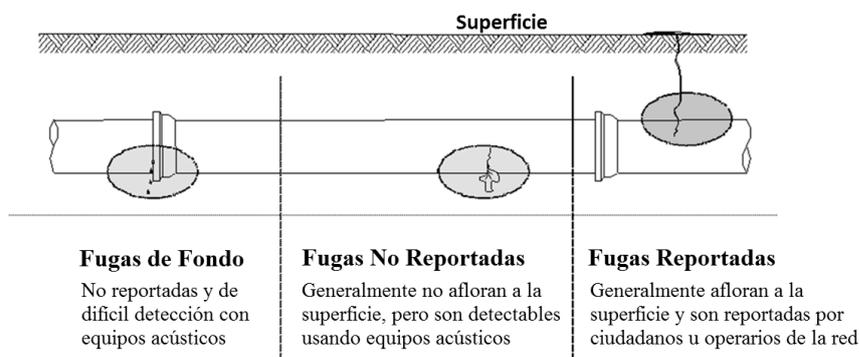


Figura 2 - Clasificación de fugas (Thornton, et al; 2008)

Relación entre presión y pérdidas reales

Diversos ensayos de laboratorio así como información de ensayos de campo sugieren que las pérdidas por fugas (F) son proporcionales a la presión de la red (P) y esta proporción es regida por una función de tipo potencial:

$$F \text{ varia con } P^{N1} \quad [1]$$

Donde N1 es el exponente FAVAD N1 (Fixed and Variable Area Discharges, este concepto fue propuesto por John May en 1994), el cual puede variar entre 0,5 y 2,5 según las características del tipo de perdidas y también de la flexibilidad o rigidez del material de la cañería. Entonces si reducimos la presión promedio de Pa a Pd, el caudal perdido a través de las fugas cambiara de Fa a Fd y la magnitud de dicho cambio dependerá del exponente N1 (ver figura 3):

$$\frac{Fd}{Fa} = \left(\frac{Pd}{Pa}\right)^{N1} \quad [2]$$

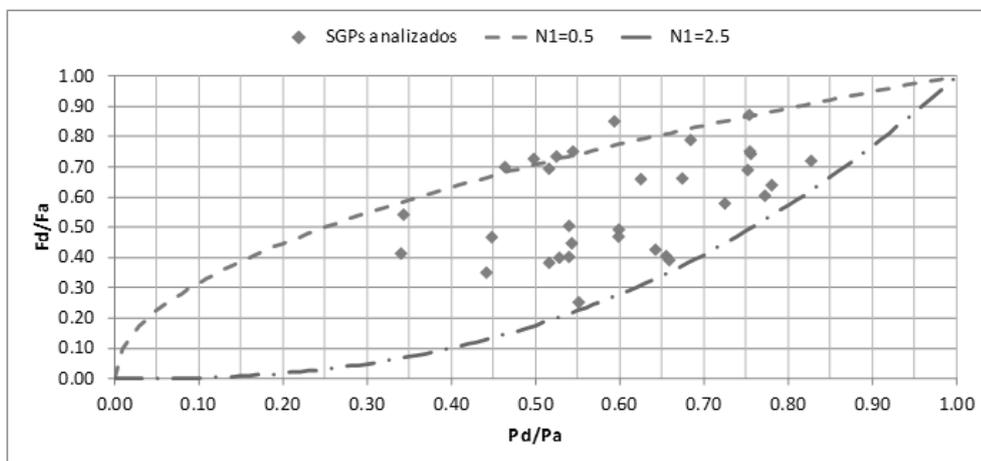


Figura 3 - Relación entre cambios de presión y caudal de fugas, basado en la tradicional "Ley Potencial" para N1=0.5 y N1=2.5. Los puntos representan los valores obtenidos en los sistemas analizados en este artículo.

Gestión de presión

Una correcta gestión de presión con el objetivo de reducir las pérdidas debido a fugas se puede definir como:

“la correcta práctica de regular las presiones de la red hasta niveles óptimos que aseguren un suministro eficiente a los usuarios cumpliendo con los estándares de caudal y presión de dicha red; además de eliminar por completo todo tipo de cambio brusco de presiones (Thornton, 2005)”

Cuando se regula la presión en una porción de la red, se la denomina Sector de Gestión de Presión (SGP). Un SGP debe ser discreto, es decir estar separado del resto de la red mediante válvulas de aislamiento o desconectando permanentemente las conexiones a otros puntos de la red. Generalmente tiene solo un punto de ingreso en el cual se instala una válvula reductora de presión (VRP) como la que se muestra en la Figura 4, un sensor de presión aguas arriba (P1), un sensor de presión aguas abajo (P2), y un medidor de caudal (Q).

Todo SGP tiene un punto crítico, el cual es el punto de presión más baja (PCP) y puede estar en cualquier parte del SGP, dependiendo de las características particulares de la red tales como topografía, configuración de la red, etc. Así como tendremos parte de la red con presiones bajas, tendremos otra con presiones altas, es por eso que para el análisis y comparación de resultados se usa la presión operativa promedio (PP) del SGP que se encuentra en el punto promedio de la zona (PPZ) alimentada por la VRP.



Figura 4 - Válvula Reductora de Presión (VRP) instalada por JOAT Group en Durban, Sudáfrica. A la izquierda se ve la instalación finalizada de la VRP. A la derecha se muestra el piloto con una configuración de salida fija.

PERDIDAS REALES INEVITABLES

Los expertos en la materia han reconocido que las pérdidas de agua en redes de agua son imposibles de eliminar. No obstante, existe un nivel mínimo al que se puede arribar realizando una correcta gestión de la red. El grupo de trabajo “Water Loss Task Force” perteneciente a la IWA, presentó en 1999 un concepto para estimar las pérdidas reales inevitables. Este método estima las Pérdidas Reales Inevitables (PRI) como la sumatoria de tres componentes: Fugas de Fondo Inevitables (FFI), Fugas No Reportadas Inevitables (FNRI) y Fugas Reportadas Inevitables (FRI).

A su vez, cada una de las tres componentes es dividida en tres categorías correspondientes a la localización de la fuga en la red: a) en cañerías principales, b) entre las cañerías principales y las llaves de paso de las conexiones de servicio, c) entre las llaves de paso y los medidores de las

conexiones de servicio. El ultimo término se cancela cuando los medidores no se encuentran dentro de la propiedad privada, sino junto a la llave de paso. Los parámetros para cada componente fueron obtenidos de diferentes ensayos realizados en redes de diversos países, y se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 – Pérdidas Reales Inevitables (PRI) estimadas para presiones de 50m (Lambert, et al; 2009).

<i>Parte de la red</i>	<i>Fugas de Fondo Inevitables (FFI)</i>	<i>Fugas No Reportadas Inevitables (FNRI)</i>	<i>Fugas Reportadas Inevitables (FRI)</i>
<i>Cañerías principales</i>	480 litros/(km.día)	290 litros/(km.día)	130 litros/(km.día)
<i>Conexiones de Servicio, cañería hasta llave de paso</i>	30 litros/(conn.día)	2 litros/(conn.día)	8 litros/(conn.día)
<i>Conexiones de servicio, llave de paso hasta medidor</i>	800 litros/(km.día)	95 litros/(km.día)	355 litros/(km.día)
<i>Valor FAVAD N1 promedio</i>	Cercano a 1.5	0.5 a 2.5, dependiendo en los materiales de las cañerías y tipos de fugas	

Los SGP's analizados en este artículo tienen la característica de que los medidores no se encuentran en la propiedad privada, de manera que no se considerará el ultimo termino. Por consiguiente tendremos las siguientes ecuaciones para cada componente:

$$FFI \left[\frac{\text{litros}}{\text{día}} \right] = (480. Lr + 30. Nc) \cdot \left(\frac{PP}{50} \right)^{N1} \quad [3]$$

$$FNRI \left[\frac{\text{litros}}{\text{día}} \right] = (290. Lr + 2. Nc) \cdot \left(\frac{PP}{50} \right)^{N1} \quad [4]$$

$$FRI \left[\frac{\text{litros}}{\text{día}} \right] = (130. Lr + 8. Nc) \cdot \left(\frac{PP}{50} \right)^{N1} \quad [5]$$

Estas fórmulas deben ser corregidas por un coeficiente que depende del valor FAVAD N1 y de la presión promedio de la red (Thornton, et al; 2005); ya que el volumen calculado es mayor al real cuando $PP < 50m$ mientras que es menor cuando $PP > 50m$, siendo este efecto mayor cuanto más flexible es el sistema (FAVAD N1 mayor). PRI calculado como la sumatoria de las fórmulas [3] [4] y [5] estima las pérdidas reales inevitables diarias, aunque es importante notar que estas fórmulas son aplicables cuando se realiza un balance anual de agua. Por otro lado, cuando se analiza la performance de la red usando el Caudal Mínimo Nocturno (CMN) solo se consideran las FFI (Lambert; 2009) como se indica a continuación:

$$FFI \left[\frac{\text{litros}}{\text{hora}} \right] = (20. Lr + 1,25. Nc) \cdot \left(\frac{PNP}{50} \right)^{N1} \quad [6]$$

PERDIDAS REALES DIARIAS

Para analizar las pérdidas reales se utilizo el método del Caudal Mínimo Nocturno (CMN). El CMN está compuesto por dos variables: el Consumo Nocturno (CN) y las Fugas Nocturnas (FN), cada una de las cuales está compuesta por otras variables (ver Tabla 2). CN es el volumen de agua que pasa a través de los medidores de las conexiones de servicio. Parte de dicho volumen son las fugas que se encuentran en las propiedades privadas, pero por ubicarse aguas debajo de los medidores se las considera parte del consumo de la red. Usualmente se suele tomar una muestra de medidores residenciales y no residenciales, y se efectúan lecturas durante diversos periodos nocturnos; obteniéndose así valores promedios de CN por propiedad, por conexión o por persona. En cambio el volumen de FN se obtiene como la diferencia de CMN y CN.

Tabla 2 – Componentes del Caudal Mínimo Nocturno (Fantozzi, et al; 2012).

<i>Caudal Mínimo Nocturno (CMN)</i>	<i>Consumo Nocturno (CN)</i>	<i>Uso Nocturno (UN)</i>	<i>Uso Nocturno Excepcional (UNE)</i>	
			<i>Uso Nocturno Residencial (UNR)</i>	
			<i>Uso Nocturno No Residencial (UNNR)</i>	
	<i>Fugas Nocturnas (FN)</i>	<i>Fugas Nocturnas de Consumidores (FNC)</i>	<i>Fugas (F)</i>	<i>Dentro de Edificios (FNCD)</i>
				<i>Fuera de Edificios (FNCF)</i>
		<i>Fugas de Fondo (FF)</i>	<i>Fugas (F)</i>	<i>Fugas No Reportadas (FNR)</i>
				<i>Fugas Reportadas (FR) aun no reparadas</i>
				<i>En Conexiones de Servicio (FFC)</i>
			<i>En la Red (FFR)</i>	

Este volumen FN es proporcional a la presión de la red, de manera que disminuirá o se incrementará durante el resto del día, dependiendo en las fluctuaciones de presión que existan en la red. El tipo de material de las cañerías así como también el tipo de fugas, impactaran en la variación de FN con respecto a la variación de presión; todo esto está considerado en el valor FAVAD N1. Para considerar las fluctuaciones diarias de presión se utiliza el Factor Día Noche (FDN) que se presenta a continuación:

$$FDN \left[\frac{\text{horas}}{\text{día}} \right] = \sum_{i=0}^{24} \left(\frac{PP_i}{PPN} \right)^{N1} \quad [7]$$

Donde PP_i es la Presión Promedio del SGP a la hora “i”, PPN es la Presión Promedio Nocturna del SGP y N1 es el valor FAVAD N1. Una vez obtenido FDN, se puede estimar el volumen diario de Pérdidas Reales (PR) por día:

$$PR \left[\frac{\text{litros}}{\text{día}} \right] = FN \cdot FDN \quad [8]$$

Dividiendo PR por la Longitud de la Red (Lr) o por el Numero de Conexiones de Servicio (Nc) se logra el volumen promedio por km de cañería (PR_L) o por conexión (PR_C). Ambos parámetros sirven como índices para comparar performances de diferentes redes. Las fórmulas son:

$$PR_L \left[\frac{\text{litros}}{\text{km.día}} \right] = \frac{PR}{Lr} \quad [9]$$

$$PR_C \left[\frac{\text{litros}}{\text{con.día}} \right] = \frac{PR}{Nc} \quad [10]$$

Parte del volumen de fugas es inevitable tal como se indicó en la sección anterior, la diferencia y el cociente entre PR y PRI son dos índices de performance muy conocidos y utilizados mundialmente. La diferencia es denominada Potencial de Reducción de Pérdidas Reales (PRPR), en cambio al cociente se lo conoce como Índice de Fugas Estructurales. Otro índice de performance que se usará en este artículo es el cociente entre FN y FFI que se denominará I_A . Las fórmulas de estos tres índices de performance se presentan debajo:

$$PRPR \left[\frac{\text{litros}}{\text{con.día}} \right] = PR - PRI \quad [11]$$

$$IFE = \frac{PR}{PRI} \quad [12]$$

$$I_A = \frac{FN}{FFI} \quad [13]$$

RESULTADOS

A continuación se hará mención de resultados obtenidos en diversos SGP's creados en diversas redes de agua potable de la provincia de KwaZulu Natal, Sudáfrica. Todos ellos fueron implementados durante los años 2011 y 2012 en el programa de reducción del Agua No Facturada de la municipalidad de eThekweni (Durban), llevado a cabo por la empresa JOAT Group. La mayoría de las redes están constituidas por cañerías de diversos materiales plásticos. La Tabla 3 presenta algunos valores de las principales características de los SGP's analizados.

Tabla 3 - Características generales de los Sectores de Gestión de Presión analizados.

	Lr [km]	Nc [con]	Dc [con/km]	PP antes [m]	PP después [m]	N1 [-]	IFE [-]
Mínimo	0.5	40	22	43	27	0.31	2.0
Máximo	30.7	1079	124	121	75	2.54	26.9
Promedio	5.3	265	58	83	54	1.30	8.5

Previamente se mencionó la proporcionalidad que liga la presión al volumen de fugas para cualquier sistema de distribución de agua potable. La Figura 5 presenta los volúmenes de PR y PRI en litros diarios por conexión (escala logarítmica), respecto a la Presión Promedio Nocturna registrada en cada SGP. Se observa que PR se incrementa a medida que aumenta la presión de la red, así como también se incrementa PRI.

La reducción y regulación de presión se llevó a cabo a través de la instalación de VRPs. La mayoría de ellas fueron configuradas para suministrar una presión constante aguas abajo. En la Figura 6 se presenta un ejemplo en el que se ven las variaciones de presión antes y después de la puesta en marcha de la VRP en tres puntos diferentes de la red: aguas arriba de la VRP (P1), aguas debajo de la VRP (P2) y en el punto crítico del SGP (PCP). Tres aspectos son de remarcar: a) la regulación de presión aguas debajo de la VRP, se puede ver claramente que la presión permanece constante a pesar de las variaciones de flujo de ingreso al SGP; b) el incremento de presión aguas arriba de la VRP, esto se debe a la reducción de pérdida de carga aguas arriba de la VRP lo cual es producto de la reducción de flujo de ingreso al SGP; c) la reducción de fluctuaciones de la presión en el punto crítico debido a la reducción de pérdida de carga en el SGP como consecuencia de la reducción de caudales fluyendo por la red del SGP.

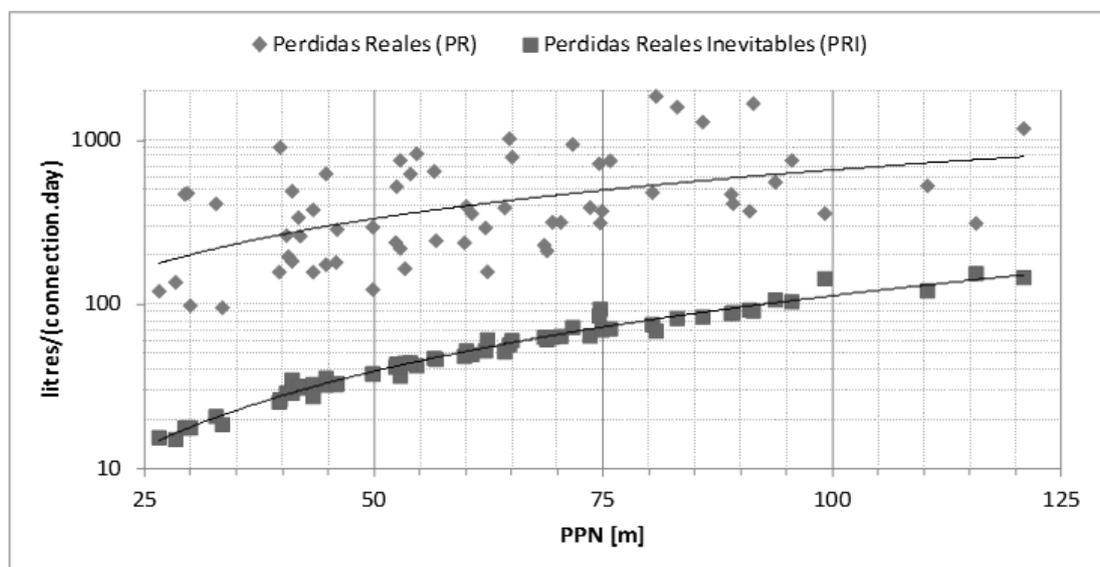


Figura 5 - Valores de Pérdidas Reales por conexión por día (PR) y Pérdidas Reales Inevitables (PRI) respecto a la Presión Promedio Nocturna (PPN), medidos en los sectores de gestión de presión evaluados.

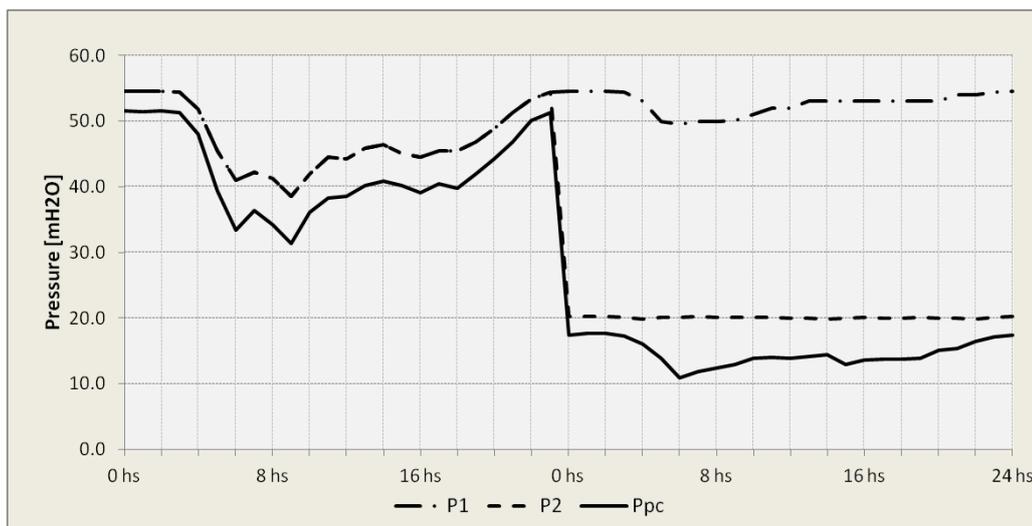


Figura 6 - Valores de presión antes y después de la reducción de presión en el SGP “KWD3-3”. La línea sólida representa la presión en el punto crítico (PPC), la línea de guiones la presión aguas debajo de la VRP (P2) y la línea de guiones largos y punto la presión aguas arriba de la VRP (P1).

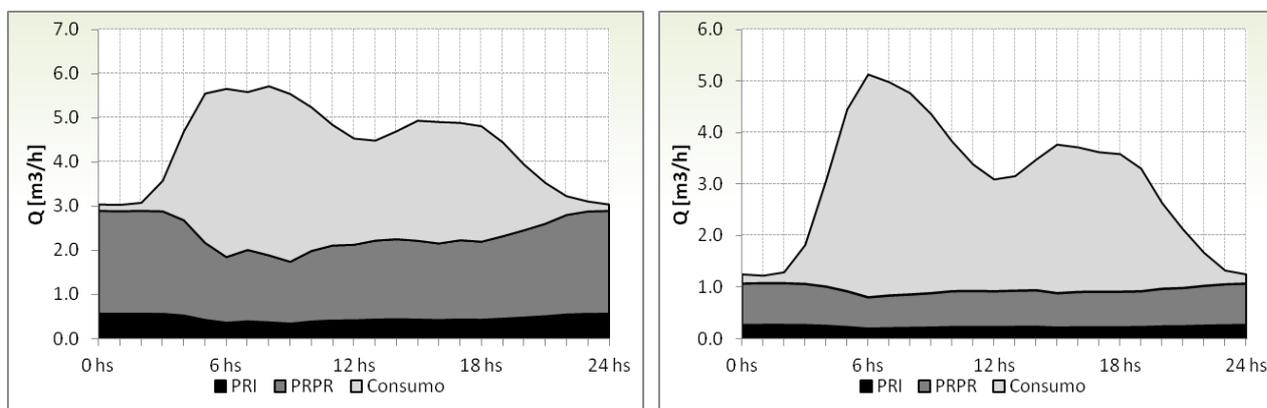


Figura 7 - Caudal de ingreso al SGP “KWD3-3” separado en sus tres componentes: Consumo, Potencial de Reducción de Pérdidas Reales (PRPR) y Pérdidas Reales Inevitables (PRI). El gráfico de la izquierda presenta la situación antes de la gestión de presión, mientras que el gráfico de la derecha presenta la situación luego de puesta en marcha la VRP.

Esta reducción de presión aplicada en el SGP provocó reducciones de las pérdidas reales como se aprecia en la Figura 7. El caudal de ingreso está dividido en tres componentes: Consumo, PRI y PRPR. Los volúmenes de agua correspondientes a PRI y PRPR son proporcionales a la presión operativa promedio, por lo que la reducción de la presión genera una reducción de dichos volúmenes. Además de la reducción se nota una estabilización de dichos caudales debido a la estabilización de la presión en la red. Por lo contrario el consumo no se vio afectado por la reducción de presión.

La tabla 4 presenta una síntesis de los resultados promedios obtenidos en los SGPs evaluados. En cada SGP que se instaló una VRP y se disminuyó la presión, se logró reducir los volúmenes de pérdidas reales un promedio de unos 319 litros diarios por conexión, mientras que la presión se redujo un promedio de 29 m. Por otro lado FDN incrementó un promedio de 0,5 horas, lo que significa una reducción de fluctuación de presiones.

Tabla 4 - Síntesis de los resultados obtenidos

	FDN [horas]	PPN [m]	PR [l/(con.dia)]
Antes	22.7	82.9	756
Después	23.2	53.9	437

Por ser PR proporcional a la presión operativa de la red, obviamente cuanto mayor sea la reducción de la presión, mayor será la reducción de PR y el ahorro de agua. La Figura 8 muestra el cociente entre Ahorros de Agua (AA) y PRPR respecto al porcentaje de reducción de presión operativa promedio para cada SGP. Los valores obtenidos han sido separados en tres categorías de acuerdo al valor FAVAD N1 de cada SGP: a) $N1 < 0,75$ b) $0,75 < N1 < 1,50$ c) $1,50 < N1 < 2,50$. Para un determinado porcentaje de reducción de presión en un SGP, mayor será el cociente entre AA y PRPR cuanto más grande sea el valor N1 del SGP. Una línea de tendencia se trazo para cada grupo y sus valores son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5 – Componentes del Caudal Mínimo Nocturno (CMN)

% de Reducción de PPN	Ahorros de agua expresados como % del Potencial Recuperable de Pérdidas Reales		
	$N1 < 0,75$	$0,75 < N1 < 1,50$	$1,50 < N1 < 2,50$
0%	0%	0%	0%
10%	4%	15%	23%
20%	9%	29%	43%
30%	16%	41%	59%
40%	25%	51%	72%
50%	35%	61%	81%
60%	46%	68%	87%
70%	59%	75%	89%

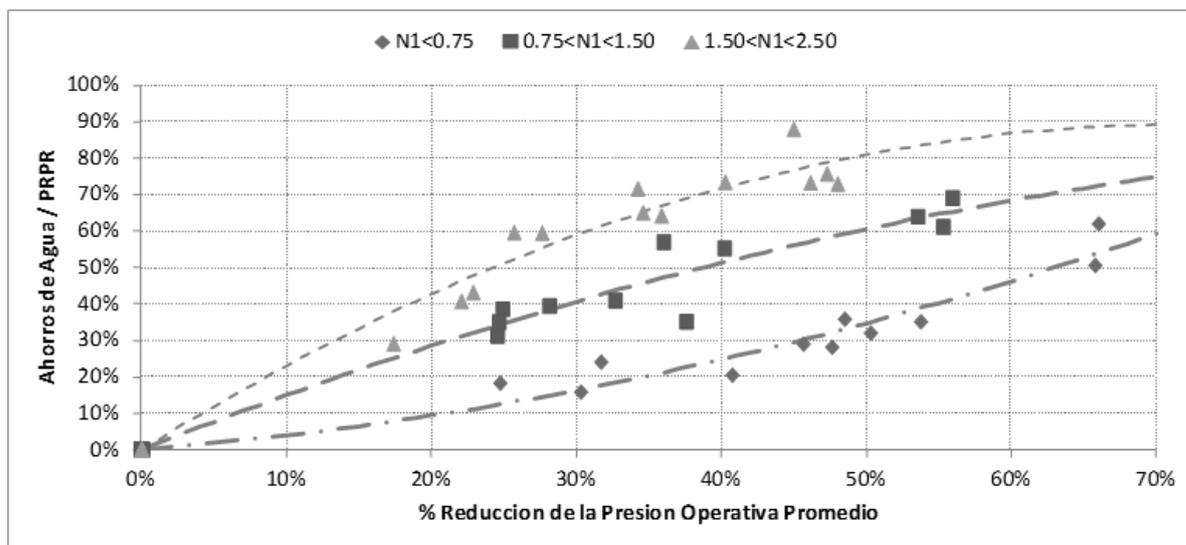


Figura 8 – Cociente entre Ahorros de Agua y Potencial Recuperable de Pérdidas Reales (PRPR), respecto al porcentaje de reducción de la presión operativa promedio. Los puntos representados por rombos son Sectores de Gestión de Presión (SGPs) con $N1 < 0,75$. Los puntos representados por cuadrados son SGPs con $0,75 < N1 < 1,50$. Los puntos representados por triángulos son SGPs con $1,50 < N1 < 2,50$.

NUEVAS FORMULAS PARA LA ESTIMACION DE PERDIDAS REALES

El volumen de agua perdido a través de las pérdidas reales es una función de diferentes variables: tipo de suelo, número de conexiones de servicio, longitud de la red, presión operativa del sistema, cantidad de tiempo en el cual el sistema esta presurizado, entre otros. En lo siguiente se tratará de relacionar el volumen de PR a cuatro variables concretas: Longitud de la Red (Lr), Numero de Conexiones de Servicio (Nc), Factor Día Noche (FDN) y Presión Operativa Promedio (PP). De esta manera:

$$PR = f(Lr, Nc, FDN, PP)$$

Sería muy complejo encontrar la función “ f ” que relacione estas 5 variables. Sin embargo es posible reducir el número de variables utilizando el “Teorema π de Buckingham”¹. Este teorema es un método para reducir un número de variables dimensionales a un número menor de grupos de variables adimensionales, también llamados números Pi. Para poder aplicar el Teorema π se debe introducir una nueva variable, la Densidad del Agua ρ [kg/m³] de manera de poder crear los números adimensionales. Así se tendrá una nueva función “ g ” que relaciona las variables:

$$PR = g(Lr, Nc, FDN, PP, \rho) \quad [15]$$

Aplicando el Teorema π se reduce el problema de 6 variables dimensionales a solo 2 grupos de variables adimensionales, los cuales están relacionados por una función “ h ”:

$$\pi_1 = h(\pi_2) \quad [16]$$

$$\pi_1 = \frac{PR.FDN.Nc}{Lr^3} = \frac{PR.FDN.Dc}{Lr^2} \quad [17]$$

$$\pi_2 = \frac{PP.FDN^2}{\rho.Lr^2} \quad [18]$$

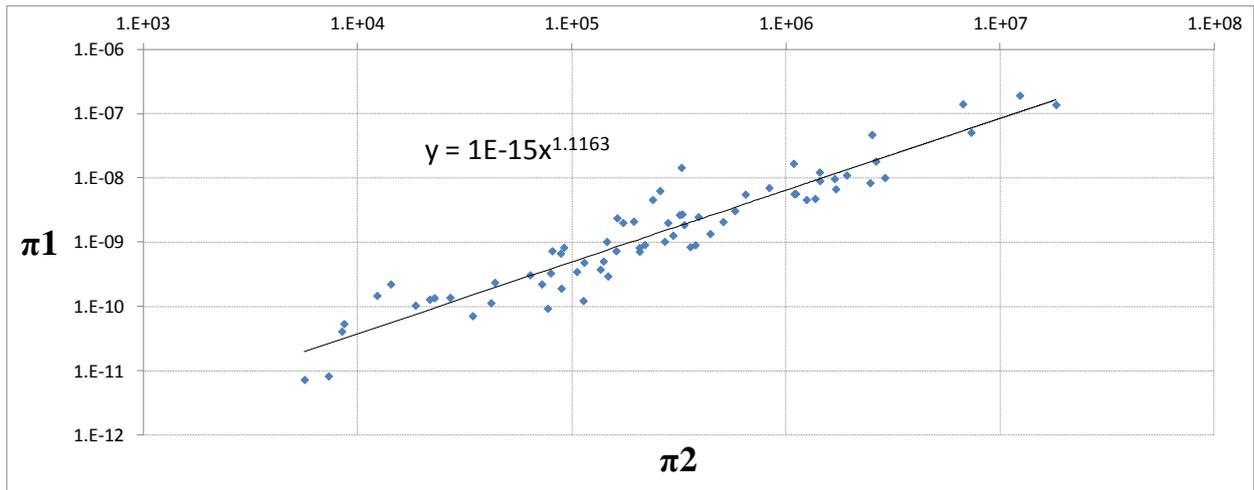


Figura 9 – Valores de π_1 y π_2 para cada SGP. La línea de tendencia que relaciona ambas variables es de tipo potencial.

En lo siguiente se presenta la función “ h ” que liga estas dos variables, para ello se utilizara la información obtenida de los SGPs analizados. Los valores π_1 y π_2 obtenidos para cada SGP se presentan en la Figura 9, donde cada punto corresponde a un SGP distinto. Es notorio que existe una relación entre ambos números adimensionales, esta relación es una función de tipo potencial:

$$\pi_1 = A. \pi_2^B \quad [19]$$

$$\frac{PR.FDN.Nc}{Lr^3} = A. \left(\frac{PP.FDN^2}{\rho.Lr^2} \right)^B \quad [20]$$

¹ La primera parte del Teorema π explica que reducción de variables se puede esperar:

Un proceso físico que involucra n variables dimensionales, puede ser reducido a una relación entre k variables adimensionales (números π). La reducción $j=n-k$ será igual al máximo número de variables que no formen un número Pi entre ellas y es siempre menor o igual que el número de dimensiones que contienen las variables.

La segunda parte del teorema muestra cómo encontrar los números π :

Primero encontrar la reducción j , luego seleccionar j variables que no formen un número π entre ellas. Cada número Pi será un producto potencial de las j variables mas una variable adicional la cual se le asigna un exponente distinto de cero. Cada número π encontrado es independiente.

Donde A y B son constantes, y sus valores son $A = 7.10^{-16}$ y $B = 1,1543$. Despejando PR de la ecuación [20] se puede obtener la ecuación [21] que resulta muy práctica. Las pérdidas reales diarias por conexión son proporcionales a la presión operativa promedio de la red y al FDN, y por otro lado son inversamente proporcionales a la densidad de conexiones y a la longitud de la red.

$$PR \left[\frac{\text{litros}}{\text{con.dia}} \right] = A \cdot \frac{Lr}{Dc} \cdot \left(\frac{PP}{\rho} \right)^B \cdot \left(\frac{FDN}{Lr} \right)^{2B-1} \quad [21]$$

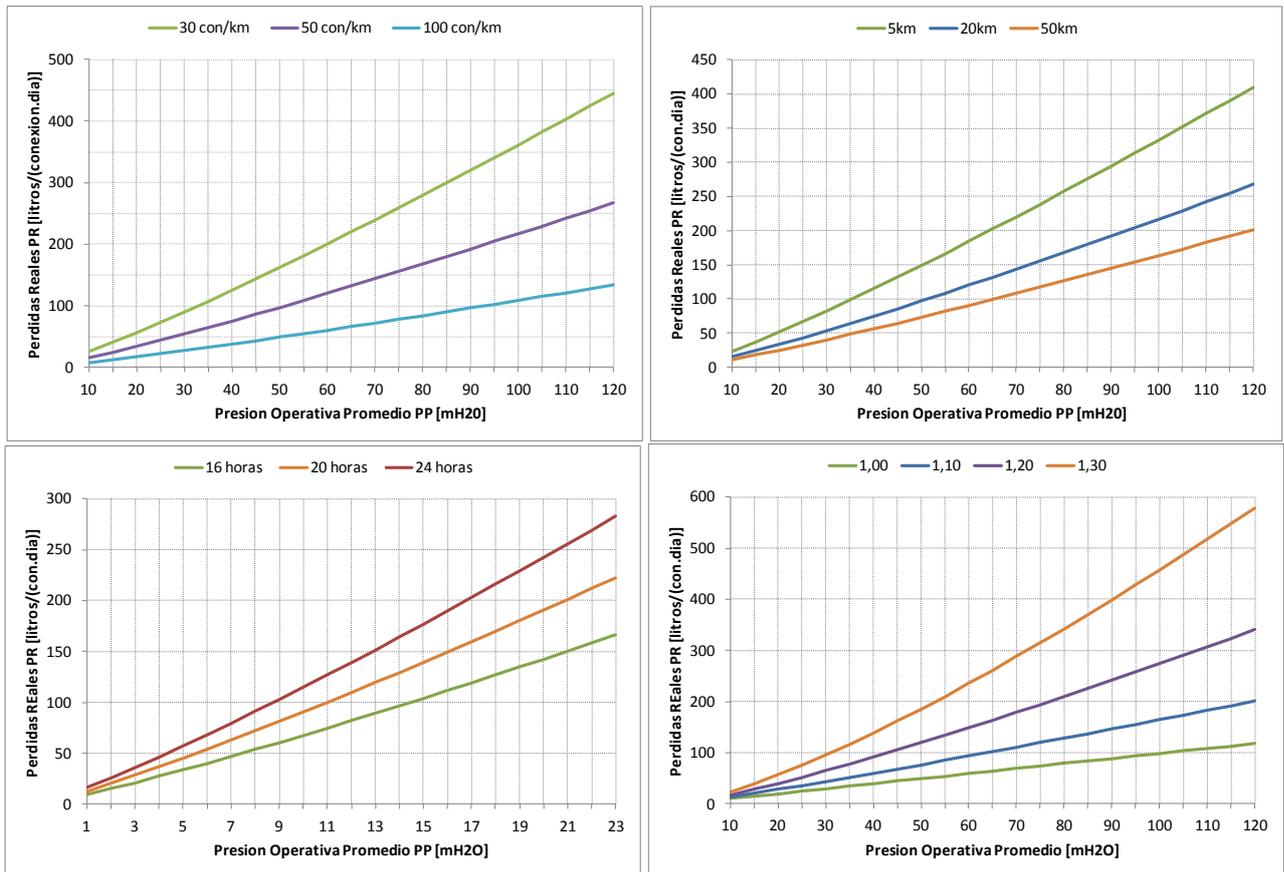


Figura 10 – Relación entre Perdidas Reales (PR) y presión operativa promedio para un SGP con $Dc = 50$ con/km, $Lr = 20$ km, $FDN = 23$ horas, $A = 7.10^{-16}$ y $B = 1,15$. En cada grafico se modifica una variable. Gráfico superior izquierdo: variación de $Dc = 30-50-100$ con/km. Gráfico superior derecho: variación de $Lr = 5-20-50$ km. Gráfico inferior izquierdo: variación de $FDN = 16-20-24$ horas. Gráfico inferior derecho: variación de $B = 1,0-1,1-1,2-1,3$.

En la Figura 10 se indican los valores de PR obtenidos con la ecuación [21] para diferentes presiones operativas de la red. Se toma como ejemplo un SGP con $Dc = 50$ con/km, $Lr = 20$ km y $FDN = 23$ horas, $A = 7.10^{-16}$ y $B = 1,15$. En cada uno de los gráficos se cambia una variable para apreciar como varía PR. En el gráfico superior izquierdo se aprecia que las pérdidas reales diarias por conexión disminuyen cuando aumenta la densidad de conexiones. En el grafico superior derecho se observa que PR_C disminuye cuando aumenta la longitud de la red. El grafico inferior izquierdo muestra que PR_C aumenta con el incremento de FDN. Finalmente el grafico inferior derecho indica que PR_C es mayor cuanto mayor sea la constante B de la red.

También es interesante comparar situaciones antes y después de la regulación de presión utilizando la formula [20]. Como primer paso despejamos A de la ecuación [20], por ser A una constante entonces el cociente entre π_1 y π_2^B será siempre constante, es decir:

$$A = \frac{\pi_{1,antes}}{\pi_{2,antes}^B} = \frac{\pi_{1,despues}}{\pi_{2,despues}^B} = \text{constante} \quad [22]$$

Generalmente cuando se instala una VRP, se compara la situación una semana antes y una semana después de la regulación de la presión. En dicho período L_r , N_c y ρ usualmente permanecen constantes; asumiendo esta hipótesis, de la [22] se llega a:

$$PRd = PRa. \left(\frac{PPd}{PPa}\right)^B \cdot \left(\frac{FDNd}{FDNa}\right)^{2B-1} \quad [23]$$

Donde se puede ver que la reducción del volumen de PR, es proporcional a la variación de PP y FDN del SGP. La figura 10 muestra la variación del cociente de PR después y antes, respecto a la variación del cociente de PP después y antes. El gráfico de la izquierda muestra tres curvas para diferentes cocientes de FDN después y antes, siendo $B = 1,15$. En cambio en el gráfico de la derecha el cociente FDN después y antes permanece constante (24 horas / 20 horas) y las curvas representan la variación para tres valores diferentes de B. Se deduce que para una determinada variación de presión es menor la variación de PR mientras mayor sea la variación de FDN. Por otro lado la variación de PR para una determinada variación de PP será mayor cuanto mayor sea el coeficiente B de la red.

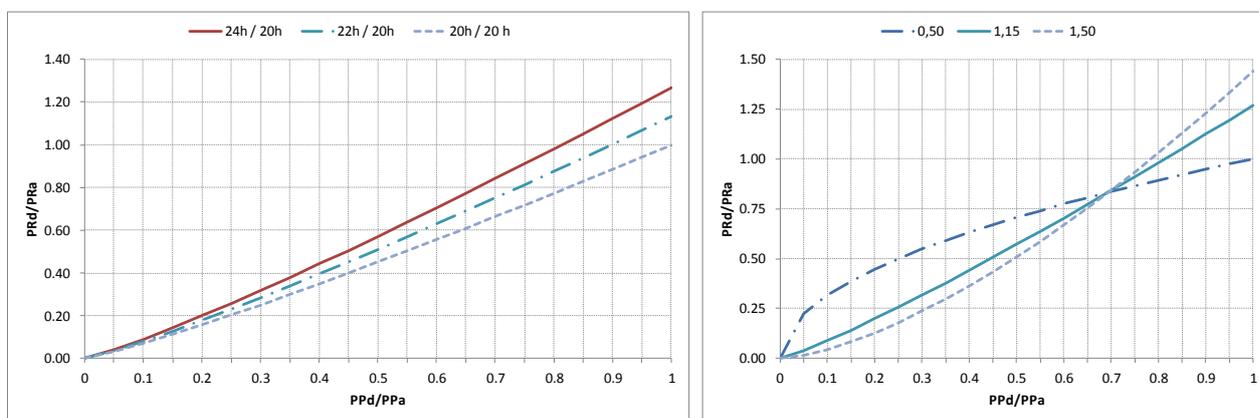


Figura 11 - Cociente entre Perdidas Reales después y antes de la reducción de presión, respecto al cociente de Presión Promedio operativa (PP) después y antes de la reducción de presión. En la figura izquierda $B = 1,15$ y se presentan tres curvas para diferentes cocientes del Factor Día Noche (FDN) después y antes de la regulación de presión. La figura derechas presenta tres curvas para distintos valores de B; mientras que $FDNd / FDNa = 24$ horas / 20 horas, es igual para las tres curvas.

Si en la ecuación [22] suponemos que FDN no varía, entonces se llega a una ecuación equivalente a la formula [2]:

$$PRd = PRa. \left(\frac{PPd}{PPa}\right)^B \quad [24]$$

Por lo que B equivale al valor FAVAD N1. El valor $B = 1,15$ obtenido para las redes analizadas equivale al coeficiente N1 obtenido por Ogura en 1979 en diversas redes de Japón. De esta manera comprobamos la equivalencia entre las formulas [24] y [2]. Lo anterior da validez a las nuevas formulas [20], [21] y [23].

CONCLUSIONES

- Las Pérdidas Reales (PR) y las Perdidas Reales Inevitables (PRI) incrementan a medida que aumenta la Presión Promedio (PP) de la red (ver Figura 5).

- Cuando se implementa un Sector de Gestión de Presión (SGP) y se reduce la presión, se producen cuatro fenómenos (ver Figuras 6 y 7): a) regulación de la presión aguas debajo de la Válvula Reductora de Presión (VRP), b) incremento de presión aguas arriba de la VRP, c) reducción de fluctuaciones de presión durante el día en el SGP, d) reducción de pérdidas reales dentro del SGP.
- Cuanto mayor sea la reducción de la presión mayor será la reducción de PR y por consiguiente el ahorro de agua. Para un determinado porcentaje de reducción de presión en un SGP, mayor será el cociente entre Ahorros de Agua (AA) y el Potencial Recuperable de Pérdidas Reales (PRPR) cuanto más grande sea el valor FAVAD N1 del SGP (ver Figura 8).
- PR se puede relacionar a cuatro variables concretas: Longitud de la Red (Lr), Numero de Conexiones de Servicio (Nc), FDN y PP. Aplicando el Teorema π se reduce el problema a sólo 2 grupos de variables adimensionales, los cuales están relacionados por la ecuación [20].
- Las Pérdidas Reales diarias por Conexión (PR_C) son proporcionales a FDN y PP, e inversamente proporcionales a Dc y Lr (ver ecuación [21] y Figura 10). Los valores de PR_C para un determinado valor de PP, así como también la variación de PR_C con respecto a una determinada variación de PP son ambos mayores cuanto más grande sea el coeficiente B.
- Para una determinada variación de PP, será menor la variación de PR cuanto mayor sea la variación de FDN. A su vez la variación de PR para una determinada variación de PP será mayor cuanto mayor sea el coeficiente B de la red (ver ecuación [23] y Figura 11).
- La ecuación [21] es la ecuación general de la pérdidas reales y se puede aplicar para diferentes sistemas de distribución de agua potable, para los cuales cambiaran las constantes A y B. Como se ha demostrado B es equivalente al valor FAVAD N1 por lo que dependerá del tipo de fugas y materiales presentes en la red, mientras que A dependerá de otras características de la red.

REFERENCIAS

- Fantozzi, M; et al** (2009). *“Experience and results achieved in introducing District Metered Areas (DMA) and Pressure Management Areas (PMA) at Enia utility (Italy)”*. IWA Specialist Conference ‘Waterloss 2009’, Cape Town, South Africa.
- Fantozzi, M and Lambert, A** (2012). *“Residential Night Consumption – Assessment, Choice of Scaling Units and Calculation of Variability”*. WA Specialised Conference ‘Water Loss 2012’, Manila, Philippines.
- Farley, M and Trow, S** (2003). *“Losses in Water Distribution Networks: A Practitioner’s Guide to Assessment, Monitoring and Control”*. IWA.
- Lambert, A and Mice** (1994). *“Accounting for Losses: the Bursts and Background Estimates Concept”*. Journal I.W.E.M, 8.
- Lambert, A and Morrison** (1996). *“Recent developments in ‘Bursts and Background Estimates’ Concepts for Leakage Management”*. Journal C.I.W.E.M, 10.
- Lambert, A; Brown, T; et al** (2000). *“A review of performance indicators for real losses from water supply systems”*. IWA/AQUA.
- Lambert, A** (2003). *“What do we know about pressure:leakage relationships in distribution systems?”*. IWA Conference ‘System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management’, Brno, Czech Republic.
- Lambert, A** (2009). *“Ten Years Experience in using the UARL Formula to calculate Infrastructure Leakage Index”*. IWA Specialist Conference ‘Waterloss 2009’, Cape Town, South Africa.
- Lambert, A; Hicks, J; et al** (2010). *“Managing excess pressures to improve water systems asset management”*. 5th World Congress on Engineering Asset Management, Brisbane, Australia.
- Lambert, A** (2013). *“International Water Losses – Lost in Translation”*. Water and Wastewater Treatment Magazine.
- Thornton, J and Lambert, A** (2005). *“Progress in practical prediction of pressure:leakage, pressure:burst frequency and pressure:consumption relationships”*. Proceedings of IWA Special Conference ‘Leakage 2005’, Halifax, Canada.
- Thornton, J; Sturm, R; et al** (2008). *“Water Loss Control / Second Edition”*. Mc Graw Hill.
- Ziegler, D; Fallis, P; et al** (2011). *“Guía para la reducción de las pérdidas de agua / Un enfoque en la gestión de presión”*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Eschborn, Alemania.