

Algoritmo adaptativo para la estimación de pérdidas de agua en redes basado en análisis avanzado de Caudales Mínimos Nocturnos (CMN)

David J. Vicente^a, Miguel García^b, Fernando Salazar^a y Jorge Helmbrecht^b

^a(CIMNE - Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, divicente@cimne.upc.edu; fsalazar@cimne.upc.edu)

^b (WatEner, Grupo INCLAM, Madrid, miguel.garcia@watener.com; jh@watener.com)

Línea temática | M. Ingeniería del agua 4.0; (Alternativa: C. Agua y Ciudad)

RESUMEN

El método del Caudal Mínimo Nocturno (CMN) es un concepto ampliamente utilizado para la estimación de fugas y otros objetivos estratégicos en empresas operadoras de agua. Si bien es un procedimiento de fácil aplicabilidad, existe un gran abanico de submétodos de aplicación, pudiendo introducirse una gran incertidumbre en los cálculos si no se seleccionan correctamente los criterios a utilizar. En este estudio se presenta un algoritmo capaz de asistir en la elección del mejor enfoque para el cálculo de CMN en función de los datos disponibles, las características de cada caso y el objetivo perseguido. Para elaborar dicho algoritmo se han ejecutado tres acciones: (i) revisión exhaustiva de literatura especializada y recopilación de submétodos utilizados en casos reales a nivel global, (ii) elaboración de un algoritmo multi-criterio capaz de seleccionar la mejor opción en cada fase del cálculo y (iii) presentación de una plataforma informática, llamada WatEner, en la que se integrará progresivamente el algoritmo propuesto.

Introducción y presentación del estudio

Los planes de gestión de fugas se han convertido en las últimas décadas en una actividad estratégica para la mayoría de empresas operadoras de redes distribuidoras de agua. Conocer la cantidad exacta de fugas en una red es una tarea prácticamente imposible dada la gran cantidad de factores que intervienen. Por ello, los enfoques para estimar el volumen de fugas a nivel de red son muy numerosos y heterogéneos: balances hídricos, instrumentación de campo, sectorización, modelación numérica, modelos estadísticos basados en análisis de datos, etc.

Uno de los métodos más extendidos a nivel mundial es el relacionado con el concepto de Caudal Mínimo Nocturno (CMN). Su utilización abarca una gran expansión tanto temporal, utilizándose de forma continuada a lo largo de las últimas décadas, como geográfica, aplicándose en proyectos reales a lo largo de todo el mundo (UKWI 1994; Mckenzie 2002; García et al. 2006; Puust et al. 2010; Parra et al. 2018; Al-Washali et al. 2019). El concepto del CMN se fundamenta en que durante las primeras horas de la madrugada el consumo de los usuarios es mínimo y en general suele ser más estable (menor variabilidad). Esto se traduce en un mayor porcentaje de pérdidas con respecto al volumen total de agua y una mayor precisión para calcular el nivel de fugas.

A pesar de que el concepto de CMN está contrastado no existe una metodología estándar sobre cómo debe aplicarse. No obstante, sí se han identificado determinadas acciones o fases que son comunes en la mayoría de estudios, pudiéndose considerar como pasos principales de este método. La Figura 1 recoge estos pasos, en total cuatro, mostrando su relación, las variables principales asociadas a cada uno de ellos y algunas de las expresiones de cálculo más utilizadas.

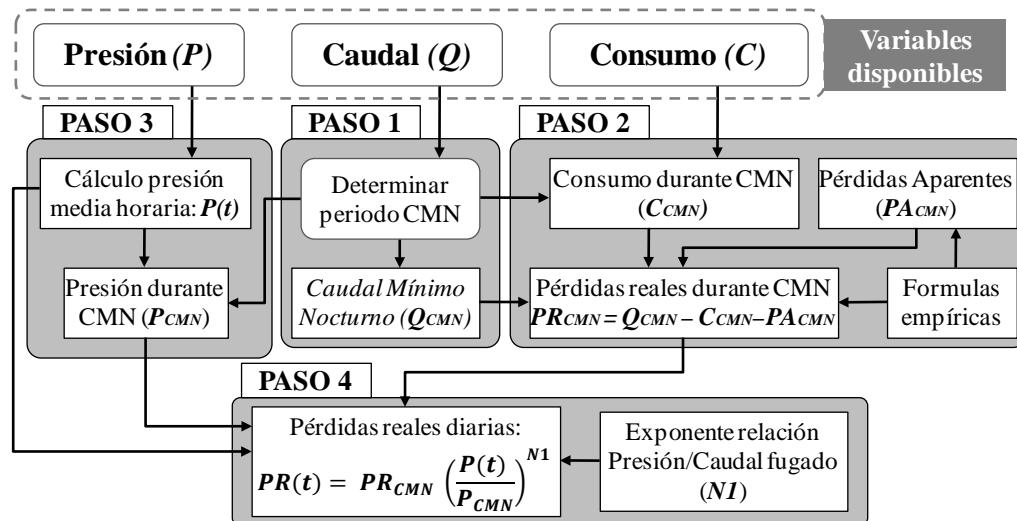


Figura1| Esquema global de estimación de fugas mediante método CMN y pasos principales.

Los pasos son los siguientes: (1) cálculo del valor de CMN de referencia, (2) desagregación del caudal total en subcomponentes y estimación del nivel de pérdidas reales y aparentes durante este periodo, (3) cálculo de la presión media de la zona analizada y (4) extrapolación de los valores de pérdidas reales durante el CMN al resto del día a través de expresiones que relacionan presión y caudal fugado.

Tras llevar a cabo una exhaustiva revisión de casos de estudio a nivel mundial, de cada paso se han detectado un gran número de enfoques o criterios, recurriendo muchos de ellos a hipótesis simplificativas o a valores o ecuaciones empíricos propuestos en la literatura especializada. Esto se traduce en la existencia de un gran espectro de submétodos con diferentes niveles de detalle, introduciendo muchos de ellos una gran incertidumbre en los cálculos y añadiendo la dificultad de extrapolar un método aplicado en un sistema determinado a otro de diferentes características.

En este contexto surge el proyecto SMILER, financiado por el plan nacional de I+D+i (Retos Colaboración 2017). Este proyecto, desarrollado conjuntamente por el centro de investigación CIMNE y la empresa INCLAM, pretende profundizar en distintas acciones relacionadas con la gestión integral de fugas, combinando modelos numéricos y modelos de análisis de datos basados en técnicas de ‘machine learning’. En esta comunicación se presentan los avances de una de las tareas planteadas en el proyecto, la cual trata de resolver la problemática ligada a la falta de estandarización relacionada con el concepto de CMN. Para ello, el objetivo principal de esta acción es el siguiente: “elaboración de un algoritmo para la estimación de pérdidas basado en el concepto de CMN, que sea adaptativo a cada caso de estudio y asista a empresas operadoras de agua en su toma de decisiones”.

Para acometer este estudio se han llevado a cabo las siguientes acciones: (i) revisión exhaustiva de literatura especializada y recopilación de submétodos y criterios utilizados a nivel mundial, (ii) elaboración de un algoritmo multi-criterio para seleccionar el mejor criterio en cada fase del cálculo en función de los datos disponibles, las características de la red y el objetivo perseguido e (iii) integración del algoritmo en una plataforma informática.

Revisión de literatura: recopilación de métodos, criterios y objetivos perseguidos

El primer paso fue la recopilación de información sobre proyectos en los que se ha utilizado este concepto. La naturaleza de la información recabada es muy heterogénea, destacando artículos académico-científicos en los que se describen casos de estudio reales, guías técnicas especializadas y recurriendo también a opiniones de expertos de operadoras de agua del ámbito nacional. El número de casos de estudio reales tratados ha sido muy extenso: 48 casos, con un ámbito geográfico global (25 países de 5 continentes diferentes) – ver Figura 2. Esta heterogeneidad en la distribución espacial ha permitido que no existan sesgos regionales.



Figura 2 | Mapa con localización de casos de estudio.

En cada proyecto se han identificado los criterios utilizados para calcular las pérdidas reales. Posteriormente, éstos se han agrupado en el paso al que corresponden dentro de la metodología global de cálculo de CMN. De cada paso, se han analizado las técnicas y formulaciones más comunes, las más novedosas o innovadoras y las que pueden suscitar un mayor grado de incertidumbre en los cálculos. La Tabla 1 recoge algunos de los factores más importantes extraídos de este análisis.

Tabla 1 | Aspectos más relevantes analizados de cada proyecto y clasificación según pasos principales del método de CMN.

Pasos principales	Aspectos más relevantes analizados
Cálculo de valor de CMN (Q_{CMN})	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datos disponibles y longitud de serie de datos seleccionada (ancho de banda o ventana) ▪ Época del año y posibles estacionalidades temporales de las series (anual o semanal) ▪ Tramo horario referencia; valores instantáneos/medios ▪ Tratamiento de preproceso: eliminación outliers/nulos, estadísticos
Desagregación de Q_{CMN} en subcomponentes y cálculo pérdidas reales (P_R) y aparentes (P_A)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Detalle de la desagregación: componentes considerados ▪ Enfoque para cálculo de pérdidas reales: cálculo directo o desagregando del Q_{CMN} determinadas subcomponentes ▪ Métodos de obtención de cada subcomponente: fórmulas empíricas, monitorización, modelos numéricos, encuestas, modelos estadísticos.
Cálculo de Presión Media P_{med}	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puntos de la red con sensores de presión: entradas, punto representativo de P_{med}, punto crítico, red amplia ▪ Características topológicas de la red: tamaño de sector, rango de cotas, diámetros medios (red sobredimensionada) ▪ Consideración de pérdida de carga: sensores o modelos
Cálculo exponente NI y extrapolación de fugas al resto de tramos horarios	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Métodos para extrapolar: cálculos de factor día-noche, factor corrector, aplicación de ecuación en cada instante ▪ Valor asignado a exponente NI: basado en literatura, estimado a partir de tipo de red, calculado mediante campañas de variación de presión (método inverso)

Además de la variedad de criterios utilizados con el método de CMN, destaca también las diferentes finalidades perseguidas en cada proyecto. A continuación de enumeran las más destacados:

- **Estimación de caudal fugado durante el periodo nocturno** – Este objetivo se corresponde con los pasos primero y segundo de la Figura 1. Si bien algunos de los proyectos analizados se limitan a acometer este objetivo, la mayor parte de estudios utilizan éste como paso previo a la consecución de otro de mayor entidad.
- **Extrapolación de caudal fugado a lo largo del día** – Este se trata del objetivo más característico para el cual se utiliza el concepto de CMN. Los pasos a ejecutar se corresponden con la Figura 1 al completo. Si bien los dos primeros pasos servirían para calcular el caudal fugado durante el periodo nocturno, los dos siguientes se corresponderían con su extrapolación al resto de tramos horarios a lo largo del día.

- **Detectar aparición de nuevas fugas** – La observación del valor de CMN puede ser un indicador muy fiable para la detección de nuevas fugas ligadas a roturas no reportadas. Si bien durante períodos con mayor consumo en usuarios la aparición de una nueva rotura puede pasar desapercibida, durante los períodos de menor consumo éstas serán más fácilmente detectables.
- **Evaluar impacto de planes de regulación de presión** – El análisis de valores de CMN puede utilizarse también como indicador para evaluar la eficiencia de maniobras de gestión de presiones. Los indicadores que se suelen utilizar para tal fin son la ‘reducción del valor medio de CMN’ o de forma más precisa la ‘reducción de pérdidas reales’ en unidades absolutas o relativas. El primer indicador es de aplicación más directa y por tanto su utilización está más extendida. Ahora bien, hay que tener la precaución de considerar la afección de la regulación de presiones en el consumo en usuarios.
- **Otros objetivos** – Además de los anteriormente citados se han encontrado algunos casos en los que se utiliza el concepto de CMN como indicador para otro tipo de objetivos menos extendidos: evaluación del impacto de un plan de control activo de fugas (Ristovski 2011), análisis de correlación de factores asociado a fugas (Alkasseh et al. 2013), calibración de modelos numéricos (Ribeiro et al. 2015) o análisis de consumos nocturnos (García et al. 2003; Loureiro et al. 2012).

En la Tabla 2 se recogen algunos de los estudios más destacados clasificados según los objetivos principales perseguidos en los mismos. Estos mismos estudios se corresponden con la mayor parte de casos reales ilustrados en la Figura 2.

Tabla 2| Proyectos analizados y clasificación según objetivos perseguidos en cada uno de ellos

Objetivos principales perseguidos	Referencias
Estimación de Caudal Mínimo Nocturno	Choi et al. 2015; Adlan et al. 2013; Hunaidi et al. 2007; Lee et al. 2005; García et al. 2003
Extrapolación de fugas a lo largo del día	Al-Washali et al. 2019; Eugene 2017; Fontana et al. 2017a; Kabaasha et al. 2016; Kanakoudis et al. 2016; Babic et al. 2014; Xin et al. 2014; Wu et al. 2013; Gomes et al. 2011; Cheung et al. 2010; Fantozzi et al. 2009; Tabesh et al. 2009; Covas et al. 2006
Detección de aparición de nuevas fugas	Farah et al. 2017; Loureiro et al. 2015; Xin et al. 2015; Mimi et al. 2004
Evaluación de impacto de plan de gestión de presiones	Al-Washali et al. 2019; Parra et al. 2018; Fontana et al. 2017b; Kanakoudis et al. 2016; Babic et al. 2014; Wu et al. 2013; Karadirek et al. 2012; Gomes et al. 2011; Kalinkov et al. 2011; Paskalev et al. 2011; Adlan et al. 2009; Fantozzi et al. 2009; McKenzie et al. 2009; Tabesh et al. 2009; Girard et al. 2007; Hunaidi et al. 2007; Marunga et al. 2006; McKenzie et al. 2004
Otro tipo de objetivos	Ribeiro et al. 2015; Gao et al. 2017; Alkasseh et al. 2013; Loureiro et al. 2012; Charalambous et al. 2011; Ristovski 2011; García et al. 2003

Elaboración de algoritmo multi-criterio

El segundo paso ha consistido en el desarrollo de un algoritmo donde se incluye una gran variedad de criterios y submétodos, sugiriéndose el más conveniente para cada caso. Esta elección se ha fundamentado en distintos factores: datos disponibles, características topológicas del sector, características de las series hidráulicas (caudal, consumos o presión), disposición o no de modelos numéricos y objetivos perseguidos.

La estructura del algoritmo se ha programado de forma modular y con dos niveles: un primer nivel que relaciona los pasos principales del método de CMN (Figura 1) y otro nivel de mayor detalle asociado a cada paso. En cada sección se han integrado métodos extraídos de la literatura y otros originales propuestos en este proyecto.

Cálculo de valor CMN de referencia

El primer paso es el cálculo del valor de referencia del CMN. Este proceso entraña una gran incertidumbre debido a distintos aspectos entre los que destacan: calidad de los datos, variabilidad sistemática debido a perfiles de patrones de consumo y variabilidad aleatoria de los datos. Antes de tomar un valor de CMN concreto hay que tener en cuenta estos factores, analizarlos

y proceder en función de cada caso. Esta primera fase del algoritmo ejecuta secuencialmente una serie de pasos que se recogen en la Figura 3 y se resumen a continuación:

- **Balance de sector o zona de estudio** – El primer proceso que se realiza es configurar el balance del sector o zona a calcular desde el punto de vista topológico, determinando los puntos de control de caudal. En el caso de tratarse de sectores hidráulicos con entradas y salidas claramente definidas y monitorizadas con caudalímetros, se determinan estos puntos y se asocian a las series de datos correspondientes. Si no existe sectorización y la zona a controlar es demasiado amplia se deben acotar regiones por puntos en las que se dispongan datos de caudal y configurar una regionalización propia de la red. Algunos de los puntos habituales de control de caudal son las salidas de estaciones de bombeo, las conexiones con depósitos o con válvulas reguladoras (con posibles caudales bidireccionales que habrá que contemplar en los balances). Por último, se contempla la posibilidad de calcular balances hídricos en zonas acotadas temporalmente, como microsectores dinámicos.

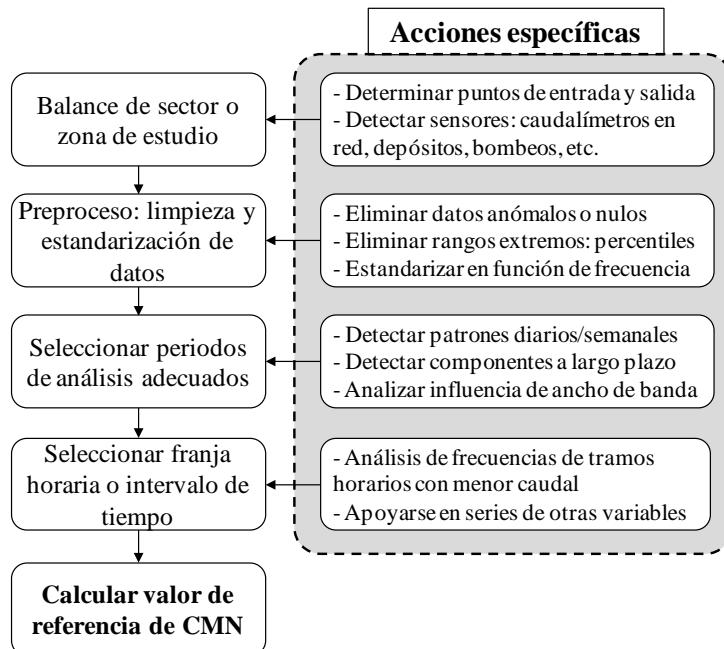


Figura 3| Principales pasos y aspectos a considerar a la hora calcular valor de referencia de CMN

- **Acciones de preproceso: filtrado de datos y estandarización** – Una vez determinados los puntos de control y recabadas las series temporales provenientes de los mismos, se procede a realizar una serie de acciones de preproceso. En primer lugar, se filtran los valores correspondientes a las series detectando y eliminando ‘outliers’ en base a cálculo estadístico de desviaciones estándar. A continuación, se detecta la existencia de datos nulos y si el número de valores excede un porcentaje mínimo permitido no se considerará dicho periodo para el cálculo. Después, dado que interesa tomar valores mínimos pero algunos de ellos pueden provenir de errores de medición o lectura, opcionalmente se pueden descartar valores que estadísticamente estén por debajo de un determinado percentil. Este método ha sido aplicado por Farah et al. (2017) tomando valores del percentil 5% para realizar el cálculo en lugar de los mínimos absolutos. Por último, en el caso de que la frecuencia de muestreo sea diferente entre distintos aparatos de auscultación (por ejemplo, 10-minutal en un caudalímetro y horario en otro) se pueden estandarizar las series aplicando un factor de corrección por ‘frecuencia o duración de muestreo’ (UKWI 1994).
- **Selección de periodo de análisis** – Es importante también conocer si existen cambios sistemáticos en el caudal debido a variaciones en las series de consumo. Este tipo de variabilidad se puede analizar en muchos casos mediante la descomposición en componentes de las series temporales (Vicente 2017). Conviene diferenciar entre dos tipos de componentes: (i) a corto plazo, asociadas a patrones diarios o semanales y (ii) a largo plazo, ligadas a la existencia de tendencia, estacionalidad anual o variación de la amplitud de los caudales (series heterocedásticas). Teniendo en cuenta este análisis y el objetivo perseguido en cada caso, se seleccionará el periodo más conveniente. En el caso de necesitar comparar valores en diferentes períodos, por ejemplo para evaluar el impacto de un plan de gestión de presiones, es fundamental que las series pertenezcan

estadísticamente hablando a la misma población, por lo que se analiza este aspecto mediante tests estadísticos. Si existen patrones diarios diferentes para cada día de la semana se recomienda realizar los análisis en días de la semana análogos. En el caso de existir componentes a largo plazo, en primer lugar el algoritmo asiste en la selección de los períodos más estables. Esto suele coincidir con períodos invernales, dado que en muchas zonas durante el periodo estival existe una gran variabilidad de consumos y por tanto una mayor incertidumbre en los cálculos. Por último, se evalúa también la influencia del ancho de banda o ventana en el cálculo de CMN.

- **Selección de franja horaria** – En el último paso se selecciona la franja horaria que se considera más adecuada para evaluar el CMN. García et al. (2006) mediante un análisis de sensibilidad de cada tramo horario concluye que la franja con menor error relativo es aquella en la que el coeficiente de modulación de demanda es más cercano a 1 (demanda media del sector), pudiendo darse en cualquier tramo del día. No obstante, en la mayor parte de estudios y en la práctica profesional suele tomarse un rango nocturno comprendido entre las 00:00 y las 5:00 de la mañana, aunque puede variar en cada caso. Una de las opciones ofrecidas por el algoritmo es determinar manualmente el rango deseado. Otro enfoque es el cálculo de forma automática de la banda horaria más adecuada a partir del análisis estadístico de la frecuencia de ocurrencia de caudales mínimos (Adlan et al. 2013). Se ofrece también la posibilidad de tomar duraciones diferentes del rango horario, obteniéndose mayores valores cuanto mayor sea la duración del periodo tomado (Al-Washali 2019). Estas diferencias se verán compensadas con la selección de períodos análogos en las series de presiones correspondientes al paso 3 del algoritmo global.

Tras la ejecución de todos estos pasos, algunos ejecutados de forma automática y otro en función de los datos disponibles, el objetivo perseguido y la decisión del usuario, se procede a calcular los valores de caudal durante el periodo de mínimos nocturnos (Q_{CMN}).

Desagregación de caudal en subcomponentes: cálculo de pérdidas reales y aparentes

El siguiente gran paso a la hora de llevar a cabo esta metodología es la desagregación del valor de Q_{CMN} en subcomponentes. De forma generalizada se asume que las variables que conforman el Q_{CMN} son tres: consumos (C), pérdidas reales (P_R) y pérdidas aparentes (P_A). Ahora bien; de acuerdo al análisis de casos de estudio se ha podido detectar que esta fase se trata de la más incierta, habiéndose encontrado un mayor número de planteamientos en el cálculo.

El primer punto que destaca es que la componente de consumo en usuarios se estima de forma muy heterogénea en cada caso. Otro aspecto destacable es que, si bien los consumos y las pérdidas reales están integrados en prácticamente todos los modelos de cálculo, el componente de las pérdidas aparentes es una variable que no se contempla en todos ellos. El motivo principal es la dificultad que existe en su estimación precisa. Por último, en los casos en los que sí se contemplan ambos tipos de pérdidas – reales y aparentes – en unos casos se calculan primero las pérdidas aparentes y se deducen a continuación las pérdidas reales por desagregación de componentes del Q_{CMN} (Farah et al. 2017). En otros métodos por el contrario, se estiman primero las pérdidas reales y se deducen posteriormente las aparentes.

En el algoritmo propuesto en el presente estudio se han integrado diversas alternativas para el cálculo de cada componente. Algunas de ellas se han establecido como opciones predeterminadas y por ello se han integrado como primeras opciones en la plataforma WatEner que es donde se materializan progresivamente los algoritmos propuestos. Se describen a continuación las opciones más destacadas.

- **Cálculo de consumos** – (i) introducción de valores provenientes directamente de sistemas de monitorización de telelectura; (ii) parametrización personalizada de consumos; (iii) integración de fórmulas y parámetros de la literatura especializada (UKWI 1994, McKenzie 1999, Puust et al. 2010, Fontana et al. 2017a) y (iv) desagregación de lecturas agregadas de consumos mediante modelos estadísticos. Todas estas opciones están contempladas dentro de la configuración predeterminada, pues existe un gran número de abastecedoras que utilizan más de un método de cálculo para completar el cálculo de consumos en su sistema. Si bien actualmente la mayoría de operadoras disponen de datos de consumo de forma agregada (opción iv), esta información se desagrega en datos diarios y posteriormente horarios. Para ello, se aplica un modelo estadístico que descompone los volúmenes totales acorde a la curva del perfil de caudales totales.

- **Cálculo de pérdidas reales** – En el caso de calcular primero las pérdidas reales se han encontrado diversas propuestas. Una de las más sencillas es determinar un porcentaje de P_R con respecto al CMN total (Parra et al. 2017, Karadirek et al. 2012). Otros autores utilizan modelos empíricos más complejos basados en parámetros dimensionales de la red y la presión media para calcular las fugas de fondo durante el CMN (Alkasseh et al. 2013).
- **Cálculo de pérdidas aparentes** – En el caso de optar por calcular primero las P_A hay que conocer y decidir el número de conceptos asociados a este tipo de pérdidas: consumo no autorizado o fraude, error de medición, error de lectura, etc. Un enfoque seguido por varios autores es la estimación de estas componentes como tanto por ciento del volumen total suministrado al sector (Tsitsifli et al. 2017) o el volumen total consumido (Farah et al. 2017). Tabesh et al. (2009) propone otro enfoque desagregando las pérdidas aparentes en un gran número de conceptos (fraude, error operacional, error de medición, error por subconteo) y asocia cada concepto a un parámetro dimensional distinto. La opción predeterminada, acota el volumen de P_A , previo cálculo de P_R , y a continuación lo desagrega en dos componentes. Primero determina el volumen asociado al error de medición en base a un porcentaje del volumen de consumo, calibrado de los ensayos en parque de contadores o función del coeficiente R del contador tipo y, como resultado final, es posible obtener el volumen de agua asociado a fraudes o consumos no autorizados.

Obtención de presión media

Para extrapolar las fugas durante el periodo de CMN al resto del día, el primer paso es el cálculo de la presión media (P_{med}). La Figura 4 muestra diferentes sub-métodos planteados para calcular la P_{med} en función de varios aspectos: datos disponibles, disposición de modelos numéricos, existencia de pérdida de carga, etc. En base a estos factores, el algoritmo propondrá uno u otro método entre tres opciones: ‘método hidráulico’, ‘topográfico’ (Renaud et al. 2015) o un método basado en la determinación de la ‘pérdida de carga’ (Vicente 2017).

- **Método hidráulico** – Este método, aplicable en casos en los que se disponga de modelos hidráulicos, se basa en la determinación de la presión en cada nodo mediante modelos numéricos. Posteriormente la presión media es ponderada en función de un determinado factor de ponderación: demanda, número de acometidas o longitud de tuberías.
- **Método topográfico** – En este caso la deducción de P_{med} también se basa en la ponderación de presiones en cada nodo, pero asumiendo la hipótesis de que la presión en cada nodo viene determinada por la presión estática de la red. Este escenario es muy útil cuando se dispone de las presiones en cabecera de sectores y la topografía de la red con las alturas de cada nodo. Como precaución, hay que tener en cuenta que no debe existir una pérdida de carga significativa.
- **Método de pérdida de carga** – A partir de las medidas tomadas en dos puntos, punto de cabecera y punto crítico, se propone una metodología para deducir la P_{med} del sector considerando la pérdida de carga en el sector pero basándose únicamente en las lecturas en los dos puntos citados. (Vicente 2017).

Esta vía para calcular P_{med} se basa en el análisis de presiones de forma distribuida, a partir de valores de presión distribuidos espacialmente en cada nodo. Otro enfoque diferente ejecuta el cálculo basándose en lecturas de sensores en puntos representativos de presión media. Para ello, el algoritmo incluye un submódulo que propone el punto de menor error e incluso puede sugerir la colocación de varios sensores para aumentar la precisión del cálculo en función de la distribución temporal de consumos.

De forma predeterminada, dependiendo de disponibilidad de información, se puede alternar en cada caso utilizando el método topográfico, hidráulico o por seguimiento continuo de sensores de presión en la red.

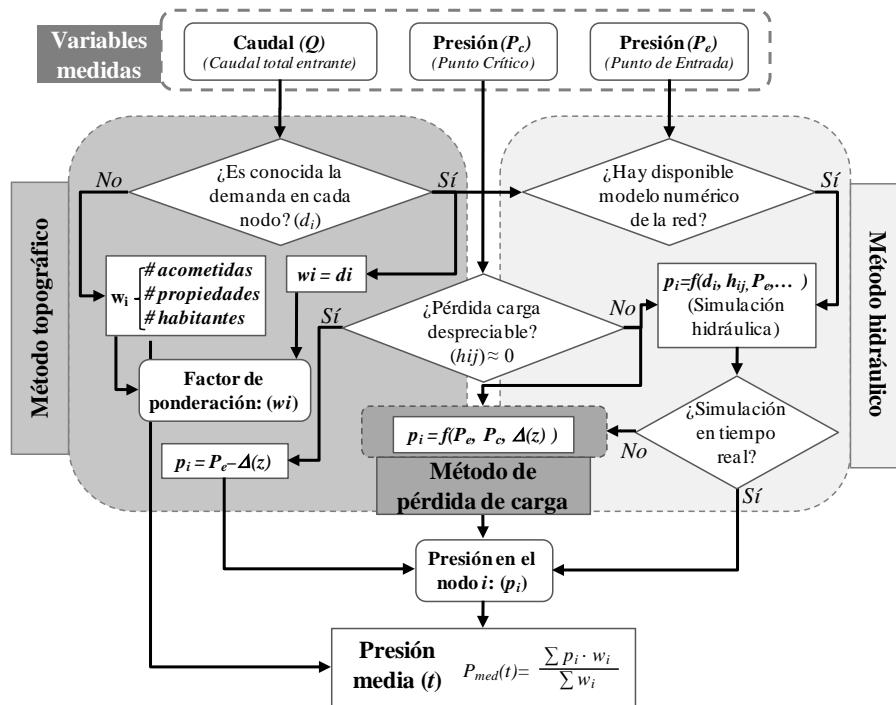


Figura 4| Esquema del algoritmo para calcular P_{med} en función de datos disponibles y características hidráulicas y topológicas del sector.

Extrapolación de pérdidas reales al resto del día: coeficiente N_1

El último paso para extraer fugas al resto del día es deducir el coeficiente que relaciona de forma global la presión con el caudal fugado. La relación entre presión y caudal, de forma generalizada, suele expresarse mediante ecuaciones simplificadas como el conocido exponente N_1 (Lambert 2002) ampliamente referenciado en la literatura. Definir este coeficiente como un único valor es una medida adoptada de forma generalizada por la mayoría de casos prácticos. Para su cálculo se han introducido tres métodos en el algoritmo:

- **Introducir valor directo** – El rango habitual está comprendido entre 0.5 y 1.5. Valores menores a 0.5 no son contemplados dado que este es el exponente resultante de forma analítica de la expresión de Torricelli. Fantozzi y Lambert (2010) sugirieron valores de 0.5 y 1.5 fijos, dependiendo de si los tubos son rígidos o flexibles, respectivamente. No obstante, pueden darse casos en los que este exponente se eleve hasta valores próximos a 2.5, tal y como se ha comprobado en casos de estudio relativo a la red de abastecimiento de Japón (Lambert 2002).
- **Promedio en función de material de tubería** – Este método se fundamenta en los valores del método anterior, pero se calcula un exponente en función del porcentaje de conducciones rígidas y flexibles. Este método se ha definido como predeterminado en el algoritmo, para lo cual requiere la lectura de los materiales de las conducciones y su longitud de archivos de tipo SIG.
- **Método inverso** – El último método contemplado en el algoritmo se ha denominado así por utilizar valores de presión y caudal en diferentes escenarios para calcular el exponente $N1$. Para aplicar este método es necesario disponer por tanto de valores de presión y caudal fiables en distintos instantes. Ha sido aplicado por varios autores con éxito (Fontana et al. 2017a, Kabaasha et al. 2016, Adlan et al. 2009, Cheung et al. 2010, Wu et al. 2013).

Integración en plataforma WatEner

Una vez recopilada toda la información sobre los métodos, criterios y objetivos asociados al concepto de CMN y conformado el algoritmo que contempla múltiples criterios para cada fase, el último paso de este proyecto ha consistido en preparar la estructura de datos y el código del algoritmo para su integración en la plataforma WatEner. Se trata de un software completamente funcional y comercializable desarrollado por el grupo INCLAM en forma de plataforma web. Su objetivo global es la mejora de la eficiencia en la operación y gestión (diaria) de redes de abastecimiento a través de la integración de datos, monitorización de eventos en tiempo real, componiendo un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de pérdidas de agua, aplicando modelos y técnicas de inteligencia artificial y gestión del conocimiento experto.

Entre sus funcionalidades, la plataforma realiza el cálculo y monitorización de CMN, y el posterior análisis de pérdidas de agua, el cual hasta la fecha contempla los criterios de cálculo definidos a lo largo de este estudio como 'opciones predeterminadas'. A lo largo del proyecto citado se seguirá trabajando en la vinculación de diferentes partes del algoritmo propuesto con la plataforma. A continuación se presentan algunos de los módulos y ventanas de interfaz de esta plataforma:

- **Herramienta para el seguimiento del consumo de cada sector.** Con esta herramienta, el gestor puede realizar la detección de tendencias o anomalías en el consumo y tener acceso a los resultados del análisis de las variables de forma diaria y priorizar actuaciones en los diferentes sectores. Las principales características de esta herramienta son: selección de diferentes áreas o sectores de consumo, evolución de volúmenes distribuidos y comparación con los valores previstos y desglose del volumen distribuido en consumos, pérdidas reales y aparentes, y acceso a un informe diario con valores del resultado del cálculo del CMN y pérdidas de agua.



Figura 5| Seguimiento del volumen de demanda diaria por sector y acceso a informe diario

Para cada uno de los días analizados (barras verticales), la plataforma WatEner muestra un informe diario de operación con la representación de las series temporales y un resultado de indicadores relevantes para el análisis del sector como son: componentes del Agua No Registrada (ANR) y resultados del análisis del CMN. El informe diario está configurado para entregar la siguiente información: curvas de caudal (medidas y previstas) y presión en 24h, curva de caudal de fuga de fondo basado en metodología del CMN y monitorización de la presión. Además, permite acceder al registro histórico de cualquier set de datos.

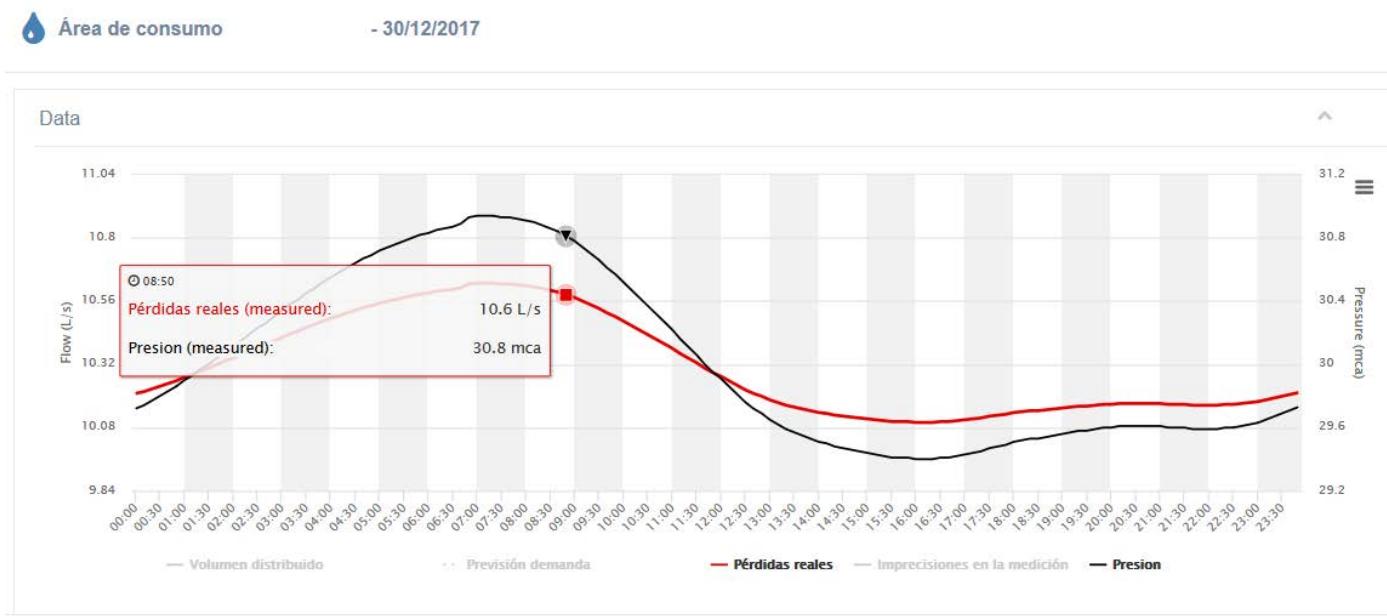


Figura 6| Relación del caudal de fuga y evolución de la presión media

En la gráfica superior, se puede observar la relación entre el caudal de fuga (línea roja) y la presión media de un sector (línea negra), esta relación queda definida con el exponente N1 de según la metodología descrita (mediante análisis SIG de la red). Finalmente, la agregación de estos caudales resulta en la generación de indicadores de ANR y sus componentes de Pérdidas reales y aparentes. Igualmente la plataforma, muestra información específica acerca del cálculo del CMN para cada día. De esta forma es posible analizar en detalle posibles anomalías de caudal-presión y por tanto, permite una detección temprana de fugas en las diferentes áreas de la red de distribución y transporte.

Información relacionada	
Datos relacionados	Anomalías relacionadas
INDICADORES GENERALES	
Volumen distribuido	12793 m ³
Previsión de demanda	12775 m ³
COMPONENTES ANR	
Consumo autorizado registrado	10741 m ³ 84.0%
Consumo autorizado no registrado	
Pérdidas aparentes	
Consumo no autorizado	
Imprecisione equipos de medida	14.7 m ³ 0.11491%
Pérdidas reales	824 m ³ 6.442%
INFORMACIÓN DEL CAUDAL MÍNIMO NOCTURNO	
Caudal Mínimo Nocturno	59.9 L/s
Valor de referencia para CMN	50.3 L/s
Hora del CMN	02:00:00

Figura 7| Informe diario de operación con resultado de componentes del ANR

- **Sistema de monitoreo del Caudal Mínimo Nocturno** que permite la detección temprana de fugas y la estimación de pérdidas reales. Actualmente con la plataforma es posible el cálculo del CMN (con metodología descrita con descarte de anómalos y falsos mínimos) para la estimación del volumen de fugas de fondo. Sobre esta herramienta se levanta un sistema de alerta por superación de umbrales de Caudal Mínimo Nocturno.

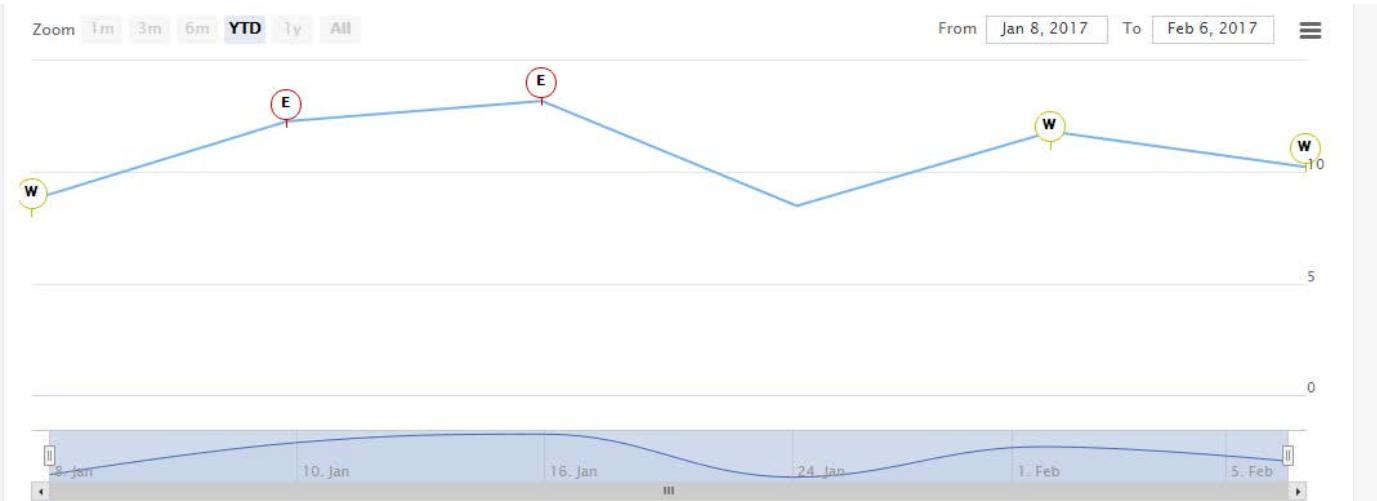


Figura 7| Sistema de alarma de Caudal Mínimo Nocturno

- La plataforma WatEner realiza el **cálculo del balance hídrico**, según la metodología mixta (arriba-abajo, abajo-abajo), de forma automática integrando por un lado, los diferentes componentes de consumos y, por otro, los cálculos propios de pérdidas de agua basados en el análisis continuo de las variables en la red para la estimación del CMN y pérdidas reales, según la metodología descrita en el presente documento. El balance hídrico representa un método ideal para ejecutar un diagnóstico global del sistema a medio y largo plazo. Permite planificar y priorizar estrategias correctivas, provenientes de los resultados obtenidos mediante este análisis, enfocadas a la reducción del ANR.

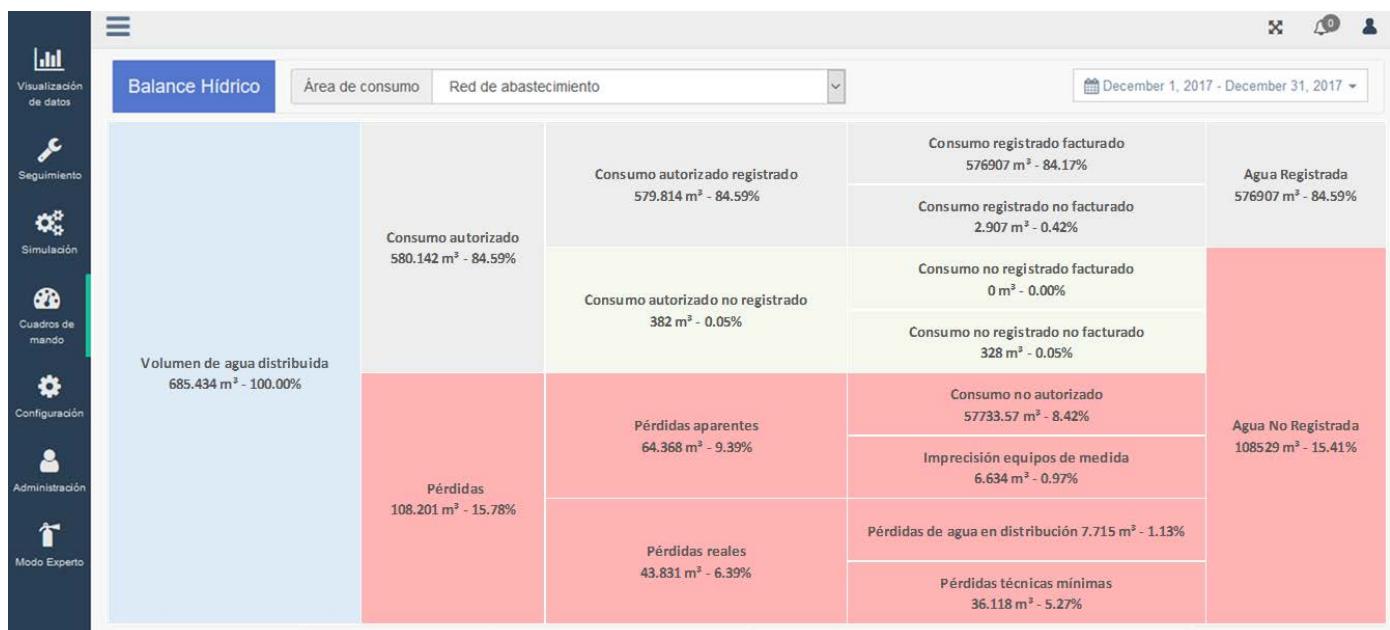


Figura 7| Herramienta de balance hídrico y desglose de componentes de pérdidas de agua en diferentes áreas

Conclusiones

El método del CMN es un concepto ampliamente utilizado tanto en el ámbito académico-científico como en la práctica profesional debido a su fácil aplicabilidad y al gran número de objetivos para los que puede ser utilizado.

De la recolección de un amplio número de casos de estudio relacionados con este concepto y su exhaustivo análisis se han podido extraer una serie de conclusiones. En primer lugar, aunque este método ha sido ampliamente utilizado, pocos documentos recogen de forma organizada los pasos a acometer y los valores que deben asignarse en función de los datos disponibles o del tipo de sector analizado. Esto hace que exista una gran heterogeneidad de submétodos y criterios, lo cual a su vez desemboca en una gran incertidumbre en los cálculos realizados. En segundo lugar, se han encontrado diferentes objetivos para los que se ha implementado esta metodología. En este sentido los dos más destacados son: (a) el cálculo de caudal fugado a lo largo del día y (b) evaluación del impacto de planes de reducción de presiones. Además, existen otras finalidades como la detección de nuevas fugas asociadas a roturas y la estimación de consumos nocturnos. Cada tipo de objetivo tiene sus propias particularidades por lo que debe tenerse en cuenta a la hora de seleccionar los criterios de cálculo.

Se ha desarrollado un algoritmo de cálculo que contempla múltiples posibilidades de cálculo en función de las características de la zona de estudio, de los datos disponibles y de los objetivos perseguidos. Esto permitirá que el código de cálculo se adapte a múltiples escenarios y por tanto la aplicación del método del CMN a través de esta herramienta sea más generalizable. Para ello, el algoritmo se ha estructurado en una serie de pasos principales, en cada uno de los cuales se integran diferentes submétodos. Estos pasos son cuatro: (i) cálculo de CMN, (ii) desagregación de éste valor en subcomponentes, (iii) cálculo de presión media y (iv) determinación de exponente N1. Algunos de los métodos están supeditados a algún factor (tipos de datos disponibles, existencia de modelos numéricos) y otros pueden seleccionarse siempre que se desee bajo el criterio experto del usuario. Además, en varios pasos el algoritmo propondrá el mejor método en función de las particularidades de cada caso. Esta capacidad de configuración y adaptación del algoritmo permitirá reducir significativamente la incertidumbre de los cálculos. Por último, la inclusión de un algoritmo de este tipo en una plataforma informática consolidada como WatEner supone un gran avance en el desarrollo no sólo en el ámbito académico-científico sino también en el contexto de la práctica profesional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de CIMNE a través del Programa CERCA/Generalitat de Catalunya. También agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) a través del proyecto ‘SMILER - Desarrollo de un Sistema basado en MachIne LEarning para la Reducción de pérdidas en redes de distribución de agua’(RTC-2017-6324-5) de la convocatoria del plan nacional de I+D+i orientada a retos sociedad ‘Retos Colaboración 2017’.

REFERENCIAS

- Adlan, M. N., Alkasseh, J., Abustan, I., and Hanif, A. B. M. (2013). Identifying the appropriate time band to determine the minimum night flow: a case study in Kinta Valley, Malaysia. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13(2), 328-336
- Alkasseh, J. M., Adlan, M. N., Abustan, I., Aziz, H. A., & Hanif, A. B. M. (2013). Applying minimum night flow to estimate water loss using statistical modeling: a case study in Kinta Valley, Malaysia. *Water resources management*, 27(5), 1439-1455.
- AL-Washali, T., Sharma, S., AL-Nozaily, F., Haidera, M., Kennedy, M. (2019). Modelling the Leakage Rate and Reduction Using Minimum Night Flow Analysis in an Intermittent Supply System. *Water*, 11(1), 48.
- Babić, B., Đukić, A., and Stanić, M. (2014). Managing water pressure for water savings in developing countries. *Water SA*, 40(2), 221-232.
- Charalambous, B. and Hamilton, S. (2011). Water Balance–The Next Stage. *Water Utility Journal*, (1), 3-10.

- Cheung, P. B., Girol, G. V., Abe, N., and Propato, M. (2010). Night flow analysis and modeling for leakage estimation in a water distribution system. *Integrating water systems: proceedings of the 10th International Conference on Computing and Control*, 2010, London. Taylor & Francis Group, 509-514.
- Covas, D., Jacob, A., and Ramos, H. (2006). Bottom-up analysis for assessing water losses: A case study. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*, Cincinnati, Ohio, USA. August 2006.
- Eugine, M. (2017). Predictive Leakage Estimation using the Cumulative Minimum Night Flow Approach. *American Journal of Water Resources*, 5(1), 1-4.
- Fantozzi, M., Calza, F. and Kingdom, A. (2009). Introducing Advanced Pressure Management at Enia utility (Italy): experience and results achieved. *IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2009'*. Cape town, South Africa. 26-29 April.
- Fantozzi, M. and Lambert, A. (2010). "Recent developments in pressure management". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Leakage 2010*, IWA, Sao Paulo, Brazil, Jun. 06-09, 2010.
- Farah, E., Shahrour, I. (2017). Leakage detection using smart water system: combination of water balance and automated minimum night flow. *Water Resources Management*, 31(15), 4821-4833.
- Fontana, N., Giugni, M., & Marini, G. (2017). Experimental assessment of pressure-leakage relationship in a water distribution network. *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(3), 726-732.
- Fontana, N., Giugni, M., Glielmo, L., Marini, G., and Zollo, R. (2017b). Real-time control of pressure for leakage reduction in water distribution network: Field experiments. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(3), 04017096.
- Gao, J., Yao, F., Xu, Y., Sun, G., Zheng, C., Qi, S., and Cui, F. (2017). Analysis Model of Physical Leakage Flow Based on Blind Source Separation Theory. *Procedia Engineering*, 186, 269-277.
- Garcia, V. J., Cabrera, E., Garcia-Serra, J., Arregui, F., & Almandoz, J. (2003). Stochastic prediction of the minimum night flow demand in a district metered area. *Advances in Water Supply Management*, 665-672.
- García, V.J., Cabrera, E., Cabrera, E. Jr. (2006). The minimum night flow method revisited. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA. Agosto 2006*.
- Girard, M., and Stewart, R. A. (2007). Implementation of pressure and leakage management strategies on the Gold Coast, Australia: case study. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(3), 210-217
- Gomes, R., Sa Marques, A., and Sousa, J. (2011). Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 8(2), 65-77.
- Hunaidi O. and Brothers, K. (2007). Night Flow Analysis of Pilot DMAs in Ottawa. *IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007'*. Bucharest, Romania. September 23-26.
- Kabaasha, A. M., Van Zyl, J. E., and Piller, O. (2016). Modelling Pressure: Leakage Response in Water Distribution Systems Considering Leak Area Variation. *14th CCWI international conference, Computing and Control in Water Industry*, Nov 2016, Amsterdam, Netherlands. 7 p.
- Kalinkov, P., Vladov, G., and Radovanov, V. (2011). Studies and procedures of water loss reduction in the water supply system of the town of Vidin. *Water Utility Journal*, (1), 11-17
- Kanakoudis, V., and Gonelas, K. (2016). Analysis and calculation of the short and long run economic leakage level in a water distribution system. *Water utility Journal*, 12, 57-66.
- Karadirek, I. E., Kara, S., Yilmaz, G., Muhammetoglu, A., and Muhammetoglu, H. (2012). Implementation of hydraulic modelling for water-loss reduction through pressure management. *Water resources management*, 26(9), 2555-2568.

Lambert, A. O. (2002). "International report: water losses management and techniques". *Water Sci. Technol.: Water Supply*, 2(4), 1-20

Lee, H., Chung, S., Yu, M., Koo, J., and Hyun, I. (2005). Applicable background minimum night flow for leakage management of small district metered areas in Korea. *Water Science & Technology: Water Supply*, 5(3-4), 181-188

Loureiro, D., Alegre, H., Teixeira Coelho, S. and Borba, R. (2012). A new approach to estimating household night consumption at DMA level. *IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2012'*. Manila, Philippines.

Loureiro, D., Amado, C., Martins, A., Vitorino, D., Mamade, A., and Coelho, S. T. (2016). Water distribution systems flow monitoring and anomalous event detection: a practical approach. *Urban Water Journal*, 13(3), 242-252.

Marunga, A., Hoko, Z. and Kaseke, E. (2006). Pressure management as a leakage reduction and water demand management tool: The case of the City of Mutare, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(15), 763-770.

Mckenzie, R., Meyer, N., Lambert, A. (2002). *Hour-Day Factor Model: Calculating Hour-Day Factors for potable water distribution systems in South Africa*. South African Water Research Commission, Report No.TT 184/02. ISBN 1 86845 8792.

McKenzie, R. S., Mostert, H., and De Jager, T. (2004). Leakage reduction through pressure management in Khayelitsha: Two years down the line. *Water SA*, 30(5), 13-17.

Mckenzie R. S., Wegelin, W. (2009). Implementation of Pressure Management in Municipal Water Supply Systems. *EYDAP Conference 'Water: the Day After'*. Atenas, Grecia - Marzo 2009.

Mimi, Z., Abuhalaweh, O. and Wakileh, V. (2004). Evaluation of water losses in distribution networks: Rarnmallah as case study. *Water Science & Technology: Water Supply*, 4(3), 183-195.

Parra, S., and Krause, S. (2017). Pressure management by combining pressure reducing valves and pumps as turbines for water loss reduction and energy recovery. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(1), 89-97.

Paskalev, A., Ivanov, S. and Tanev, M. (2011). Water loss reduction in Razgrad demonstrative project through active leakage control, pressure management and the relationship between pressure management and leakage: The case of Kooperative Pazar DMA. *Water Utility Journal*, (2), 3-21

Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25-45.

Renaud, E., Sissoko, M. T., Clauzier, M., Gilbert, D., Sandraz, A.C. and Pillot, J. (2015). Comparative study of different methods to assess average pressures in water distribution zones. *Water Utility Journal* 10, 25-35.

Ribeiro, L., Sousa, J., Marques, A., & Simões, N. (2015). Locating leaks with trustrank algorithm support. *Water*, 7(4), 1378-1401.

Ristovski, B. (2011). Pressure management and active leakage control in particular DMA (Lisiche) in the city of Skopje, FYROM. *Water Utility J*, 2, 45-49.

Tabesh, M., Yekta, A. A., and Burrows, R. (2009). An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. *Water resources management*, 23(3), 477-492.

U.K. Water Industry. (1994). *Managing leakage—Report F: Using Night Flow Data*. UK Water Industry, Engineering and Operations Committee, WRc/WSA/WCA, London, Unite Kingdom.

Vicente, D. J. (2017). *Diseño de maniobras de gestión de presiones en sectores de distribución de agua y análisis de su impacto*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.47909>.

Wu, S., Yang, L., Zhou, C., and Zhang, J. (2013). Analysis of Benefits Yielded by Pressure Management in the Area based on Temperature Revision. *In ICPTT 2013: Trenchless Technology* (pp. 127-140)

Xin, K., Li, F., Tao, T., Xiang, N., and Yin, Z. (2015). Water losses investigation and evaluation in water distribution system—the case of SA city in China. *Urban Water Journal*, 12(5), 430-439.