

Desarrollo de un modelo económico para la gestión de contadores de agua instalados en batería en redes de abastecimiento

Development of an economic model for the optimal management of water meters installed in banks inside buildings in water supply network

Hernández-García, A.^{a1}, Bazán, L.A.^{a2}, Valera-Talavera, O.^{a3}, Arregui-de la Cruz, F.^{a4}

^{a1}ITA-Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n Valencia 46022, España. E-mail: ^{a1}alherga8@posgrado.upv.es, ^{a2}lauba2@etsii.upv.es, ^{a3}ovata@globalomnium.com, ^{a4}farregui@ita.upv.es

Recibido: 01/08/2019

Aceptado: 19/12/2019

Publicado: 31/01/2020

Citar como: Hernández-García, A, Bazán, L.A., Valera-Talavera, O., Arregui-de la Cruz, F. (2020). Development of an economic model for the optimal management of water meters installed in banks inside buildings in water supply network. *Ingeniería del agua*, 24(1), 1-13. <https://doi.org/10.4995/ia.2020.12164>

RESUMEN

Reducir las pérdidas aparentes debidas a las inexactitudes de los contadores de agua, conocer la vida útil de los contadores o mejorar la eficiencia del parque de contadores de agua son algunos de los objetivos de las compañías de abastecimiento de agua. En este artículo se presenta el desarrollo de un modelo económico que le permite a las empresas conocer cuál es el tiempo óptimo de renovación de los contadores de agua instalados en batería y gestionar la sustitución de los mismos, con el objetivo de mejorar la eficiencia del parque de contadores de agua y mejorar el beneficio neto que obtienen las empresas por los volúmenes de agua registrada. El modelo económico estudia el estado de las baterías de contadores, localizando aquellas que se encuentran en peor estado metrológico y que, por lo tanto, deben sustituirse con mayor prioridad, y busca la ruta óptima que deben seguir los operarios para reducir los costes de desplazamiento de las labores de sustitución.

Palabras clave | modelo económico; parque de contadores; vida útil; error global.

ABSTRACT

One of the key objectives of water distribution companies is to reduce apparent losses caused by water meters inaccuracies, to know the useful life of water meters and to improve the overall efficiency of the meters installed in the system. This article details the development of an improved economic model that allows for a more accurate calculation of the useful life of water meters installed inside buildings, in meter banks. The new methodology improves water meter management, reduces costs and increases the water utility revenue by making the replacement activities of those meters more efficient. The new economic model searches for residential buildings in which the meters are installed in meter banks and have the worse metrological conditions. The economic model makes a selection of the meters in those buildings that need to be replaced and the ones that can be left in the bank. Then, the new economic model searches for the buildings nearby that need to be visited to optimize the travelling time of the water meter replacement teams and to minimize the installation costs.

Key words | economic model; water meter park; useful life; global error.

INTRODUCCIÓN

Controlar y reducir el agua no registrada (ANR o NRW por sus siglas en inglés *Non-Revenue Water*) es una de las principales preocupaciones de las compañías de abastecimiento. La International Water Association (IWA) clasifica al ANR según su naturaleza, en pérdidas reales o físicas, siendo aquellas producidas por fugas en tuberías, roturas o desbordamientos, y en pérdidas aparentes o comerciales, siendo aquellas debidas a inexactitudes en la medición, errores en la manipulación de datos o consumos no autorizados.

En el año 2018, el Instituto Nacional de Estadística (INE) publicó un estudio sobre el suministro y saneamiento del agua en España referido al año 2016. El análisis destaca que durante ese año se suministraron a las redes públicas de abastecimiento urbano 4290 hm³ de agua. De ese volumen, casi tres cuartas partes (3200 hm³) fue agua registrada por los contadores de los usuarios y, el resto (1090 hm³) fueron volúmenes de ANR. Teniendo en cuenta que, en ese año, el coste unitario total del suministro de agua y saneamiento alcanzó los 1.95 €/m³, el ANR supuso a las empresas de abastecimiento una pérdida económica de aproximadamente 2125 millones de euros. Según el análisis publicado, las pérdidas reales se estimaron en 701 hm³, lo que supone un 16.7% del total de agua suministrada a las redes. Por otra parte, las pérdidas aparentes fueron de 389 hm³ (Instituto Nacional de Estadística, 2018).

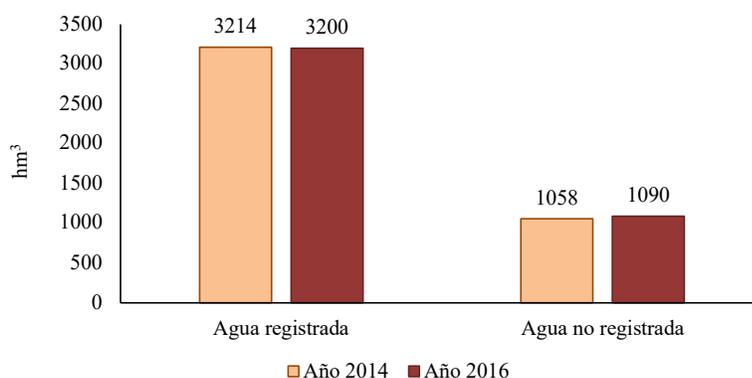


Figura 1 | Volúmenes de agua suministrados a la red en hectómetros cúbicos. *Fuente:* Estadística sobre el suministro y saneamiento del agua en el año 2016 - Instituto Nacional de Estadística (INE).

Las pérdidas reales representan un porcentaje superior en términos de volumen frente a las pérdidas aparentes. No obstante, dependiendo del coste de producción y distribución, las pérdidas aparentes pueden superar a las reales en términos financieros. Las pérdidas aparentes se relacionan con el agua que se consume pero que no se paga, lo que implica una pérdida de ingresos apreciable para las empresas y una distorsión en la integridad de los datos de consumos empleados para decisiones de gestión y análisis.

Numerosos investigadores destacan en sus publicaciones que las inexactitudes de los contadores de agua son la principal razón de existencia de las pérdidas aparentes (Szilveszter et al., 2015). Los medidores de agua permiten el control y monitoreo de los volúmenes de agua suministrados a la red, por ello, garantizar el buen funcionamiento y calidad metrológica de estos aparatos es fundamental para minimizar el impacto de estas pérdidas en los sistemas de abastecimiento.

Con el tiempo y uso, los contadores de agua envejecen y los volúmenes de ANR tienden a aumentar. Aunque medidores desgastados pueden seguir funcionando, las pérdidas económicas hacen inevitable su sustitución (Arregui et al., 2011). Por ello, es importante controlar el funcionamiento de los parques de contadores de agua implementando una gestión de sustitución de aquellos aparatos que estén deteriorados. En este sentido, planificar y gestionar la renovación de los parques de contadores de agua es una medida preventiva que lleva consigo la reducción de las pérdidas de agua y el aumento de beneficios financieros, ambientales y sociales. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las renovaciones suponen un coste financiero significativo y que una incorrecta administración puede suponer un incremento sustancial de los costes. Por tanto, las empresas deben buscar un equilibrio entre la inversión necesaria para reducir las pérdidas y las ganancias obtenidas de dichas inversiones, asegurando que, los beneficios sean mayores que los costes (Vindas Villalobos, 2005).

Actualmente, existen modelos que permiten conocer cuál es el tiempo óptimo de reemplazo que aseguran una maximización de los beneficios obtenidos de un contador de agua (Male et al., 1985; Planells et al., 1987; Allender 1996; Taborda y Anunciação, 1997; Yee, 1999; Arregui-de la Cruz et al., 2007). Los modelos propuestos calculan la vida útil de cada contador instalado en una ciudad, basándose en la evaluación del coste total que supone el tiempo que permanece el aparato en servicio, es decir, evaluando cuándo un contador genera más o menos ingresos a lo largo de su vida. Para ello, los modelos emplean unos costes fijos de adquisición, sustitución y administración del contador nuevo. Sin embargo, la realidad actual es que la gran mayoría de los abastecimientos tienen los contadores de agua instalados en baterías, por lo que, el análisis de la vida útil (VU) debe realizarse teniendo en cuenta este factor y sus implicaciones en el coste de sustitución.



Figura 2 | Contadores de agua instalados en batería dentro de un edificio.

En este sentido conviene tener en cuenta que los costes de adquisición, administración y montaje de los contadores nuevos se vuelven insignificante en comparación con los costes que suponen los desplazamientos de los operarios hasta las baterías. Una vez el operario sustituye un contador, conocer a priori los contadores que convendría sustituir en esa misma batería y las baterías más cercanas que están en peor estado es fundamental para reducir los costes de desplazamiento ocasionados.

La reducción de los costes lleva ligada consigo un aumento de los beneficios de la empresa y, por ende, la posibilidad de aumentar el mantenimiento y la frecuencia de renovación de los parques de contadores de agua, garantizando así una mayor calidad metrológica de los contadores instalados.

El modelo económico que se presenta en este artículo emplea las particularidades de los modelos ya existentes adaptándolos a la situación actual con el objetivo de simular de manera más precisa la realidad. El modelo desarrollado, por un lado, analiza las baterías de los contadores de agua en conjunto, localizando aquellas que estén en peor estado y que necesiten una sustitución más inmediata, por otro lado, busca la ruta más óptima que deben seguir los operarios de las empresas para sustituir dichas baterías. El modelo presentado trata de abordar dos de los objetivos actuales que persiguen las entidades abastecedoras, garantizar el buen funcionamiento de la medición llevando a cabo un control más exhaustivo del parque y renovaciones más frecuentes que permitan mejorar la eficiencia de la medición, reducir los costes y aumentar los beneficios de la empresa llevando a cabo una gestión de sustituciones planificada. Asimismo, la consecución de estos objetivos les permite a las empresas garantizar un mejor control de los volúmenes de agua no registrados.

MATERIAL Y MÉTODOS

Esquema del procedimiento

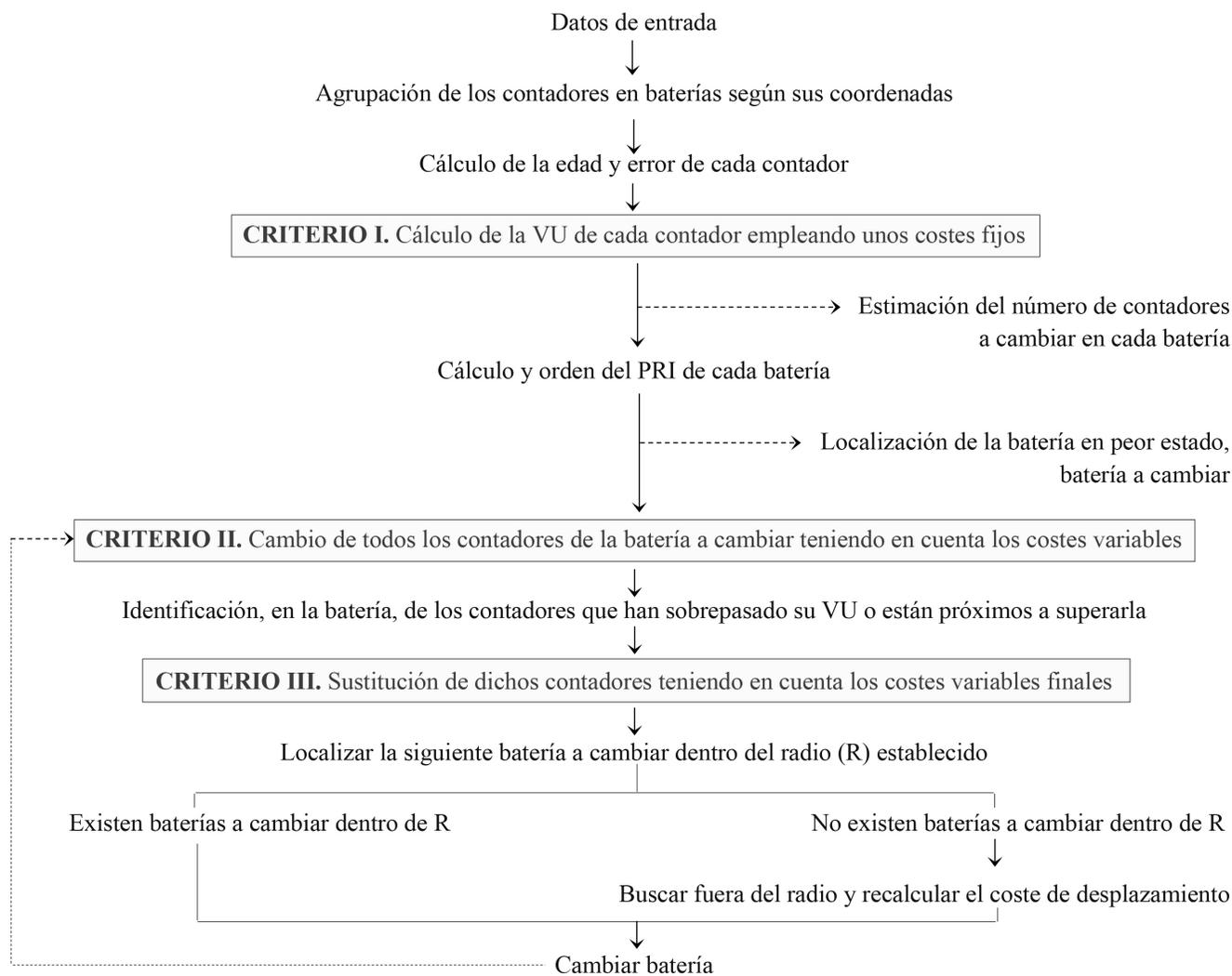


Figura 3 | Diagrama de flujo del funcionamiento del modelo económico desarrollado por pasos.

Criterios de cálculo

El modelo económico que se expone en este artículo sigue tres criterios diferentes para el cálculo de la vida útil (VU) de los contadores de agua.

Criterio I:

Emplea la metodología de los modelos económicos que existen actualmente, es decir, calcula la VU de cada contador individualmente, considerando como tiempo óptimo de reemplazo de un medidor aquel año en el que habiendo recuperado la inversión que realizó en la instalación del aparato, dicho contador deja de proporcionar beneficios a la empresa al estar sujeto a un

importante error de medición. Los ingresos que proporciona un contador de agua instalado se calculan como la diferencia entre lo que se invierte en su instalación y lo que se gana con su instalación (Ecuación 1).

$$\text{Ingresos} = -C_{\text{compra}} - C_{\text{instalación}} - C_{\text{administración}} + \sum_{i=1}^n V_i \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}}{(1 + r')^{i-1}} \quad (1)$$

Donde C_{compra} , $C_{\text{instalación}}$, $C_{\text{administración}}$ suman los costes iniciales (C_i) y son, respectivamente, los costes de adquisición del contador, el coste de instalación del mismo y el coste de administrativo necesario para llevar a cabo la sustitución (€), V_i es el volumen promedio consumido por los usuarios a lo largo del tiempo (m^3), ε_i es el error de medición promedio a lo largo del tiempo (%), $C_{\text{H}_2\text{O}}$ es el coste por agua consumida (€/m^3) y r' es la tasa de actualización real que representa el valor monetario a lo largo del tiempo (%).

Los costes iniciales (C_i) son aquellos que la empresa invierte al inicio de la sustitución y que recupera a lo largo de la vida útil del contador con los ingresos que generan las facturas del agua consumida. Se considera que los C_i son proporcionales a la calidad metrológica del contador. De manera que, un contador más preciso o, lo que es lo mismo, con una mayor calidad metrológica, será más costoso y supondrá una recuperación a largo plazo más duradera.

El último término de la Ecuación (1) hace referencia a las pérdidas que supone el agua no contabilizada, por lo que, aumenta a lo largo del tiempo a medida que aumenta el ANR.

El criterio I calcula el valor actual de los ingresos por agua contabilizada (VAN). Este parámetro representa la diferencia entre lo que gana la empresa con la instalación del contador y lo que invirtió en ella. De esta forma se pueden conocer los ingresos que proporciona un contador en un año determinado.

Para el cálculo de la VU se emplea el Valor Actual Neto de la Cadena de renovaciones (VANC). Este parámetro permite identificar el VAN de una sucesión infinita de renovaciones (Ecuación 2), donde la frecuencia óptima de renovación o VU será igual al año que menor valor de VANC tenga, es decir, el año que menos pérdidas presenta.

$$VANC = VAN \cdot \frac{(1 + r')^i}{(1 + r')^i - 1} \quad (2)$$

Más detalles sobre el cálculo en el libro “Gestión Integral de los contadores de agua, 2007” (Arregui-de la Cruz et al., 2007).

Criterio II:

Calcula el tiempo óptimo de reemplazo de los contadores siguiendo la metodología explicada en el criterio I. Sin embargo, a diferencia del anterior, este criterio realiza los cálculos teniendo en cuenta un procedimiento de cálculo más preciso para el término correspondiente a la instalación de contadores en batería. Para ello, modifica el cálculo de los costes iniciales, empleando unos costes variables (Ecuación 3).

Los costes de instalación se desglosan en costes de montaje y costes de desplazamiento. El coste de montaje varía dependiendo del diámetro y número de contadores a instalar en una batería, a mayor diámetro y mayor número de contadores, mayor es el coste. Y el coste de desplazamiento depende de la distancia y tiempo recorrido por los operarios entre las baterías a reemplazar.

$$C_i = C_{\text{compra}} + C_{\text{administración}} + C_{\text{montaje}} + C_{\text{desplazamiento}} \quad (3)$$

En el criterio II se simula una sustitución total de los contadores instalados en la batería, por lo que, realiza el cálculo de la vida útil teniendo en cuenta dentro de sus costes iniciales la sustitución de todos los contadores de la batería. Se representa así el caso más favorable que se puede dar, ya que, sustituir las baterías al completo supone una reducción de los costes de desplazamiento al mínimo. Esto hace que el resultado de VU de los contadores se reduzca al mínimo al recuperar antes la inversión. Este caso supone una mejora total en la eficiencia del parque de contadores, sin embargo, se estarían cambiando instrumentos que pueden seguir perfectamente en funcionamiento con un rendimiento adecuado. Por ello, este criterio se emplea como aproximación para conocer el número final de contadores a cambiar y no proporciona la opción de menor coste.

Criterio III:

Al igual que el criterio II, tiene en cuenta la instalación de contadores en batería empleando unos costes iniciales variables, pero cambia sólo aquellos contadores de cada batería que se consideraron, con el Método 2, que han sobrepasado su VU o que están próximos a superarla. Para conocer cuándo un contador ha superado su vida útil, basta con restarle a este parámetro la edad del contador.

Procedimiento

El modelo económico que se presenta en este artículo se desarrolla en lenguaje VBA y su funcionamiento se explica a continuación por pasos.

En las tablas 1 y 2 se presentan los parámetros de entrada más relevantes necesarios para la utilización del modelo económico. En cada caso, las empresas suministradoras de agua tendrán que emplear los valores de los parámetros que mejor definen su abastecimiento y realizar las suposiciones que sean necesarias en función de la calidad de los datos de partida.

Tabla 1 | Parámetros generales de entrada al modelo económico.

| Parámetros de entrada (Ud.) | Descripción |
|---------------------------------------|--|
| Coordenadas UTM | Ubicación de los edificios donde se encuentran los contadores instalados |
| DN (mm) | Diámetro nominal de cada contador del parque |
| Consumo medio anual (m ³) | Consumo anual de los usuarios |
| Tipo de uso | Uso al que se destina la medición del contador: Doméstico, industrial, riego o docente |
| Tipo de tarifa | Tarifa fija o por bloques |
| Fecha de instalación | - |
| Volumen totalizado (m ³) | Volumen registrado por el contador hasta la fecha actual |
| Ritmo de deterioro (%/año) | Ritmo al que se deteriora la medición de los contadores |
| Error inicial (%) | Error de medición que presenta el contador en su primer año de instalación |
| Radio (m) | Radio dentro del cual los $C_{desplazamiento}$ son mínimos |

Tabla 2 | Parámetros económicos de entrada al modelo económico.

| Parámetros de entrada (Ud.) | Descripción |
|------------------------------------|--|
| Coste de adquisición (€) | Coste fijo por la compra del contador |
| Coste de administración (€) | Coste fijo administrativo por la instalación del contador |
| Coste de instalación (€) | Coste fijo por la instalación del contador |
| Coste mínimo de desplazamiento (€) | Coste que supone el desplazamiento dentro del radio fijado |
| Coste de desplazamiento (€/km) | Coste que supone el desplazamiento de los operarios |
| Coste de mano de obra (€/h) | Coste que suponen las horas trabajadas |
| Coste del agua (€/m ³) | Depende de la tarifa y del uso al que se destine el agua |
| Tasa de actualización (r') (%) | - |

Paso 1

Dentro de los parámetros se tiene en cuenta la ubicación en la que se encuentran los medidores instalados en el parque de contadores en estudio (Tabla 1). Aquellos medidores cuyas coordenadas UTM sean iguales o estén dentro de una tolerancia fijada, se agrupan en la misma batería y se les asigna el mismo código identificativo.

Paso 2

Una vez agrupados los contadores en baterías, se calcula la VU de cada contador individualmente empleando el “Criterio I” explicado con anterioridad en este artículo. De esta forma se obtiene un número estimado de los contadores que hay que sustituir porque han superado su VU o están próximos a ello.

Paso 3

Antes de aplicar los siguientes criterios y teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales de este modelo es planificar las sustituciones de los medidores, se analizan todas las baterías para conocer aquellas que están en peor estado y que, por lo tanto, deben sustituirse con mayor prioridad. Para ello, se emplea el parámetro de Periodo de Retorno de la Inversión (PRI).

$$PRI_{batería} = \frac{\sum C_i}{\sum \Delta_{ingresos}} = \frac{\sum C_i}{\sum (V_r \cdot \Delta \epsilon) \cdot C_{H2O}} \quad (4)$$

Donde $PRI_{batería}$ es el periodo de retorno de la inversión de cada batería (años); C_i son los costes iniciales (€); $\Delta_{ingresos}$ es la mejora de los ingresos que supone la sustitución de los contadores (%/año); V_r es el consumo medio anual real de los usuarios (m^3), $\Delta \epsilon$ es la mejora del error de medición que supone sustituir un contador por otro nuevo sometido a menor error (%) y C_{H2O} es el coste por agua consumida ($€/m^3$).

El parámetro PRI (Ecuación 4) representa la relación que existe entre lo que invierte la empresa en la sustitución de los contadores de una batería (C_i) frente lo que ganaría la empresa de más si lleva a cabo esa sustitución ($\Delta_{ingresos}$). El parámetro permite conocer el tiempo que tarda la empresa en recuperar una inversión realizada, de manera que, un menor valor de $PRI_{batería}$ significa una gran recuperación de los ingresos ($\Delta_{ingresos}$) frente a lo que supone la inversión (C_i).

El presente modelo realiza una primera aproximación del PRI de cada batería teniendo en cuenta los costes fijos que supone la sustitución de los contadores que se consideró con el criterio I que debían sustituirse. La batería con menor $PRI_{batería}$ será, por lo tanto, la primera batería a sustituir.

Paso 4

Una vez localizada la batería en peor estado, se recalcula la VU de los contadores de esa batería aplicando el criterio II. Para ello, se calculan los costes iniciales variables teniendo en cuenta la inversión que supone una sustitución completa de la batería. En este caso el coste de montaje será el máximo que se puede dar, en cambio, el coste de desplazamiento es el mínimo posible, ya que, se divide por todos los contadores que componen la batería. Con la aplicación de este criterio se obtiene el tiempo de renovación mínimo de los medidores y el número final de contadores que deben ser sustituidos.

Paso 5

Se aplica el criterio III para conocer la VU final de los contadores que deben ser reemplazados en la batería en estudio. Para su cálculo, se recalculan los costes iniciales variables y se estima el tiempo de sustitución de la batería.

Paso 6

La aplicación de este paso garantiza la planificación de las sustituciones y la disminución de los gastos que estas suponen. El modelo establece un radio (Tabla 1) desde la batería que se cambió, en el que los costes de desplazamiento son mínimos y, busca dentro de ese radio, la siguiente batería en peor estado, es decir, la batería con menor $PRI_{batería}$. Existen dos posibilidades:

- Existen baterías dentro del radio: en este caso, el coste de desplazamiento es igual al coste mínimo (Tabla 2).
- No existen baterías: se busca la siguiente batería a cambiar fuera del radio recalculando los costes que supone el desplazamiento desde la batería actual hasta la siguiente gracias a las coordenadas UTM (Tabla 1).

Una vez localizada la siguiente batería, el modelo vuelve a ejecutar el paso 4 hasta que todas las baterías queden analizadas.

Cabe destacar que, si el tiempo de sustitución de las baterías anteriores es superior a la jornada laboral de un operario, el modelo vuelve al paso 1 y busca la siguiente batería con menor PRI sin tener en cuenta ningún desplazamiento.

CASO DE ESTUDIO

La funcionalidad y viabilidad del modelo económico desarrollado se comprueba con la creación de un parque de contadores de agua sintético de pequeño calibre. Las características más importantes del parque de contadores sintético se recogen en la Tabla 3.

Tabla 3 | Características principales del parque de contadores sintético.

| Características (Ud.) | Valor |
|---|------------------|
| Nº total de contadores | 50000 |
| Nº total de baterías | 3200 |
| Diámetro Nominal | 15 |
| Error inicial (%) / Ritmo Deterioro (%/año) | -5 / -0.5 |
| Tipo Uso / Tipo Tarifa | Doméstico / Fija |
| $C_{compra} / C_{instalación} / C_{administración}$ (€) | 19 / 12 / 2 |
| Coste mínimo de desplazamiento (€) | 10 |
| Coste de desplazamiento (€/km) | 0.33 |
| Coste de mano de obra (€/h) | 10.39 |
| Coste del agua (€/m ³) | 0.75 |
| Tasa de actualización (r') (%) | 5 |

Los valores de los parámetros de entrada son estimaciones basadas en valores promedio para un abastecimiento de agua típico. El error inicial y ritmo de deterioro (Tabla 3) para contadores de calibre 15 mm se ha obtenido a través de la evaluación de curvas de error resultado de la realización de ensayos a contadores nuevos y usados, respectivamente, realizados en el Laboratorio de Contadores de la Universitat Politècnica de València. Los valores de consumo medio anual para usuarios domésticos (Tabla 1) se han estimado a partir del análisis de patrones de consumo (Gavara-Tortes y Arregui-de la Cruz, 2018). Finalmente, el resto de valores y los valores de los parámetros económicos (Tabla 3) se han definido con la ayuda de catálogos de fabricantes de contadores de agua y con la participación de la empresa colaboradora.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se hace una comparativa de los resultados obtenidos a partir de los siguientes procedimientos de cálculo para estimar la vida útil de los contadores de agua:

- Criterio I (Denominado “C1” de aquí en adelante). Este procedimiento se basa en los modelos económicos existentes (Male et al., 1985; Planells et al., 1987; Allender 1996; Taborda y Anunciaçao, 1997; Yee, 1999; Arregui-de la Cruz et al., 2007) que calculan el periodo óptimo de renovación de cada contador considerando unos costes iniciales fijos e iguales para todos los contadores de un mismo diámetro nominal independientemente de su localización.
- Criterio III (Denominado “C3” de aquí en adelante). Este criterio se basa en el nuevo modelo económico desarrollado que calcula el periodo óptimo de renovación considerando los costes iniciales como costes variables que dependen del grado de concentración de los contadores de agua (instalados en batería o aislados) y su localización geográfica.

El Criterio II no se ha incluido en la comparación de resultados, ya que se define como un procedimiento de cálculo intermedio entre ambos criterios.

Para facilitar el análisis y la interpretación de los resultados se han calculado diferentes indicadores para cada uno de los criterios, los cuales definen tanto los gastos que originan las renovaciones de los contadores a la empresa como los ingresos que estas generan y otros parámetros como el número de contadores que deben ser reemplazados o el error medio del parque de contadores.

Gastos o inversión que realiza la empresa en las sustituciones (€)

Como ya se ha visto, el modelo C1 emplea unos costes fijos para cada contador y el modelo C3 emplea unos costes variables para cada batería. Tener en cuenta, dentro de los costes iniciales, el coste de desplazamiento por separado y planificar la sustitución de los contadores, de manera que, la ruta que siguen los operarios en las labores de sustitución sea la más óptima posible, hace que los costes iniciales se reduzcan empleando el modelo C3 frente al modelo C1. En este caso práctico, los costes iniciales se reducen hasta aproximadamente 95700€.

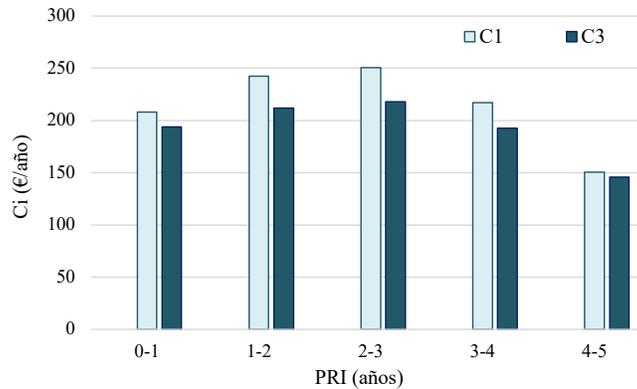


Figura 4 | Promedio de los costes iniciales o inversión que realiza la empresa en la sustitución según el C1 y C3.

Número de contadores a reemplazar (ud)

El número de contadores a reemplazar se calcula como la diferencia de la vida útil de cada contador menos su edad. Si la edad del contador es superior o próximo a su valor de vida útil, se considera que ese contador debe ser sustituido.

Una reducción de la inversión abre la posibilidad a las empresas de llevar a cabo un control más exhaustivo de los parques de contadores de agua, permitiéndoles realizar un mayor número de sustituciones. Con la aplicación del C3 no solo se llegan a sustituir más de 3000 contadores con respecto al C1, sino que la inversión que se realiza es inferior para un mayor número de contadores de agua reemplazados.

Incremento de los ingresos (Δ_{ingresos}) (€/año)

El incremento de los ingresos depende directamente del consumo real de los usuarios (V_r) sujeto a la mejora del error (Δ_e) que supone la sustitución de los contadores deteriorados según cada método y del precio del m³ de agua registrado ($C_{\text{H}_2\text{O}}$) que, en este caso, sólo existe un precio para todos al tratarse de una tarifa fija (Tabla 3). En otras palabras, el Δ_{ingresos} representa las ganancias que supone la sustitución de los contadores, por lo que, a mayor número de contadores sustituidos, mayor es el incremento (Ecuación 5).

$$\Delta_{\text{ingresos}} = V_r \cdot \Delta_e \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} \quad (5)$$

Los contadores de agua deteriorados están sujetos a importantes errores de medición y cada vez, por lo general, contabilizan menos agua de la que realmente están consumiendo los usuarios (Arregui et al., 2011). Esto hace que la empresa sufra pérdidas económicas por ANR. Si contadores muy deteriorados se sustituyen por medidores nuevos con una medición más exacta, la mejora de los ingresos aumenta considerablemente para la empresa. En este caso, la aplicación del C3 permite la sustitución de un mayor número de contadores deteriorados, por lo que, el aumento de los ingresos por agua contabilizada es mayor que con la aplicación del C1 (Tabla 4).

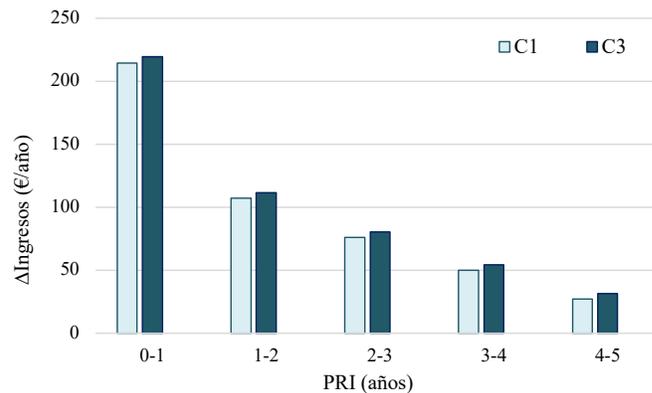


Figura 5 | Promedio del incremento de los ingresos según el C1 y C3.

Ingresos totales (€/año)

Del mismo modo los ingresos totales de la empresa aumentan si se tiene en cuenta la sustitución de las baterías (Tabla 4). Los ingresos totales que proporciona el parque de contadores de agua se calculan como la suma de los ingresos que proporcionan los contadores de agua que no se han sustituido y los ingresos que generan los contadores sustituidos. Siendo superior los ingresos de los contadores reemplazados, ya que, este parámetro depende directamente del agua registrada.

Beneficios totales (€/año)

Los beneficios totales que obtiene la empresa se calculan como la diferencia entre los ingresos totales y los gastos o inversión que se realiza en la sustitución. La contribución de un mayor valor de ingresos del C3 y la reducción de los costes iniciales, implica el aumento de los beneficios de hasta 109900 € aproximadamente (Tabla 4).

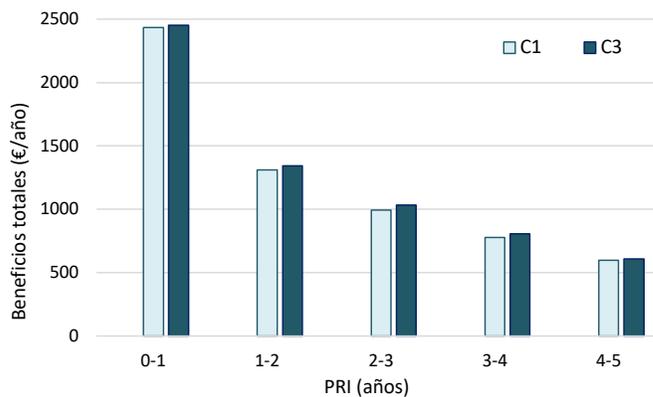


Figura 6 | Promedio de los beneficios totales según el C1 y C3.

La aplicación del C3 supone para la empresa un aumento de 2.20 €/año por contador instalado en el parque. Se puede ver en la Tabla 4 como la reducción de los C_i tiene una repercusión muy significativa, un 87.3%, sobre el aumento de los beneficios.

Periodo de retorno de la inversión (año)

Aplicando la Ecuación 4 se obtiene el tiempo de amortización o recuperación de la inversión realizada en la sustitución. Dado que los costes iniciales son inferiores en el C3 y el aumento de los ingresos es superior, se recupera antes la inversión si se tiene en cuenta este modelo. En la Figura 7 se puede observar la representación del *PRI* que representan todas las baterías de contadores para el C1 (eje abscisas) y el C3 (eje ordenadas) y, se ha trazado una línea vertical que permite analizar el número de

baterías en las que disminuye el *PRI* al aplicar el nuevo modelo. Para baterías con contadores de agua muy deteriorados, el *PRI* es casi igual de inferior para ambos métodos, esto se debe a que la mejora del error si se sustituyen estos contadores es tan elevada que apenas afecta el tipo de inversión que se realice. Sin embargo, para baterías no tan deterioradas se observa que la inversión puede llegar a recuperarse hasta un año antes con la implementación del C3 (Figura 7. Ejemplo: la recuperación de la inversión en la sustitución de una batería con el C1 es de 4 años y con el C3 es inferior a 3 años).

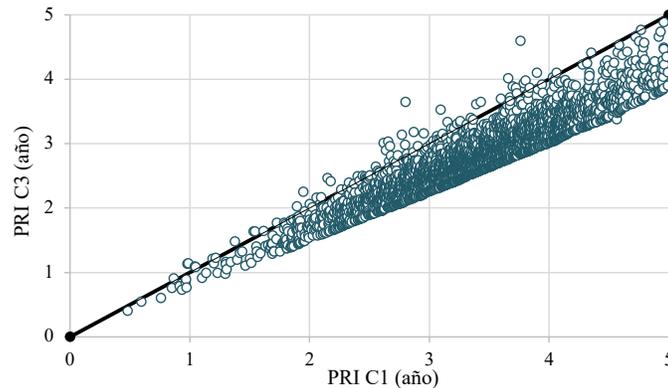


Figura 7 | Periodo de Retorno de la Inversión según el C1 y C3.

Volumen de agua registrada (m^3)

La sustitución de un contador deteriorado por un contador nuevo supone una mejora en la medición y, por lo tanto, un aumento de los volúmenes de agua contabilizada. Este parámetro está directamente relacionado con el error del contador, a mayor error de medición mayor serán los volúmenes de ANR.

Un mayor número de renovaciones da lugar a un parque de contadores de agua más eficiente y, por ende, un parque en el que los volúmenes de agua registrada son mayores. El nuevo modelo o C3 da lugar a una mejora de los volúmenes de agua registrada, haciendo que estos aumenten más de $18000 m^3$. Teniendo en cuenta que el consumo anual total de los usuarios de este abastecimiento creado es de aproximadamente $5 \times 10^6 m^3$, se estima que con el C3 se registre un 94% del consumo real.

Error global (%)

Lo mismo ocurre con el error global del parque de contadores. El error global se calcula con la Ecuación 6.

$$\mathcal{E}_{global} = \frac{V_{registrado}}{V_{consumido}} - 1 \quad (6)$$

Donde $V_{registrado}$ es el volumen de agua contabilizado por los contadores (m^3) y $V_{consumido}$ es el volumen de agua consumido por los usuarios, es decir, el volumen de agua que pasa realmente por el cuerpo del contador.

Para un contador deteriorado, el volumen de agua que registra se ve condicionado por su error de medición, el cual aumenta con el tiempo. En cambio, para un contador nuevo, el volumen de agua registrada sólo se ve condicionado por su error inicial, el cual es mucho inferior al que supone el error de un contador más obsoleto.

En la Figura 8 se representa el error global del parque de contadores en su situación actual, es decir, sin sustituir ningún contador y, el error global de ese mismo parque de contadores tras aplicar el C1 y C3. La mejora del error global es considerable llevando a cabo cualquier sustitución, sin embargo, con el C3 el error global es aun inferior.

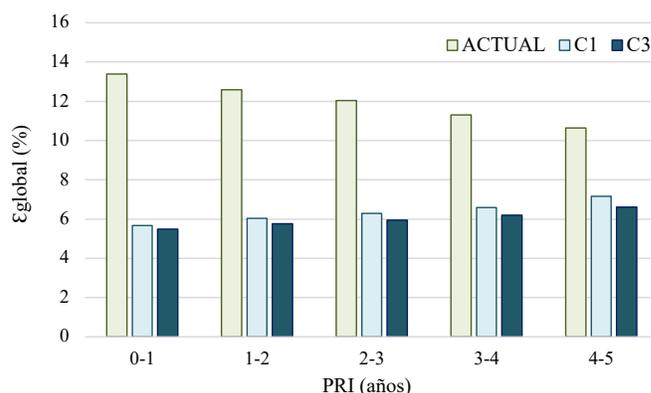


Figura 8 | Error global de medición del parque sin sustituir ningún contador y sustituyéndolos según el C1 y C3.

La Tabla 4 contiene todos los resultados obtenidos de los indicadores de comparación, para ambos modelos, comentados anteriormente.

Tabla 4 | Resumen de los resultados obtenidos.

| Indicador de comparación | C1 | C3 | Diferencia C3 – C1 |
|--|------------|------------|--------------------|
| Indicadores totales anuales | | | |
| Nº total de contadores a sustituir (ud) | 23215 | 26744 | 3529 |
| Costes iniciales totales (€/año) | 766095.00 | 670314.18 | - 95780.92 |
| Incremento de los ingresos (€/año) | 240600.58 | 254794.00 | 14193.42 |
| Ingresos totales (€/año) | 3964535.12 | 3978728.55 | 14193.42 |
| Beneficios totales (€/año) | 3198440.12 | 3308414.37 | 109974.25 |
| PRI (año) | 3.18 | 2.63 | -0.55 |
| Volumen total registrado (m ³ /año) | 5286046.83 | 5304929.31 | 18882.48 |
| Error global (%) | 6.33 | 5.99 | -0.34 |
| Indicadores unitarios anuales | | | |
| Volumen registrado unitario (m ³ /año*ud) | 105.72 | 106.10 | 0.38 |
| Coste inicial unitario (€/año*ud) | 15.32 | 13.41 | -1.92 |
| Ingresos unitarios (€/año*ud) | 79.29 | 79.57 | 0.28 |
| Beneficio unitario (€/año*ud) | 63.97 | 66.17 | 2.20 |

CONCLUSIONES

El nuevo modelo de cálculo del periodo óptimo de sustitución de contadores de agua se desarrolla a partir de los modelos existentes, previamente publicados por diversos autores. Este modelo incorpora al cálculo de la vida útil de los contadores de agua la posibilidad de que los instrumentos se encuentren instalados en batería. Considerar este hecho e incluir la ubicación geográfica de los contadores de agua, resulta clave para optimizar las labores de sustitución durante el mantenimiento del parque de contadores.

El nuevo modelo analiza, localiza y prioriza la sustitución de aquellas baterías cuyo estado metrológico es más deficiente y produce más pérdidas comerciales frente al resto de baterías instaladas en el parque. Una vez el operario se desplaza para sustituir un contador, conocer a priori los contadores que convendría sustituir en esa misma batería y las baterías más cercanas que están en peor estado es fundamental para reducir los costes de desplazamiento ocasionados. En este sentido, el nuevo modelo organiza, de una forma más óptima, las rutas de sustitución que permitan la renovación de aquellos contadores en peor estado.

La incorporación de estos factores en el nuevo modelo altera el cálculo de la vida útil dando lugar a diversas ventajas. La optimización de las rutas de sustitución supone una disminución de los costes de desplazamiento para la empresa, permitiéndoles con este ahorro, realizar renovaciones del parque de contadores más frecuentes. El aumento de la sustitución de contadores deteriorados por otros nuevos de mejor calidad metrológica, supone una mejora sustancial en la medición del parque al disminuir su error global. Por otro lado, una medición más exacta implica una reducción de los volúmenes de ANR.

Como resultado final, el nuevo modelo garantiza a las empresas abastecedoras aumentar sus beneficios por agua registrada al reducir, por un lado, los costes de inversión y, por otro lado, las pérdidas comerciales debidas al error de medición de los contadores. Todo ello, garantiza a las empresas llevar a cabo un control más exhaustivo de los sistemas de distribución, aprovechando aún más los volúmenes de agua que inyectan a la red.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo agradecen a la empresa Global Omnium - Aguas de Valencia la colaboración prestada en el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- Allender, H. 1996. Determining the economical optimum life of residential water meters. *Journal of Water Engineering and Management*, 143(9), 20-24.
- Arregui-de la Cruz, F., Cabrera-Rochera, E., Cobacho-Jordán, R. 2007. *Gestión integral de contadores de agua*. Valencia: Gil Industrias Gráficas, SL.
- Arregui, F., Cobacho, R., Cabrera, E., Espert, V. 2011. Graphical Method to Calculate the Optimum Replacement Period for Water Meters. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 143-146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000100](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000100)
- Gavara-Tortes, F., Arregui-de la Cruz, F. 2018. Análisis metrológico de contadores de agua en abastecimientos. *TecnoAqua*, (30), 72-80. <http://hdl.handle.net/10251/120333>
- Instituto Nacional de Estadística, 2018. Estadística sobre el suministro y saneamiento del agua en el año 2016, s.l.: Notas de prensa. Disponible en: https://www.ine.es/prensa/essa_2016.pdf
- Male, J., Noss, R., Moore, I. 1985. *Identifying and reducing losses in water distribution systems*. Noyes Publications.
- Planells, F., Antolí, A., López, V., Sanz, F., García-Serra, J. 1987. Diagnóstico de la gestión óptima de contadores en un sistema de distribución de agua. *Tecnología del agua*, 38, 42-55.
- Szilveszter, S., Beltran, R., Arturo, F. 2015. Performance analysis of the domestic water meter park in water supply network of Ibarra, Ecuador. *Urban Water Journal*, 21 Mayo.pp. 85-96. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1057181>
- Taborda, C., Anunciação, A. 1997. *Os contadores e a qualidade da medição*. Agua Scripta.
- Vindas Villalobos, J.C. 2005. Modelo para la cuantificación y desagregación de las pérdidas en sistemas de agua potable como herramienta para el establecimiento de un programa eficiente de reducción de pérdidas. *Revista Evolución*, 3(1), 29-45.
- Yee, M. 1999. Economic analysis for replacing residential meters. *Journal of AWWA*, 91(7), 72-77. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1999.tb08666.x>