

# Trabajo Fin de Máster

## *DESARROLLO DE UN MODELO ECONÓMICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL ECONÓMICA DE CONTADORES DE AGUA INSTALADOS EN BATERÍA. APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO.*

**Intensificación:** *HIDRÁULICA URBANA*

**Autor:**

*ALBA HERNÁNDEZ GARCÍA*

**Tutor:**

*DR. FRANCISCO ARREGUI DE LA CRUZ*

**Cotutor:**

*OMAR VALERA TALAVERA*

**JULIO, 2018**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** DESARROLLO DE UN MODELO ECONÓMICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL ECONÓMICA DE CONTADORES DE AGUA INSTALADOS EN BATERÍA. APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO.

**Título del TFM en inglés:** DEVELOPMENT OF AN ECONOMIC MODEL FOR THE DETERMINATION OF THE ECONOMIC USEFUL LIFE OF WATER METERS INSTALLED IN A METER BANK. APPLICATION TO A CASE STUDY.

**Título del TFM en Valenciano:** DESENVOLUPAMENT D'UN MODEL ECONÒMIC PER A LA DETERMINACIÓ DE LA VIDA ÚTIL ECONÒMICA DE COMPTADORS D'AIGUA INSTAL·LATS EN BATERIA. APLICACIÓ A UN CAS D'ESTUDI.

**Alumno:** Alba Hernández García

**Tutor:** Dr. Francisco Arregui de la Cruz

**Cotutor:** Omar Valera Talavera

**Fecha de Lectura:** Julio, 2018

### Resumen

#### En español (máximo 5000 caracteres)

Uno de los elementos más significativos para el control efectivo de los volúmenes de agua suministrada y, por ende, de la eficiencia de las redes de distribución, son los contadores de agua. El buen funcionamiento de estos equipos de medición se vuelve indispensable para el control de fugas y la correcta gestión del sistema. Por tanto, para poder lograr el mejor desempeño efectivo de la red, los medidores de agua deben estar en buen estado y alcanzar una calidad metrológica adecuada que dé garantías, tanto a los usuarios del sistema como a la propia empresa abastecedora, de que el agua inyectada a la red llegue a su destino.

Teniendo en cuenta la importancia de estos aparatos, cada vez son más las empresas que, con el objetivo de conseguir un abastecimiento más sostenible que permita aprovechar al máximo nuestro recurso hídrico, lleva a cabo la gestión integral de su parque de contadores. Dicha gestión conlleva la realización de tres tareas imprescindibles. En primer lugar, la elección del modelo de contador de agua que más se adecue a las características del abastecimiento en el que se va a instalar. En segundo lugar, el control de calidad de los contadores que se van a instalar nuevos para asegurar su buen funcionamiento. Y, por último, la sustitución de aquellos contadores instalados cuya calidad metrológica se ha deteriorado y están sujetos a grandes errores de medición.

Hasta la actualidad, una de las tareas más difícil debido al tiempo y esfuerzo que supone, es la de conocer el tiempo óptimo de reemplazo de los contadores de agua. Existe un modelo económico que permite calcular la vida útil de cada contador, teniendo en cuenta una serie de parámetros como: el error inicial y edad que presentan los contadores, el ritmo

al que se deteriora la medición de los mismos, la tarifa del agua, el consumo de los usuarios y los costes que invierte la empresa en la adquisición, instalación y administración de los contadores. Sin embargo, no existe ningún modelo que calcule la vida útil de los contadores teniendo en cuenta la planificación que supone su sustitución. Por ello, en este proyecto se ha programado un modelo económico que permite planificar la sustitución de los medidores y calcular la vida útil de los mismos con mayor exactitud y ajustándonos aún más a la realidad. Para conseguirlo, se ha tenido en cuenta dentro de los costes de instalación, el coste que supone el montaje de los contadores nuevos y el coste que conlleva el desplazamiento de los operarios que deben realizar la sustitución de los aparatos, por separado. Además, se han agrupado los contadores en baterías para estudiarlos de forma conjunta y no sólo individual. Jugando con estos factores se ha evaluado el estado que presentan las baterías, priorizando la sustitución de aquellas que estén en peor estado, es decir, aquellas que presenten un mayor número de contadores sujetos a grandes errores de medición y que, por lo tanto, necesitan una sustitución más inmediata. Una vez se ha proyectado la priorización, se han ubicado las peores baterías que estén dentro de un rango de distancia establecido y cuyo desplazamiento no suponga un aumento excesivo de los costes de instalación. De esta manera, se ha conseguido reducir al máximo posible la inversión que debe realizar la empresa abastecedora y, se ha logrado calcular el número máximo de contadores que deberían sustituirse en cada batería. El aumento del número de contadores en mal estado a cambiar respecto al modelo anterior, ha dado lugar a una mejora en la eficiencia del parque de contadores. Un mayor número de contadores sustituidos constituye un parque de contadores sujeto a menos errores de medición y, por lo tanto, a menos pérdidas económicas. Esto, junto con la disminución de los costes iniciales, ha supuesto un aumento de los beneficios de la empresa.

Por otro lado, uno de los parámetros más importantes para el cálculo de la vida útil es la degradación de los contadores, y actualmente sólo existen datos sobre el ritmo al que se deterioran los contadores residenciales o de pequeño calibre. Por ello, el presente Trabajo de Fin de Máster tiene como segundo objetivo aportar datos sobre la degradación de los contadores de mediano calibre.

A lo largo del desarrollo del proyecto, la empresa de Aguas de Valencia ha seleccionado contadores usados, de este calibre y de diferentes modelos de fabricantes, y los ha enviado al laboratorio del Instituto Tecnológico del Agua (ITA). Ahí, se han ensayado los diferentes modelos de medidores a diferentes caudales para determinar las curvas de error de cada uno de ellos y, posteriormente, calcular el error promedio global y el ritmo de deterioro que ha sufrido la medición de cada uno de ellos. Finalmente, la obtención del dato de ritmo de deterioro, ha permitido estimar una vida útil estándar para cada modelo de contador.

Adicionalmente, durante el proceso de ensayo de los contadores de mediano calibre, se ha analizado las curvas de error resultantes para evaluar el comportamiento de la medición de los aparatos y, se ha comprobado el estado físico que presentan los mismos para deducir si las condiciones físicas que presenta un contador puede alterar o no su medición. Por un lado, se ha observado como muchos de los contadores de mayor diámetro, presentan incrustaciones en su interior que someten a su medición a errores de sobrecontaje. Por otro

lado, los contadores de menor diámetro se ven afectados con errores de subcontaje por la presencia de grandes cantidades de sedimentos en el filtro. También, se han localizado excepciones como algunos contadores con fallos en el acoplamiento magnético o que han sido manipulados haciendo que dejen de medir a determinados caudales.

### **En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

Un dels elements més significatius per al control efectiu dels volums d'aigua subministrada i, per tant, de l'eficiència de les xarxes de distribució, són els comptadors d'aigua. El bon funcionament d'estos equips de mesurament es torna indispensable per al control de fugues i la correcta gestió del sistema. Per tant, per a poder aconseguir el millor exercici efectiu de la xarxa, els mesuradors d'aigua han d'estar en bon estat i aconseguir una qualitat metrològica adequada que done garanties, tant als usuaris del sistema com a la pròpia empresa abastidora, de que l'aigua injectada a la xarxa arribe al seu destí.

Tenint en compte la importància d'estos aparells, cada vegada són més les empreses que, amb l'objectiu d'aconseguir un abastiment més sostenible que permeta aprofitar al màxim el nostre recurs hídic, du a terme la gestió integral del seu parc de comptadors. La dita gestió comporta la realització de tres tasques imprescindibles. En primer lloc, l'elecció del model de comptador d'aigua que més s'adeqüe a les característiques de l'abastiment en què es va a instal·lar. En segon lloc, el control de qualitat dels comptadors que es van a instal·lar nous per a assegurar el seu bon funcionament. I, finalment, la substitució d'aquells comptadors instal·lats la qualitat de la qual metrològica s'ha deteriorat i estan subjectes a grans errors de mesurament.

Fins a l'actualitat, una de les tasques més difícil a causa del temps i esforç que suposa, és la de conèixer el temps òptim de reemplaçament dels comptadors d'aigua. Hi ha un model econòmic que permet calcular la vida útil de cada comptador, tenint en compte una sèrie de paràmetres com: l'error inicial i edat que presenten els comptadors, el ritme a què es deteriora el mesurament dels mateixos, la tarifa de l'aigua, el consum dels usuaris i els costos que invertix l'empresa en l'adquisició, instal·lació i administració dels comptadors. No obstant això, no hi ha cap model que calcule la vida útil dels comptadors tenint en compte la planificació que suposa la seua substitució. Per això, en este projecte s'ha programat un model econòmic que permeta planificar la substitució dels mesuradors i calcular la vida útil dels mateixos amb major exactitud i ajustant-nos encara més a la realitat. Per a aconseguir-ho, s'ha tingut en compte dins dels costos d'instal·lació, el cost que suposa el muntatge dels comptadors nous i el cost que comporta el desplaçament dels operaris que han de realitzar la substitució dels aparells, per separat. A més, s'han agrupat els comptadors en bateries per a estudiar-los de forma conjunta i no sols individual. Jugant amb estos factors s'ha avaluat l'estat que presenten les bateries, prioritant la substitució d'aquelles que estiguen en pitjor estat, és a dir, aquelles que presenten un nombre més gran de comptadors subjectes a grans errors de mesurament i que, per tant, necessiten una substitució més immediata. Una vegada s'ha projectat la prioritització, s'han ubicat les pitjors bateries que estiguen dins d'un rang de distància establert i el desplaçament de les quals no supose un augment excessiu dels costos d'instal·lació.

D'altra banda, atés que un dels paràmetres més importants per al càlcul de la vida útil, és la degradació dels comptadors i actualment només hi ha dades sobre el ritme a què es deterioren els comptadors residencials o de xicotet calibre. El Treball de Fi de Màster té com a segon objectiu, aportar dades sobre la degradació dels comptadors de mitjà calibre. Al llarg del desenrotllament del projecte, l'empresa d'Aigües de València ha seleccionat comptadors usats, d'este calibre i de diferents models de fabricants, i els ha enviat al laboratori de l'Institut Tecnològic de l'Aigua (ITA). Ací, s'han assajat els diferents models de comptadors a diferents cabals per a determinar les corbes d'error de cada un d'ells i, posteriorment, calcular l'error mitjana global i el ritme de deteriorament que ha patit el mesurament de cada un d'ells. Finalment, l'obtenció de la dada de ritme de deteriorament, ha permés estimar una vida útil estàndard per a cada model de comptador.

Adicionalment, durant el procés d'assaig dels comptadors de mitjà calibre, s'ha analitzat les corbes d'error resultants per a avaluar el comportament del mesurament dels aparells i, s'ha comprovat l'estat físic que presenten els mateixos per a deduir si les condicions físiques que presenta un comptador pot alterar o no el seu mesurament. D'una banda, s'ha observat com molts dels comptadors de major diàmetre, presenten incrustacions en el seu interior que sotmeten al seu mesurament a errors de sobrecontaje. D'altra banda, els comptadors de menor diàmetre es veuen afectats amb errors de subcontaje per la presència de grans quantitats de sediments en el filtre. També, s'han localitzat excepcions com alguns comptadors amb fallades en l'adaptament magnètic o que han sigut manipulats fent que deixen de mesurar a determinats cabals.

#### **En inglés (máximo 5000 caracteres)**

One of the most significant elements for the effective control of the volumes of water supplied and, therefore, of the efficiency of the distribution networks, are water meters. The proper functioning of these measuring devices is essential for the control of leaks and the correct management of the system. Therefore, in order to achieve the best effective performance of the network, the water meters must be in good condition and reach an adequate metrological quality that guarantees both the users of the system and the supply company itself that the water injected into the network reaches its destination.

Bearing in mind the importance of these devices, more and more companies are increasingly managing their meters with the aim of achieving a more sustainable supply that allows us to make the most of our water resources. This management involves the accomplishment of three essential tasks. Firstly, the choice of the water meter model that best suits the characteristics of the water supply in which it is to be installed. Secondly, the quality control of the meters to be installed new to ensure their proper operation. And finally, the replacement of those installed meters whose metrological quality has deteriorated and are subject to large measurement errors.

Until now, one of the most difficult tasks due to the time and effort involved, is to know the optimal replacement time of the water meters. There is an economic model that makes it possible to calculate the useful life of each meter, taking into account a series of parameters such as: the initial error and the age of the water meters, the rate at which their

measurement deteriorates, the water rate, user consumption and the costs invested by the company in the acquisition, installation and administration of the meters. However, there is no model that calculates the useful life of the meters taking into account the planning involved in their replacement. For this reason, this project has programmed an economic model that allows us to plan the replacement of the water meters and calculate their useful life with greater accuracy and adjusting them even more to reality. To achieve this, the installation costs include the cost of installing the new meters and the cost of moving the operators who have to replace the equipment separately. In addition, the meters have been grouped in batteries to study them together and not just individually. Playing with these factors, the state of the batteries has been evaluated, prioritizing the replacement of those that are in a worse state, that is, those that present a greater number of water meters subject to large measurement errors and that, therefore, need a more immediate replacement. Once the prioritisation has been planned, the worst batteries within a set distance range have been located and their displacement does not lead to an excessive increase in installation costs. In this way, the investment to be made by the supplier has been reduced as much as possible and the maximum number of water meters that should be replaced in each battery has been calculated. The increase in the number of bad meters to be replaced has led to an improvement in the efficiency of the meter park. A larger number of meters replaced means that there are fewer measurement errors and therefore fewer economic losses. This, together with the reduction in initial costs, has led to an increase in the company's profits.

On the other hand, since one of the most important parameters for the calculation of the useful life is the degradation of meters, and currently only data on the rate at which residential or small-calibre water meters deteriorate are available. The second objective of the Master's Final Project is to provide data on the degradation of medium calibre meters. Throughout the development of the project, the Valencia water company has selected used meters of this calibre and from different models of manufacturers, and has sent them to the laboratory of the Water Technological Institute (ITA). Here, the different models of water meters at different flow rates have been tested to determine the error curves of each of them and, subsequently, to calculate the overall average error and the rate of deterioration suffered by the measurement of each of them. Finally, obtaining the rate of deterioration data has made it possible to estimate a standard useful life for each model of meter.

Additionally, during the testing process of the medium calibre meters, the resulting error curves have been analyzed to evaluate the measurement behavior of the devices and the physical condition of the devices has been verified to deduce if the physical conditions of a meter may or may not modify its measurement. On the one hand, it has been observed that many of the larger diameter counters have incrustations inside them that subject their measurement to overcounting errors. On the other hand, smaller diameter counters are affected by sub-assembly errors due to the presence of large amounts of sediment in the filter. Exceptions have also been found such as some meters with magnetic coupling faults or that have been tampered with by causing them to stop measuring at certain flow rates.

**Palabras clave español (máximo 5):** modelo económico, parque de contadores, ritmo de deterioro, error global, calidad metrológica.

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** model econòmic, parc de comptadors, ritme de deteriorament, error global, qualitat metrológica.

**Palabras clave inglés (máximo 5):** economic model, meter park, rate of deterioration, global error, metrological quality.

*“Cualquier cosa que decidas hacer en la vida,  
hay que hacerla con el corazón,  
si no está vacía”*

*J.S.*



## Agradecimientos

A mi madre Magdalena, has sido y siempre serás el mayor pilar de mi vida. A ti te lo debo todo. Gracias por siempre empujarme a cumplir mis sueños. A mi padre Aníbal, mi mayor ejemplo de lucha y constancia. Tu gran corazón me ha enseñado siempre los verdaderos valores de la vida. Vuestro esfuerzo siempre será mi mayor referente y vuestra confianza en mí, mi mayor motivación.

A mi hermano Oliver, por tantas veces que me has cuidado, por todo el amor que me has brindado, y porque da igual lo difícil que sea todo que tú siempre estarás a mi lado. A mi hermana María, quien desde que llegó a mi vida se volvió lo más importante de ella. Eres mi mayor alegría. Gracias por tus locuras, con ellas me haces la vida más sencilla. Gracias a los dos por todos los momentos que hemos compartido y por hacerme sentirles cerca a pesar de la distancia.

A mi abuela Conce, quien con sólo sonreírme me da toda la fuerza que necesito. A mis tíos Ángeles y Román, porque siempre han estado ahí para apoyarme y celebrar mis alegrías. Gracias a los tres por preocuparse por mí siempre y quererme tanto.

A Javier, has sido mi mayor apoyo en este trayecto, me has guiado en mis peores momentos consiguiendo siempre que vea las cosas de la mejor forma. Sin ti a mi lado nada hubiera sido igual. Gracias por todo lo que me enseñas, por querer compartir cada día conmigo, por apoyarme incondicionalmente como nadie lo ha hecho nunca y por permitirme contar contigo siempre.

A mis amigas Lourdes, Bea y Elena, quienes a pesar de la distancia siempre han estado ahí para aconsejarme y apoyarme. Gracias por formar parte de mi vida y regalarme vuestra amistad durante tantos años. A Braulio, empezaste siendo un gran compañero de Máster y ahora sé que me llevo una buena amistad para toda la vida. Doy gracias por todos los momentos que hemos vivido y por todo lo que hemos aprendido juntos.

A mi tutor Paco, gracias por todo lo que me has enseñado y por confiar en mí. Compartir conmigo tus conocimientos y experiencias sobre este tema ha logrado despertar en mí una gran curiosidad y pasión por algo que no había tenido la oportunidad de aprender antes. No hay mejor profesor que aquel que inspira, gracias. A mi tutor Omar, quien desde dentro de la empresa Global Omnium ha hecho posible este proyecto, gracias por tu disposición y por hacerme ver que en todo momento podía contar contigo.

A Dani, Elena, Elvira, Laura, Raquel y Rober, mis compañeros del Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua, quienes me han regalado muy buenos momentos a lo largo de esta experiencia y, sobretodo, me han aportado mucha felicidad.

A la Cátedra de Aguas de Valencia, gracias por la iniciativa que lleváis a cabo y por ofrecerme esta gran oportunidad de crecer un poco más dentro de esta profesión.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1	ANTECEDENTES .....	1
1.2	JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	5
1.3	OBJETIVOS.....	6
1.3.1	<i>Objetivos generales.....</i>	6
1.3.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	6
1.3.3	<i>Limitaciones .....</i>	7
1.4	ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	7
<b>2</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>9</b>
2.1	FACTORES QUE INTERVIENEN .....	9
2.2	ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA DEL MODELO ECONÓMICO ACTUAL .....	12
2.3	DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL MODELO ECONÓMICO ACTUAL .....	14
2.4	EJEMPLO DE APLICACIÓN .....	17
<b>3</b>	<b>DESARROLLO DE UN NUEVO MODELO ECONÓMICO .....</b>	<b>20</b>
3.1	INTRODUCCIÓN AL NUEVO MODELO ECONÓMICO .....	20
3.2	DATOS DE PARTIDA.....	20
3.3	ESQUEMA GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO ECONÓMICO NUEVO .....	25
3.4	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DETALLADO.....	27
3.4.1	<i>Paso 1: Agrupar los contadores en baterías .....</i>	27
3.4.2	<i>Paso 2: Aplicación del Método 1.....</i>	29
3.4.3	<i>Paso 3: Localización de la primera batería a cambiar .....</i>	30
3.4.3.1	<i>Periodo de Retorno de la inversión (PRI) .....</i>	31
3.4.4	<i>Paso 4: Aplicación del Método 2.....</i>	35
3.4.4.1	<i>Costes iniciales variables según el Método 2.....</i>	36
3.4.4.2	<i>Vida útil según el Método 2.....</i>	38
3.4.5	<i>Paso 5: Aplicación del Método 3.....</i>	40
3.4.5.1	<i>Costes iniciales variables según el Método 3.....</i>	40
3.4.6	<i>Paso 6: Localización de las siguientes baterías a cambiar .....</i>	42
3.5	INDICADORES PARA LA COMPARACIÓN DE MÉTODOS .....	49
3.5.1	<i>Gastos e ingresos .....</i>	49
3.5.2	<i>Volúmenes y error global .....</i>	51
3.5.3	<i>Periodo de Retorno de la Inversión Real (PRI<sub>real</sub>) .....</i>	53
<b>4</b>	<b>EJEMPLO DE APLICACIÓN (CONTADORES DOMÉSTICOS).....</b>	<b>55</b>
4.1	CREACIÓN DE UN PARQUE SINTÉTICO DE CONTADORES DE PEQUEÑO CALIBRE .....	55
4.1.1	<i>Características del parque de contadores.....</i>	55
4.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	62
4.2.1	<i>Comparación del modelo desarrollado con el modelo actual .....</i>	63
4.2.2	<i>Comparación de los resultados según el tipo de tarifa empleada.....</i>	74
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE CONTADORES DE MEDIANO CALIBRE .....</b>	<b>79</b>

5.1	DESCRIPCIÓN DE LOS CONTADORES ENSAYADOS .....	80
5.2	DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y MATERIAL DE LABORATORIO .....	81
5.3	METODOLOGÍA DE ENSAYO .....	88
5.3.1	<i>Procedimiento del ensayo</i> .....	88
5.3.2	<i>Selección de los caudales de ensayo</i> .....	91
5.3.3	<i>Obtención de la curva de error</i> .....	96
5.4	ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE ERROR OBTENIDAS .....	99
5.4.1	<i>Diagnóstico de los contadores defectuosos</i> .....	101
5.4.2	<i>Afecciones a la medición</i> .....	123
5.5	DETERMINACIÓN DEL ERROR GLOBAL DE LOS CONTADORES .....	124
5.5.1	<i>Resultados del error global de los contadores</i> .....	126
5.5.2	<i>Ficha técnica</i> .....	128
5.6	DETERMINACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DEL ERROR GLOBAL DE LOS CONTADORES .....	128
<b>6</b>	<b>EJEMPLO DE APLICACIÓN (CONTADORES MEDIANO CALIBRE) .....</b>	<b>134</b>
6.1	ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LOS CONTADORES DE MEDIANO CALIBRE .....	134
6.1.1	<i>Datos de partida</i> .....	134
6.1.2	<i>Resultados obtenidos</i> .....	135
6.2	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN A LOS RESULTADOS FINALES .....	137
6.2.1	<i>Costes iniciales</i> .....	138
6.2.2	<i>Tarifa del agua</i> .....	138
6.2.3	<i>Consumo de los usuarios</i> .....	139
6.2.4	<i>Ritmo de deterioro</i> .....	140
6.2.4.1	<i>Error inicial</i> .....	140
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>146</b>
7.1	MODELO ECONÓMICO .....	146
7.2	ENSAYOS DE CONTADORES DE MEDIANO CALIBRE .....	147
<b>8</b>	<b>LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>149</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>150</b>
<b>10</b>	<b>ANEXO .....</b>	<b>152</b>
10.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTADORES ENSAYADOS .....	153
10.2	ERROR DE MEDICIÓN DE LOS CONTADORES A CADA CAUDAL DE ENSAYO Y SU ERROR GLOBAL .....	158
10.3	ANÁLISIS DEL ESTADO FÍSICO DE LOS CONTADORES Y DE SU CURVA DE ERROR .....	163

## ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Esquema de la metodología del Modelo Económico Actual .....	13
<b>Ilustración 2.</b> Esquema general de la metodología del nuevo modelo económico .....	26
<b>Ilustración 3.</b> Esquema del primer paso que sigue el modelo económico desarrollado .....	29
<b>Ilustración 4.</b> Esquema del segundo paso que sigue el modelo económico desarrollado.....	30
<b>Ilustración 5.</b> Mejora del error de dos contadores con diferente error.....	33
<b>Ilustración 6.</b> Esquema del tercer paso que sigue el modelo económico desarrollado.....	35
<b>Ilustración 7.</b> Esquema del cuarto paso que sigue el modelo económico desarrollado.....	39
<b>Ilustración 8.</b> Esquema del quinto paso que sigue el modelo económico desarrollado.....	42
<b>Ilustración 9.</b> Esquema del sexto paso que sigue el modelo económico desarrollado.....	48
<b>Ilustración 10.</b> Cuadrícula para agrupar los contadores en baterías.....	56
<b>Ilustración 11.</b> Gráfico sobre la frecuencia de los consumos típicos de un contador de DN 15mm .....	57
<b>Ilustración 12.</b> Número de contadores promedio a cambiar según el Método 1 y 3 .....	64
<b>Ilustración 13.</b> Costes iniciales promedios según el Método 1 y 3.....	65
<b>Ilustración 14.</b> Incremento de los ingresos promedios según el Método 1 y 3 .....	68
<b>Ilustración 15.</b> Ingresos totales promedio actuales y según el Método 1 y 3 .....	69
<b>Ilustración 16.</b> Gastos totales promedio según el Método 1 y 3.....	69
<b>Ilustración 17.</b> Beneficios totales promedio según el Método 1 y 3 .....	70
<b>Ilustración 18.</b> Comparación del periodo de retorno de la inversión del Método 1 y 3 .....	72
<b>Ilustración 19.</b> Volumen registrado promedio actual y según el Método 1 y 3 .....	73
<b>Ilustración 20.</b> Error global promedio actual y según el Método 1 y 3 .....	74
<b>Ilustración 21.</b> Contadores de mediano calibre.....	79
<b>Ilustración 22.</b> Válvula de seccionamiento a la entrada del banco de ensayo.....	81
<b>Ilustración 23.</b> Línea de ensayo de contadores desmontada .....	82
<b>Ilustración 24.</b> Línea de ensayo de contadores montada.....	82
<b>Ilustración 25.</b> Tubos y juntas para la instalación de contadores en el banco.....	82
<b>Ilustración 26.</b> Válvula con control neumático y filtro .....	83
<b>Ilustración 27.</b> Válvula de regulación precisa (RG-91) para microcaudales .....	84
<b>Ilustración 28.</b> Líneas de ensayo, válvulas de regulación y contador .....	84
<b>Ilustración 29.</b> Válvula de regulación precisa (CR-100) para caudales.....	84
<b>Ilustración 30.</b> Panel de control para ver la medición del caudal que pasa por la línea 3 .....	85
<b>Ilustración 31.</b> Sensor electromagnético de caudal de la marca Krohne (Modelo: OPTIFLUX 1000).....	86
<b>Ilustración 32.</b> Sensor de Siemens (Modelo: SITRANS FM Medio. Tipo:911/F5) .....	86
<b>Ilustración 33.</b> temporizador digital Panasonic y caudalímetros electromagnéticos de Krohne (izquierda) y Siemens (derecha).....	86
<b>Ilustración 34.</b> Probetas de los depósitos.....	87
<b>Ilustración 35.</b> Depósitos Schlumberger de 10l (derecha) y 200l (izquierda) .....	87
<b>Ilustración 36.</b> Llave de corte de los depósitos .....	87
<b>Ilustración 37.</b> Calderines .....	88
<b>Ilustración 38.</b> Grupo bombeo.....	88
<b>Ilustración 39.</b> Llave de corte para vaciar los calderines.....	90

<b>Ilustración 40.</b> Ejemplo de una curva de error con los caudales que la constituyen .....	92
<b>Ilustración 41.</b> Caudal nominal o Q3 de un contador indicado por el fabricante .....	93
<b>Ilustración 42.</b> Límites de precisión para diferentes clases metroológicas según ISO 4064:1993. Fuente: Diapositivas IT 2016. Asignatura: “Gestión técnica de abastecimientos de agua urbano sostenibles” .....	97
<b>Ilustración 43.</b> Curvas de error estándar según el tipo de contador; chorro único/múltiple y volumétrico .....	100
<b>Ilustración 44.</b> Curvas de error de los contadores con DN 20mm, modelo 1 y clase metroológica R200.....	101
<b>Ilustración 45.</b> Estado del filtro del contador con ID 7 .....	102
<b>Ilustración 46.</b> Estado del filtro del contador con ID 8 .....	102
<b>Ilustración 47.</b> Estado del filtro del contador con ID 12 .....	103
<b>Ilustración 48.</b> Estado del filtro del contador con ID 16 .....	103
<b>Ilustración 49.</b> Estado de la válvula antirretorno del contador con ID 21.....	103
<b>Ilustración 50.</b> Curvas de error de los contadores con DN 20mm, modelo 3 y clase metroológica C.....	104
<b>Ilustración 51.</b> Estado del filtro del contador con ID 27 .....	105
<b>Ilustración 52.</b> Estado del interior del contador con ID 24.....	106
<b>Ilustración 53.</b> Estado del interior del contador con ID 25.....	106
<b>Ilustración 54.</b> Curvas de error de los contadores con DN 20mm, modelo 4 y clase metroológica R160.....	107
<b>Ilustración 55.</b> Estado del interior del contador con ID 28.....	107
<b>Ilustración 56.</b> Curvas de error de los contadores con DN 25mm, modelo 3 y clase metroológica C.....	108
<b>Ilustración 57.</b> Contador con ID 30 desarmado.....	109
<b>Ilustración 58.</b> Estado del interior del contador con ID 30.....	109
<b>Ilustración 59.</b> Estado del interior del contador con ID 38.....	110
<b>Ilustración 60.</b> Estado del interior del contador con ID 32.....	110
<b>Ilustración 61.</b> Estado del filtro del contador con ID 33 .....	110
<b>Ilustración 62.</b> Estado del interior del contador con ID 33.....	110
<b>Ilustración 63.</b> Estado del interior del contador con ID 36.....	110
<b>Ilustración 64.</b> Estado del filtro del contador con ID 36 .....	110
<b>Ilustración 65.</b> Estado del filtro del contador con ID 42 .....	111
<b>Ilustración 66.</b> Estado del interior del contador con ID 42.....	111
<b>Ilustración 67.</b> Estado del interior del contador con ID 49.....	111
<b>Ilustración 68.</b> Estado del filtro del contador con ID 49 .....	111
<b>Ilustración 69.</b> Estado del interior del contador con ID 55.....	112
<b>Ilustración 70.</b> Estado del filtro del contador con ID 55 .....	112
<b>Ilustración 71.</b> Curvas de error de los contadores con DN 30mm, modelo 1 y clase metroológica R200.....	113
<b>Ilustración 72.</b> Estado del filtro del contador con ID 62 .....	114
<b>Ilustración 73.</b> Estado de la salida del contador con ID 62.....	114
<b>Ilustración 74.</b> Estado de la salida del contador con ID 68.....	114
<b>Ilustración 75.</b> Estado del filtro del contador con ID 68 .....	114

<b>Ilustración 76.</b> Contador con ID 72 y una pieza de la válvula de retención rota.....	115
<b>Ilustración 77.</b> Estado de la salida del contador con ID 63.....	116
<b>Ilustración 78.</b> Estado del filtro del contador con ID 63.....	116
<b>Ilustración 79.</b> Curvas de error de los contadores con DN 30mm, modelo 5 y clase metrológica B.....	117
<b>Ilustración 80.</b> Estado del filtro del contador con ID 73.....	117
<b>Ilustración 81.</b> Estado del interior del contador con ID 73.....	117
<b>Ilustración 82.</b> Curvas de error de los contadores con DN 32mm, modelo 3 y clase metrológica C.....	118
<b>Ilustración 83.</b> Estado del filtro del contador con ID 74.....	119
<b>Ilustración 84.</b> Aguja del medidor de litros rota del contador con ID 87.....	120
<b>Ilustración 85.</b> Curvas de error de los contadores con DN 40mm, modelo 1 y clase metrológica R200.....	121
<b>Ilustración 86.</b> Curvas de error de los contadores con DN 40mm, modelo 2 y clase metrológica C.....	122
<b>Ilustración 87.</b> Estado del interior del contador con ID 105 retirando su filtro.....	122
<b>Ilustración 88.</b> Estado del interior del contador con ID 106.....	122
<b>Ilustración 89.</b> Diagrama caja y bigotes de la relación entre el error global y diámetro de cada modelo de contador.....	126
<b>Ilustración 90.</b> Relación entre el error global y la edad del contador.....	131
<b>Ilustración 91.</b> Análisis de sensibilidad: afección de los costes iniciales en la vida útil de un contador.....	138
<b>Ilustración 92.</b> Análisis de sensibilidad: afección de la tarifa del agua en la vida útil de un contador.....	139
<b>Ilustración 93.</b> Análisis de sensibilidad: afección del consumo de los usuarios en la vida útil de un contador.....	139
<b>Ilustración 94.</b> Análisis de sensibilidad: afección del ritmo de deterioro en la vida útil de un contador.....	140
<b>Ilustración 95.</b> Análisis de sensibilidad: afección del error inicial en el ritmo de deterioro para un contador con 8.24 años de edad.....	141
<b>Ilustración 96.</b> Evolución de las pérdidas económicas anuales de cada ejemplo de contador.....	144
<b>Ilustración 97.</b> Análisis de sensibilidad: afección del error inicial en el ritmo de deterioro para un contador con 4 años de edad.....	145

## TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Datos de dos modelos de contadores diferentes. Fuente: (Arregui de la Cruz, et al., 2007).....	17
<b>Tabla 2.</b> VANC de la inversión para diferentes frecuencias de renovación. Modelo A. Fuente: (Arregui de la Cruz, et al., 2007).....	18
<b>Tabla 3.</b> VANC de la inversión para diferentes frecuencias de renovación. Modelo B. Fuente: (Arregui de la Cruz, et al., 2007).....	18
<b>Tabla 4.</b> Ejemplo de introducción datos de partida.....	27
<b>Tabla 5.</b> Datos del ejemplo para el cálculo del PRI .....	32
<b>Tabla 6.</b> Ejemplo para el cálculo del PRI .....	33
<b>Tabla 7.</b> Costes de instalación de los contadores que están en el Nivel 2 y tienen un diámetro $\leq 30\text{mm}$ .....	44
<b>Tabla 8.</b> Costes de instalación de los contadores que están en el Nivel 2 y tienen un diámetro $> 30\text{mm}$ .....	45
<b>Tabla 9.</b> Precios para un abastecimiento con tarifa fija según el uso al que se destine .....	58
<b>Tabla 10.</b> Precios para un abastecimiento con tarifa por bloques según el uso al que se destine .....	58
<b>Tabla 11.</b> Características de los contadores que forman el parque diseñado .....	61
<b>Tabla 12.</b> Datos de entrada que afecta a los operarios .....	61
<b>Tabla 13.</b> Datos de entrada necesarios para calcular los costes iniciales variables .....	61
<b>Tabla 14.</b> Datos necesarios para el cálculo de la mano de obra (*) .....	62
<b>Tabla 15.</b> Umbrales aplicados en el modelo económico .....	62
<b>Tabla 16.</b> Condiciones aplicadas en el modelo económico .....	62
<b>Tabla 17.</b> Número total de contadores a cambiar y duración del proceso según el Método 1 y 3.....	65
<b>Tabla 18.</b> Costes iniciales totales según el Método 1 y 3 .....	66
<b>Tabla 19.</b> Ejemplo sobre VU obtenido con método para un número de contadores .....	66
<b>Tabla 20.</b> Resultados totales sobre los ingresos y gastos según el Método 1 y 3 .....	70
<b>Tabla 21.</b> Periodo de retorno de la inversión final según el Método 1 y 3 .....	71
<b>Tabla 22.</b> Volumen total registrado por el parque de contadores en la actualidad y según el Método 1 y 3 .....	73
<b>Tabla 23.</b> Error global promedio del parque de contadores en la actualidad y según el Método 1 y 3 .....	74
<b>Tabla 24.</b> Número total de contadores a cambiar y duración del proceso según el tipo de tarifa .....	75
<b>Tabla 25.</b> Costes iniciales totales según el tipo de tarifa .....	76
<b>Tabla 26.</b> Resultados totales sobre los ingresos y gastos según el tipo de tarifa.....	76
<b>Tabla 27.</b> Periodo de retorno de la inversión final según el tipo de tarifa .....	77
<b>Tabla 28.</b> Volumen total registrado y error global promedio del parque de contadores según el tipo de tarifa .....	77
<b>Tabla 29.</b> Número de contadores ensayados y promedio de la edad según el diámetro.....	80
<b>Tabla 30.</b> Número de contadores ensayados según el fabricante .....	80
<b>Tabla 31.</b> Número de contadores ensayados según el modelo.....	81

<b>Tabla 32.</b> Clases metrológicas definidas en la norma ISO 4064:2014 en función de su caudal permanente.....	94
<b>Tabla 33.</b> Caudales que definen la curva de error según el diámetro y la clase metrológica de los contadores ensayados .....	95
<b>Tabla 34.</b> Caudales de ensayo según el diámetro del contador y su clase metrológica .....	96
<b>Tabla 35.</b> Pesos de cada caudal de ensayo según el diámetro del contador (*) .....	125
<b>Tabla 36.</b> Ficha técnica de los contadores ensayados y sus resultados .....	128
<b>Tabla 37.</b> Errores globales promedio según el modelo de contador y su diámetro (%) .....	129
<b>Tabla 38.</b> Edad promedio según el modelo de contador y su diámetro (año) .....	129
<b>Tabla 39.</b> Degradación del error o ritmo de deterioro (Error global/Edad) según el modelo de contador y su diámetro, suponiendo un error inicial del 0% (%/año).....	129
<b>Tabla 40.</b> Error inicial de los contadores del M1 obtenido en el control de calidad realizado en el laboratorio de Aguas de Valencia/Global Omnium .....	131
<b>Tabla 41.</b> Error inicial de los contadores del M3 obtenido en el control de calidad realizado en el laboratorio de Aguas de Valencia/Global Omnium .....	132
<b>Tabla 42.</b> Error global promedio de los contadores del M1y3 teniendo en cuenta el error inicial diferente al 0% .....	132
<b>Tabla 43.</b> Ritmo de deterioro de los contadores del M1y3 teniendo en cuenta el error inicial diferente al 0% .....	132
<b>Tabla 44.</b> Volúmenes totalizados promedios según el modelo de contador y su diámetro (m3) .....	133
<b>Tabla 45.</b> Degradación de la medición según el volumen que han registrado los contadores (%/1000m3) (*) .....	133
<b>Tabla 46.</b> Consumos medios anuales (Volumen totalizado/Edad) según el modelo de contador y su diámetro (m3/año) .....	133
<b>Tabla 47.</b> Costes iniciales estándar según el diámetro del contador .....	134
<b>Tabla 48.</b> Vida útil estándar para contadores con DN 20mm.....	135
<b>Tabla 49.</b> Vida útil estándar para contadores con DN 25mm.....	136
<b>Tabla 50.</b> Vida útil estándar para contadores con DN 30/32mm .....	136
<b>Tabla 51.</b> Vida útil estándar para contadores con DN 40mm.....	137
<b>Tabla 52.</b> Pérdidas económicas anuales y totales para el contador con error inicial igual al 0% .....	142
<b>Tabla 53.</b> Pérdidas económicas anuales y totales para el contador con error inicial igual al -0,5%.....	142
<b>Tabla 54.</b> Pérdidas económicas anuales y totales para el contador con error inicial igual al +0,5%.....	143



## ABREVIACIONES

- **COSTES:**

$C_t$ : coste total

$C_i$ : costes iniciales

$C_d$ : costes distribuidos

$C_{H_2O}$ : precio de venta del  $m^3$  de agua

$C_{compra}$ : coste de compra o adquisición del contador

$C_{inst}$ : coste de instalación del contador

$C_{adm}$ : coste de administración

$C_{mín.despl}$ : coste mínimo que supone las horas mínimas

$C_{camión}$ : coste asociado a las horas que dura el desplazamiento

$C_{despl}$ : precio del kilometraje

$C_{Mano.Obra}$ : precio de la mano de obra

$C_{tiempo.recorrido}$ : coste asociado al tiempo que los operarios tardan en desplazarse desde la empresa hasta el primer edificio donde realizan la sustitución

$C_{recorrido}$ : coste asociado a la distancia que recorren los operarios desde la empresa hasta el primer edificio donde realizan la sustitución

$C_{extra}$ : coste extra que suponen las horas extras

- **HORAS:**

$h_{montaje}$ : horas que tarda un operario en cambiar un contador

$h_{despl}$ : horas que tardan los operarios en recorrer la distancia desde la empresa hasta el primer edificio

$h_{mín}$ : mínimo de horas que los operarios van a dedicar al montaje y desmontaje de los camiones

$h_{extras}$ : horas extras que pueden realizar los operarios

$h_{estimadas}$ : horas que se estima que van a tardar los operarios en cambiar la siguiente batería

- **OTROS:**

**ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible

$\epsilon$ : error actual del contador

$\epsilon_i$ : error inicial del contador

**ritmo:** ritmo de deterioro de la medición de los contadores o velocidad de degradación

**r:** tasa de actualización nominal

**r':** tasa de actualización real

**s:** inflación

**i:** año

**P<sub>actual</sub>:** pérdidas económicas

**V<sub>i</sub>:** volumen promedio consumido por un usuario típico en el año "i"

**VI:** Vida Útil

**VAN:** Valor Actual Neto

**VANC:** Valor Actual Neto de la Cadena de Renovaciones

**PRI:** Periodo de Retorno de la Inversión

**V<sub>r</sub>:** consumo medio anual registrado

**c:** exponente que permite considerar la degradación de la medición del contador como no lineal

**ΔE:** mejora del error

**Δ<sub>ingresos</sub>:** mejora de los ingresos

**N<sup>o</sup><sub>operarios</sub>:** número de operarios que realiza la sustitución

**N<sub>estimado</sub>:** número de contadores que deben cambiarse en cada batería según el Método 1

**FactorExtra:** factor que se aplica a la mano de obra para tener en cuenta las posibles horas extras



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

La importancia que tiene el agua para el ser humano no es objeto de discusión. Se sabe que es un elemento crucial para el planeta y, por lo tanto, para la existencia de las personas. Sin embargo, durante mucho tiempo el hombre no ha sido consciente de que el agua también es un recurso limitado. El aumento de la población y la consecuente contaminación del medio ambiente, generada por el desarrollo humano, ha despertado la preocupación por este recurso. Tal es así, que la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en su proyecto para impulsar la transición a la sostenibilidad, establecido por 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), incluyó el número seis haciendo referencia al agua y pidiendo: *“Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”* (Unidas, 2018).

Ante esto, las empresas suministradoras no sólo se han encargado de transmitir a la población la necesidad de ahorrar agua, sino que algunas de ellas han optado por una nueva filosofía de gestión del agua más sostenible. Uno de los principales objetivos, por parte de estas entidades, es conseguir un sistema de abastecimiento que sea lo más eficiente posible y que permita aprovechar al máximo los recursos hídricos disponibles. Para lograrlo, las empresas han centrado parte de su lucha en reducir las pérdidas de agua que se producen en los sistemas de distribución.

La International Water Association (IWA) divide las pérdidas de agua de las redes de distribución en dos grupos: pérdidas reales y aparentes. Siendo las reales aquellos volúmenes de agua que se pierden por fugas, roturas o desbordamientos, y las pérdidas aparentes aquellas asociadas a todo tipo de inexactitudes en la medición, errores en la manipulación de datos o consumos no autorizados (Lambert, 2003). Dentro del grupo de pérdidas aparentes, numerosos investigadores destacan en sus publicaciones que las inexactitudes de los contadores de agua son la principal razón de existencia de estas pérdidas (Szilveszter, et al., 2015.). Además, algunos autores destacan la repercusión e importancia que tienen estas pérdidas en los sistemas de abastecimiento y en las empresas administradoras. Según Allan Lambert (Lambert, 2003), las pérdidas aparentes representan un 30% de las fugas totales. Y según un estudio realizado en Suiza, se reveló que las pérdidas aparentes representaban el 26% del agua no facturada en términos de volumen, pero un 69% en términos financieros para

la empresa de servicios públicos (Guibentif, et al., 2007), ya que, todo aquel volumen de agua que consumen los usuarios y que no es registrado, constituye una pérdida económica para la entidad encargada, que va aumentando cuanto mayor sea la tarifa del agua. Es por ello que, en los últimos años, los medidores de caudal han empezado a cobrar una gran importancia para las compañías suministradoras.

Los contadores de agua son elementos esenciales para poder llevar a cabo y cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Gracias a ellos, es posible el control y monitoreo de los volúmenes de agua suministrados. Algunos lo definen como *“las cajas registradoras y los responsables de asegurar una distribución equitativa entre el volumen de agua y los ingresos a través de los diferentes tipos de clientes dentro de la empresa”* (Szilveszter, et al., 2015.), pero no sólo permiten una sostenibilidad financiera entre empresa-cliente, sino que también son uno de los responsables de poder garantizar una mejor sostenibilidad ambiental. El buen funcionamiento de estos equipos de medición es indispensable para la detección y el control de fugas, así como, la correcta gestión del sistema. Es por ello, que algunas empresas se esfuerzan tanto en garantizar el buen estado de estos aparatos y su mejor calidad metrológica posible.

Para garantizar esta calidad de medición, es importante responder a tres puntos:

- Seleccionar el tipo de contador adecuado.
- Realizar un control de calidad de los contadores nuevos.
- Y una vez instalados, saber cuándo deben retirarse los contadores y sustituirse por unos nuevos.

En primer lugar, muchas empresas seleccionan el tipo de contador atendiendo únicamente a factores como el rendimiento de error inicial que tienen los mismos y que indican los fabricantes, y el precio de adquisición del contador. Esta práctica no es del todo fiable, ya que, está demostrado que el error que presenta inicialmente un contador no es constante a lo largo de su vida, sino que se va degradando debido a la influencia de diversos factores y situaciones, haciendo que aumenten las inexactitudes en su medición. Lo frecuente es que los volúmenes de agua no registrada, y por lo tanto las pérdidas de ingresos para la empresa, aumenten (Arregui, et al., 2011). Sin embargo, puede ocurrir el efecto contrario y contabilizar más agua

de la que realmente está pasando, afectando a los usuarios (Arregui, et al., 2014). Algunos de los factores o situaciones que afectan a la exactitud de la medición son:

- La posición en la que se instalan los contadores: algunos contadores se degradan más rápidamente y pierden calidad metrológica si se instalan en otra posición diferente a la que fueron calibrados.
- Calidad del agua que circula por ellos: la presencia de sólidos suspendidos en el agua puede afectar a la medición de algunos contadores.
- Elementos hidráulicos como válvulas que estén instalados aguas arriba del contador: pueden afectar al perfil de velocidades y provocar una medición inadecuada.
- Factores como las condiciones climatológicas también pueden afectar a la medición.
- Además, los medidores no registran los consumos de agua con la misma exactitud para todos los caudales que circulan a través de ellos. Normalmente, a caudales bajos los errores suelen ser mayores (López & Guerrero, 2013), por lo que, es importante conocer el tipo de usuario y consumo al que se destina el contador. Si el uso es doméstico y los caudales más frecuentes son bajos, es mejor instalar un contador más preciso.

Por todo esto, es importante tener en cuenta, a la hora de elegir un contador, los numerosos factores y condiciones que afectan a la medición de los mismos, ya que, la elección de un contador inadecuado conlleva grandes pérdidas económicas para la empresa y no ayuda a la gestión eficiente y sostenible del sistema de abastecimiento.

En segundo lugar, es necesario llevar a cabo un control de calidad de los contadores nuevos, puesto que, instalar un contador defectuoso supone para la empresa pérdidas económicas que aumentan en mayor o menor medida según el precio del agua. Los fabricantes, antes de entregar los aparatos a las empresas, ensayan individualmente los contadores a diferentes caudales y comprueban que los errores de medición no superan los errores máximos permitidos por la norma UNE-EN ISO 4064. Sin embargo, puede ocurrir que, en el proceso de transporte de los contadores, los datos de partida cambien debido a la manipulación de los aparatos. Por ello, es recomendable que las propias empresas suministradoras lleven a cabo un control de la calidad posterior (Arregui de la Cruz, et al., 2007).

Y en el tercer lugar, se encuentra una de las decisiones más complicadas para las compañías de abastecimiento debido a la dificultad de cálculo y dedicación de tiempo que supone. Una vez se elige el contador más adecuado y se comprueba que funciona correctamente, hay que llevar a cabo un control y gestión de todo el parque de contadores para asegurar que la medición sigue siendo lo más eficiente posible a medida que pasa el tiempo. Para esto, es importante saber cuándo un contador deja de funcionar correctamente y debe sustituirse por otro nuevo.

Se considera que un contador debe ser reemplazado por otro cuando el volumen de agua no contabilizada crece hasta tal punto que el medidor ya no proporciona ingresos a la empresa sino pérdidas económicas considerables. Por un lado, las pérdidas producidas por medidores que se encuentran atascados o que dejan de registrar caudal, se pueden identificar fácilmente a través de las lecturas periódicas que se realizan a los mismos y, por lo tanto, se pueden sustituir con mayor certeza. Sin embargo, *“la degradación gradual de la precisión es más difícil de detectar mediante las lecturas”* (J. Shields, et al., 2012) haciendo que la localización de contadores muy degradados sea complicada. Por otro lado, la complejidad y diversidad de los fenómenos físicos que alteran de diferentes formas a la medición de los contadores y que aceleran la degradación de los mismos de diferentes maneras según el modelo, no permite que la sustitución de un contador se guíe por parámetros únicos, como su edad o volumen totalizado (Puleo, et al., 2014), como indican algunas normativas. Radica aquí, en la cantidad de factores que afectan a la medición y las diferentes formas de hacerlo según el contador, la dificultad de calcular la vida útil de los mismos. Dentro de estos parámetros, quizás el más complicado de estimar es la tasa de degradación del error de los contadores.

Para determinar el ritmo al que se deterioran los medidores, es necesario ensayar contadores usados y estudiar cuánto ha cambiado su curva de error respecto a la inicial y si la curva sigue dentro los límites máximos especificados. Dado que los diferentes factores físicos que provocan la degradación, no afectan a todos los modelos y diámetros por igual, lo ideal es agrupar a los medidores según estas características y, ensayar el mayor número posible de contadores que permita sacar un valor ponderado del ritmo de deterioro.

Conociendo este valor y teniendo en cuenta el resto de factores como edad, volumen acumulado, error inicial, costes de adquisición, precio del agua y tasa de actualización, entre otros, el cálculo de la vida útil de los contadores se vuelve mucho más exacto, permitiendo

planificar la sustitución de estos aparatos y consiguiendo un parque de contadores más eficiente, en cuanto a igualdad de volúmenes suministrados y tarifas y mejor eficiencia del sistema.

En el libro *“Gestión integral de Contadores de Agua”* (Arregui de la Cruz, et al., 2007), sus autores elaboran un modelo económico, teniendo en cuenta todos los factores influyentes, para estimar cuándo un contador debe ser sustituido. También, lanzan un artículo: *“Graphical Method to Calculate the Optimum Replacement Period for Water Meters”* (Arregui, et al., 2011), proponiendo un método gráfico para calcular el periodo óptimo de reemplazo de los contadores, teniendo en cuenta las variables más influyentes. Hasta ahora, éste es el único método existente para calcular el periodo óptimo de sustitución de los medidores de agua que tenga en cuenta la mayoría de los factores que influyen en el cálculo.

## 1.2 Justificación del trabajo

Como se ha podido observar, dentro del apartado de *“seleccionar el contador de agua más adecuado para un sistema de abastecimiento determinado”*, tiene una gran repercusión el punto de *“conocer la vida útil de un contador”*, además de que en ambos interviene el parámetro de ritmo de deterioro. Elegir el contador más adecuado supone elegir aquel contador cuya vida útil no sea sólo la más larga posible, sino también la más eficiente en cuanto a términos de medición. Recae aquí la importancia de conocer cómo se deterioran los diferentes contadores a lo largo de su vida en servicio y cómo afectan diversas situaciones y circunstancias a los diferentes contadores de agua. Por ahora, se ha implementado el modelo económico existente para calcular la vida útil de los contadores de forma individual y, se ha dedicado tiempo al estudio del ritmo de deterioro y error global únicamente de contadores de pequeño calibre o domésticos. Existe así, una carencia de datos sobre los contadores de mediano y gran calibre.

Los estudios realizados hasta la actualidad y los modelos desarrollados suponen un gran avance en el objetivo de conseguir un abastecimiento más eficiente. Sin embargo, la ausencia de datos suficientes sobre el resto de contadores, incita a continuar la investigación del tema con mayor profundidad de cara al futuro.



Radica aquí la justificación del desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster, elaborado con la intención de poder avanzar en la investigación de una mejor gestión del parque de contadores.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 *Objetivos generales*

El objetivo fundamental de este proyecto es calcular la vida útil de los contadores, teniendo en cuenta nuevos parámetros que permitan una mayor aproximación a la realidad. Además de planificar la sustitución de contadores de agua instalados en batería, para optimizar los ingresos de la empresa y mejorar la eficiencia del funcionamiento del parque de contadores.

El segundo objetivo general es aportar datos sobre el ritmo al que se deteriora la medición de contadores de mediano calibre, con la finalidad de disponer de información real para poder realizar una elección más efectiva del modelo de contador y calcular la vida útil de los mismos.

### 1.3.2 *Objetivos específicos*

- Reconstrucción de modelo económico actual en Visual Basic for Applications (VBA).
- Inclusión, al modelo económico, de nuevos parámetros que afectan a la sustitución de contadores.
- Programación de la nueva metodología que emplea el modelo económico.
- Creación de parques de contadores residenciales para evaluar la funcionalidad del modelo económico creado.
- Ensayo en laboratorio de contadores de mediano calibre usados.
- Análisis de la degradación de los contadores de mediano calibre, a través del cálculo de las curvas de error de cada contador.
- Evaluación de los factores físicos que pueden alterar a la medición de los contadores de mediano calibre y cómo la afectan.
- Estimación del error global de los contadores de mediano calibre ensayados.
- Cálculo de la degradación del error global o ritmo de deterioro de los contadores de mediano calibre separados por modelo y diámetro.

- Estimación de una vida útil estándar para cada modelo y diámetro de contador, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos.

### 1.3.3 Limitaciones

Para saber con mayor exactitud y fiabilidad el ritmo al que se deterioran los diferentes modelos de medidores de mediano calibre, es necesaria la realización de ensayos de un mayor número de contadores. Sin embargo, conseguir esto en un tiempo limitado supone una tarea laboriosa para la empresa por tres razones:

- Hay que retirar contadores usados a comercios, escuelas o industrias teniendo que interrumpir su producción diaria, por lo que, las empresas deben buscar el momento más adecuado tanto para ellos como para los clientes, avisándoles con tiempo.
- Hay que sustituir los contadores que se retiran por unos nuevos. Lo cual supone, muchas veces, un coste adicional para la empresa.
- Además, cuesta más retirar una gran cantidad de contadores de este calibre, ya que, son más escasos que, por ejemplo, los domésticos que abundan más y se manejan mejor.

## 1.4 Estructura del trabajo

La presente memoria se ha estructurado en 10 capítulos, los cuales se resumen a continuación:

**Capítulo 1:** introduce la problemática actual existente y describe los objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo de este proyecto.

**Capítulo 2:** recoge la información que existe hasta la actualidad sobre la temática del proyecto, haciendo hincapié en la explicación del modelo económico que existe actualmente.

**Capítulos 3 y 4:** hacen referencia al objetivo principal de este trabajo: el desarrollo de un nuevo modelo económico para calcular la vida útil de los contadores de agua. El capítulo 3 explica de manera detallada la funcionalidad del modelo, exponiendo todos los parámetros que lo componen y haciendo una comparación entre el modelo que existe actualmente y el modelo creado. El capítulo 4 muestra un ejemplo de aplicación para comprobar y verificar la funcionalidad del modelo elaborado en este Trabajo de Fin de Máster.

**Capítulos 5 y 6:** hacen referencia al segundo objetivo del trabajo: aportar datos sobre el ritmo al que se deterioran los contadores de mediano calibre. El capítulo 5 explica todo el proceso llevado a cabo en el laboratorio y los cálculos necesarios para la obtención del ritmo de deterioro de estos contadores, así como, la exposición de los resultados obtenidos. El capítulo 6 expone un ejemplo de aplicación, utilizando los valores obtenidos, para calcular una vida útil estándar para cada modelo y diámetro de contador. Además, analiza cómo afectan diferentes parámetros en el cálculo de la vida útil de los contadores.

**Capítulos 7 y 8:** en ellos se exponen, respectivamente, las conclusiones obtenidas durante la elaboración del trabajo y las posibles líneas futuras que pueden surgir a raíz de este proyecto.

**Capítulos 9 y 10:** en el capítulo 9 se indica toda la bibliografía a la que se ha hecho referencia en esta memoria. Y en el capítulo 10 se expone el anexo con toda aquella información que no se ha mostrado en los anteriores capítulos.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Como ya se ha indicado, actualmente no existen datos sobre el ritmo al que se deterioran los contadores de mediano calibre, por lo que, en este apartado nos centraremos únicamente en el objetivo principal de este trabajo, explicando el modelo económico existente. Para presentar la metodología que emplea el modelo actual, se utiliza la bibliografía de los creadores del mismo: *“Gestión Integral de Contadores de Agua”* (Arregui de la Cruz, et al., 2007).

### 2.1 Factores que intervienen

Los factores que más intervienen, tanto en la política de sustitución como en la elección del contador más adecuado, son los siguientes:

- **Costes iniciales ( $C_i$ )**

Los costes iniciales son aquellos costes que la empresa invierte al inicio de la sustitución. Dentro de ellos y en el modelo económico actual, se engloban en: costes de adquisición de los contadores, costes de instalación de los mismos y costes administrativos necesarios para llevar a cabo la sustitución. Los costes iniciales se recuperan 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 tarifa del agua y a la calidad metrológica del contador que se necesita. La calidad de un contador está directamente relacionada con el precio de venta o adquisición del mismo. Un contador más preciso o, lo que es lo mismo, con una mayor calidad metrológica, será más costoso que uno con una calidad peor. Por lo que, es lógico que en aquellos abastecimientos en los que la tarifa del agua sea más cara, se empleen contadores más precisos y, por lo tanto, más caro. Este aumento en los costes iniciales supone una recuperación a largo plazo de los mismos más duradera.

- **Costes distribuidos ( $C_d$ )**

Los costes distribuidos hacen referencia a las pérdidas monetarias que le supone a la empresa el agua no contabilizada por los contadores. A diferencia de los  $C_i$ , que se pagan únicamente cuando se compra el contador, los  $C_d$  se distribuyen en el tiempo. Estos costes son

directamente proporcionales al agua no registrada y a la tarifa del agua. A mayor volumen de agua no contabilizada o a mayor tarifa del agua, mayor serán las pérdidas económicas para la empresa.

Los costes distribuidos aparecen desde que se instala el contador y aumentan a lo largo de su vida útil hasta tal punto que se vuelve inevitable la sustitución del aparato. Esto se debe a que el aparato no es perfecto y está sujeto a errores de medición desde su puesta en funcionamiento y, dicho error va aumentando a medida que se degrada la medición con el uso contador. Hay que tener en cuenta que, un contador que se degrada rápidamente, es decir, tiene un ritmo de deterioro elevado, tendrá que sustituirse con mayor antelación que otros, ya que, su medición será muy inexacta.

- **Curva de error**

La curva de error nos indica la evolución del error de medición de un contador a diferentes caudales. La forma de la curva depende del principio de funcionamiento y de las características de diseño del contador.

Como ya se ha explicado, ningún contador es capaz de registrar todo el volumen de agua que pasa a través de él, ya que, como todos los aparatos ninguno es perfecto y siempre están sujetos a un error inevitable. Este error que presentan los aparatos nuevos es el que conocemos como error inicial ( $\epsilon_i$ ) y varía con la medición de diferentes caudales y, a lo largo de toda la puesta en servicio del medidor, degradándose con su uso. Un contador que se degrada con mayor rapidez se debe sustituir antes, ya que, a medida que más se degrada su medición, más aumenta el volumen de agua no registrada y, consecuentemente, las pérdidas económicas de la empresa. Aunque, como ya se explicó, puede generarse el efecto contrario y en vez de contabilizar menos agua de la que realmente se consume, un contador degradado puede registrar más agua de la que circula, aumentando las facturas de los usuarios. El efecto que produce la degradación de la medición en las pérdidas económicas, tanto para la empresa como para los abonados, puede tener una mayor o menor repercusión según el valor de la tarifa del agua. Si el  $m^3$  es más caro, las pérdidas económicas serán mayores. Es por ello, que la curva de error de los contadores y, por lo tanto, la evolución de las mismas a lo largo del tiempo, es un parámetro importante dentro del modelo.

- **Patrón de consumo**

El patrón de consumo nos proporciona información sobre la frecuencia a la que consumen los usuarios los diferentes caudales. Como ya se ha mencionado, el volumen no registrado por un contador varía con el error que presenta el mismo. Y dicho error no es constante para diferentes caudales, siendo mucho mayor a caudales más bajos. Por ello, es importante conocer el tipo de usuario al que se destina un contador. Si se instala un contador poco preciso o con un ritmo de deterioro elevado en un abastecimiento en el que el porcentaje de agua más frecuente se da a caudales bajos, hará que los errores de medición sean mayores. Además, si a esto le sumas el efecto de la tarifa del agua, a mayor tarifa mayor serán las pérdidas económicas para la empresa, impidiendo que el contador siga instalado por mucho tiempo.

- **Precio de venta del agua**

La tarifa del agua es un parámetro que ha aparecido en la explicación de todos los parámetros anteriores, ya que, depende del precio del m<sup>3</sup> de agua que las pérdidas económicas sean o no mayores. Con el incremento del precio del agua, cobra mayor importancia la gestión eficiente del parque de contadores. En un abastecimiento donde el precio del m<sup>3</sup> de agua es más caro, la renovación de los contadores degradados es vital para no aumentar las pérdidas económicas futuras. Como consecuencia, la frecuencia de renovación de los medidores será mayor y, deberá respetarse con mayor cautela. Además, los contadores que requiere el abastecimiento deberán de ser más precisos, por lo que aumentarían los costes iniciales.

Por otro lado, hay que tener en cuenta el tipo de tarifa que se emplea. Si el abastecimiento tiene una tarifa por bloques, las pérdidas de ingresos producidos por el agua no registrada se deben evaluar con el bloque correspondiente al último m<sup>3</sup> registrado.

- **Tasa de actualización**

La tasa de actualización representa el valor del dinero con el paso del tiempo. Simboliza la rentabilidad media que un inversor espera obtener, actualizando a valor de hoy los flujos de efectivos estimados para dicho proyecto. La inclusión de este parámetro permite calcular de forma correcta la repercusión que tendrán los costes distribuidos en el futuro, trasladando el valor de las pérdidas futuras a su valor actual.

Para la conversión del valor monetario futuro al actual, se suele emplear la tasa de actualización nominal ( $r$ ), sin embargo, en el modelo se emplea la tasa de actualización real ( $r'$ ) (Ecuación 1), que tiene en cuenta el efecto de la inflación ( $s$ ).

$$r' = \frac{1 + r}{1 + s} - 1 \quad (1)$$

Donde:

- $r$ : tasa de actualización nominal (%)
- $r'$ : tasa de actualización real (%)
- $s$ : inflación (%)

Por otro lado, la (Ecuación 2) nos permite calcular las pérdidas económicas en un año de vida “ $i$ ” del contador:

$$P_{actual} = \frac{C_{H2O}}{(1 + r')^i} \quad (2)$$

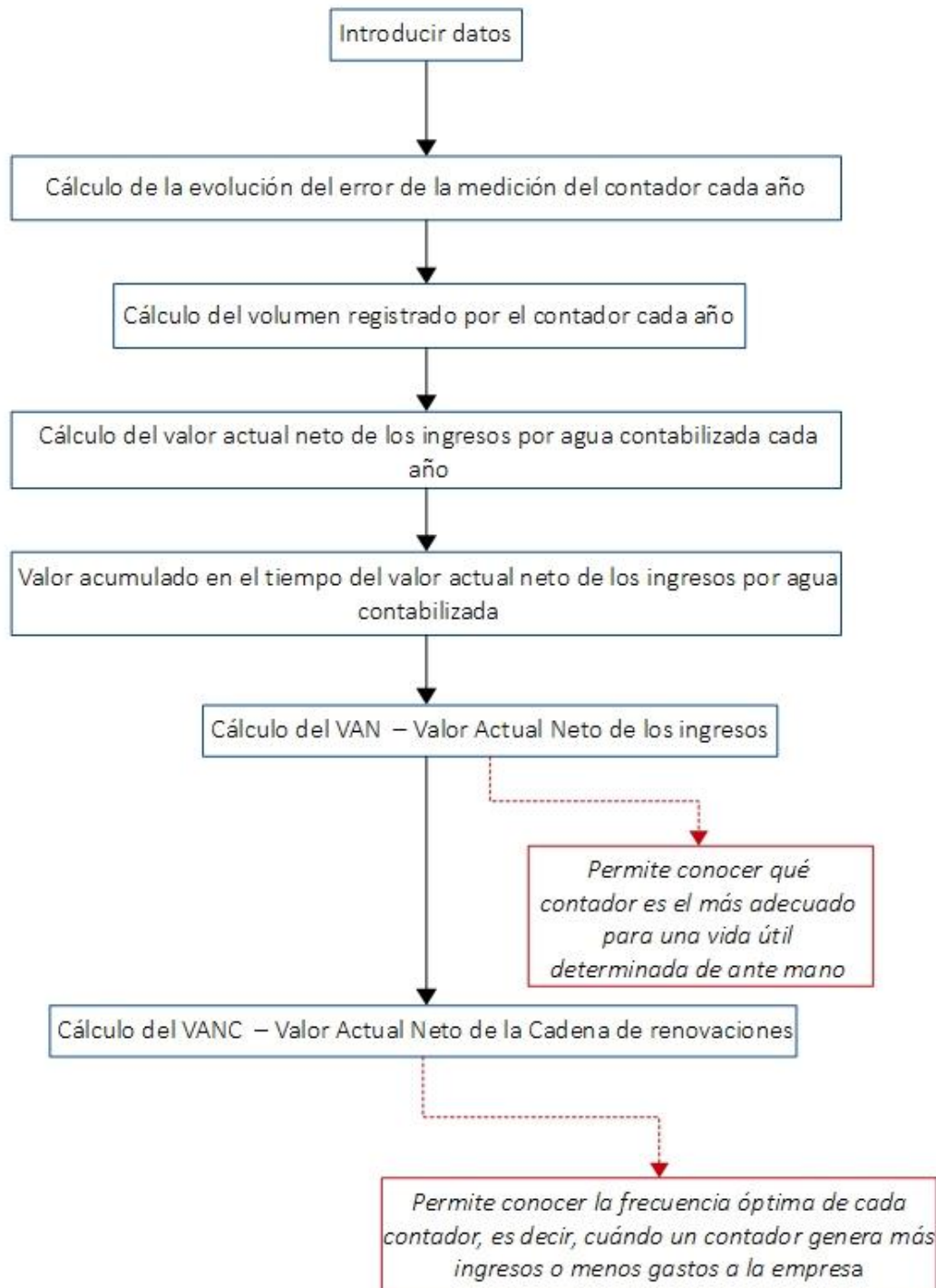
Donde:

- $P_{actual}$ : pérdidas económicas (€)
- $C_{H2O}$ : precio de venta del  $m^3$  de agua (€/m<sup>3</sup>)
- $i$ : año

Cuanto mayor es  $r'$ , menor es el valor de las pérdidas económicas sufridas por el agua no contabilizada y mayor es la rentabilidad que se exige al dinero futuro.

## 2.2 Esquema de la metodología del modelo económico actual

A continuación, se presenta un esquema para sintetizar la metodología que emplea el actual modelo económico y en el siguiente apartado, se procede a la explicación detallada de cada uno de los pasos que sigue el modelo, con el objetivo de identificar el contador más adecuado para un determinado abastecimiento y calcular la frecuencia óptima de renovación de estos aparatos.



**Ilustración 1.** Esquema de la metodología del Modelo Económico Actual



### 2.3 Descripción detallada del modelo económico actual

Se considera tiempo óptimo de reemplazo de un contador a aquel año en el que habiendo recuperado el dinero que se invirtió inicialmente en el aparato, dicho medidor deja de proporcionar beneficios al estar sujeto a un importante error de medición. Es decir, aquel año en el que la empresa en vez de obtener ingresos, los está perdiendo.

Todos los modelos económicos propuestos hasta la actualidad que calculan el periodo óptimo de reemplazo, se basan en la evaluación del coste total ( $C_t$ ) que supone el aparato de medida a la empresa durante el tiempo que éste permanece en servicio. Este procedimiento se puede evaluar de dos formas: la primera es buscando la opción que genere menos costes y la segunda mirando la opción que genere más ingresos.

Los costes totales pueden dividirse en dos categorías:

$$C_t = C_i + C_d = C_{compra} + C_{inst} + C_{adm} + \sum_{i=1}^n V_i * Error_i * \frac{C_{H2O}}{(1 + r')^{1-i}} \quad (3)$$

Donde:

- $C_t$ : coste total (€)
- $C_i$ : costes iniciales (€)
- $C_d$ : costes distribuidos (€)
- $C_{compra}$ : coste de compra o adquisición del contador (€)
- $C_{inst}$ : coste de instalación del contador (€)
- $C_{adm}$ : coste de administración (€)
- $V_i$ : volumen promedio consumido por un usuario típico en el año "i" ( $m^3$ )
- $Error_i$ : error de medición promedio que existe en el año "i" (%)
- $r'$ : tasa de actualización real (adim)

Los tres primeros términos de la ecuación hacen referencia a los costes iniciales definidos anteriormente, en los que se engloba la adquisición, instalación y administración del contador. Se excluye de los mismos el coste de mantenimiento, ya que, en contadores de pequeño diámetro es nulo. Estos costes se consideran como datos fijos, ya que no varían a lo largo de la vida útil del contador, sino que se invierten únicamente en el momento inicial. Por otro lado, el último término de la ecuación hace referencia al coste que supone el agua no

contabilizada debido a los errores de medición o, con otras palabras, a los denominados costes distribuidos. Este concepto no es un valor fijo, sino que, en general, aumenta con el tiempo de utilización. El ritmo de crecimiento de este parámetro depende de las características del abastecimiento y de los propios contadores. Al variar con el tiempo, este parámetro debe ser corregido con la tasa de actualización real ( $r'$ ) para trasladar su valor monetario al presente.

La Ecuación 3 se emplea para analizar la opción que genera menos costes. Si por el contrario, en vez de analizar los costes que conlleva cada contador, se suponen los ingresos que generan los mismos, la ecuación sería la misma cambiando los signos (Ecuación 3).

$$Ingresos = -C_{compra} - C_{inst} - C_{adm} + \sum_{i=1}^n V_i * (1 - Error_i) * \frac{C_{H2O}}{(1 + r')^{1-i}} \quad (4)$$

El modelo económico propuesto en “*Gestión Integral de Contadores de Agua*” (Arregui de la Cruz, et al., 2007), emplea la segunda opción de maximizar los ingresos.

Calcular los costes fijos iniciales ( $C_i$ ) es sencillo. Una vez se tiene su valor, se pasa a deducir el valor de los costes variables distribuidos ( $C_d$ ). Para su cálculo se requiere conocer primero el error del contador en cada año (Ecuación 5) y el volumen de agua que registra el contador cada año (Ecuación 6).

El error del contador en el primer año de su vida útil se supone igual al error inicial. Sin embargo, con el paso de los años el contador se ve deteriorado aumentando su error en la medición. Por ello, para el resto de años se tiene en cuenta en el cálculo del error, el ritmo al que se deteriora el mismo con el tiempo de servicio.

$$\varepsilon = \varepsilon_i + ritmo * i \quad (5)$$

Donde:

- $\varepsilon$ : error actual del contador (%)
- $\varepsilon_i$ : error inicial del contador (%)
- ritmo: ritmo de deterioro de la medición del contador (%/año)

El volumen registrado por el contador el primer año es el consumo de los usuarios sujeto al error inicial e inevitable que presenta el aparato. Aquí su medición es, en general, más exacta que con el paso del tiempo. Por lo que, para el resto de años se tiene en cuenta el parámetro

de evolución del error. Como se puede comprobar en la Ecuación 6, a medida que aumenta el tiempo de servicio del contador ("i"), aumenta su error y registra menos volumen.

$$V_i = consumo * (1 + (\varepsilon_i + (ritmo * i))) \quad (6)$$

Donde:

- consumo = consumo medio anual por usuario (m<sup>3</sup>)

Con el dato de volumen registrado ya se puede calcular el valor actual de los ingresos por agua registrada que genera la contabilización con el paso del tiempo.

$$Valor\ actual\ ingresos\ por\ agua\ contabilizada = consumo * \frac{C_{H2O}}{(1 + r')^i} \quad (7)$$

En el primer año de vida útil del contador no tiene sentido tener en cuenta la tasa de actualización, ya que, el valor monetario ya es el actualizado. Sin embargo, a partir del segundo año de vida ya se empieza a tener en cuenta r'. Con el paso de los años el valor monetario del agua se va desvalorizando y los ingresos van disminuyendo.

El valor actual de los ingresos por agua contabilizada se considera un valor acumulativo en el tiempo. Restándole a éste parámetro acumulado los costes iniciales obtenemos el parámetro conocido como Valor Actual Neto de los Ingresos (VAN). El VAN representa la diferencia entre lo que se ganará menos lo que se invirtió, por lo que, nos permite conocer el valor que tendrían los ingresos en un año determinado. Si la empresa dispone de diferentes modelos de contadores y quiere saber cuál de ellos generará más ingresos en un año de vida útil concreto, sólo habría que comparar el VAN calculado para cada contador e identificar el modelo que más ingresos genere en ese mismo año. Sin embargo, si la empresa quiere determinar cuál es la frecuencia óptima de cada contador sin tener una vida útil definida, este parámetro no es válido.

La frecuencia óptima de renovación de un contador es aquella que menos costes o mayores ingresos le supone a la empresa y, para poder conocer la vida útil de cada contador, se deben estudiar diferentes alternativas de inversión con diferentes frecuencias de renovación. El cálculo del VAN simple no permite contraponer diferentes vidas útiles para saber cuál es la que mayores beneficios aporta, por lo que, para llevar a cabo este paso se utiliza otro parámetro conocido como el Valor Actual Neto de la Cadena de renovaciones (VANC). El VANC

permite identificar el VAN de una sucesión infinita de renovaciones (Ecuación 8), donde la frecuencia óptima de renovación será igual al año que mayor valor de VANC tenga, si se analizan los ingresos, o el que menor valor de VANC proporcione, si se analizan las pérdidas.

$$\begin{aligned}
 VANC &= VAN + \frac{VAN}{(1+r')^i} + \frac{VAN}{(1+r')^{2i}} + \frac{VAN}{(1+r')^{3i}} + \dots = \\
 &= VAN * \left( 1 + \frac{1}{(1+r')^i} + \frac{1}{(1+r')^{2i}} + \frac{1}{(1+r')^{3i}} + \dots \right) \quad (8) \\
 &= VAN * \frac{(1+r')^i}{(1+r')^i - 1} = VAN * m
 \end{aligned}$$

## 2.4 Ejemplo de aplicación

Aplicando la metodología explicada anteriormente a dos modelos de contadores con diferentes características (Tabla 1), se puede observar como el modelo económico actual responde a dos preguntas:

- ¿Qué contador es el más adecuado instalar para una frecuencia de renovación determinada?
- ¿Cuál es el tiempo óptimo de reemplazo de cada contador?

**Tabla 1.** Datos de dos modelos de contadores diferentes. Fuente: (Arregui de la Cruz, et al., 2007)

	<b>Modelo A</b>	<b>Modelo B</b>
Precio de compra (€)	15	20
Coste de instalación (€)	12	12
Gastos de administración (€)	2	2
Error inicial (%)	-6%	-5%
Ritmo de deterioro (%/año)	-0,3	-0,3
Consumo medio anual por usuario (m3)	120	120
Tasa de actualización real (r') (%)	2,9%	2,9%
Precio del agua (€/m3)	0,3	0,3

**Tabla 2.** VANC de la inversión para diferentes frecuencias de renovación. Modelo A. Fuente: (Arregui de la Cruz, et al., 2007)

Año	Costes iniciales (€)	Volumen registrado (m <sup>3</sup> )	Valor		VAN total de los ingresos (€)	VANC de los ingresos (€)
			Valor actual de los ingresos por agua contabilizada (€)	Valor actual de los ingresos acumulados por agua registrada (€)		
1	-29	112,8	33,84	33,84	4,84	169,40
2		112,44	32,77	66,61	37,61	667,68
3		112,08	31,73	98,34	69,34	832,51
4		111,72	30,72	129,06	100,06	913,98
5		111,36	29,75	158,81	129,81	962,12
6		111,00	28,81	187,62	158,62	993,61
7		110,64	27,89	215,51	186,51	1015,59
8		110,28	27,01	242,52	213,52	1031,63
9		109,92	26,15	268,67	239,67	1043,72
10		109,56	25,32	293,99	264,99	1053,05
...		...	...	...	...	...
24		104,52	16,10	574,53	545,53	1088,29
25		104,16	15,58	590,11	561,11	1088,44
26		103,80	15,09	605,20	576,20	<b>1088,47</b>
27		103,44	14,60	619,81	590,81	1088,42
28		103,08	14,14	633,94	604,94	1088,27
29		102,72	13,69	647,63	618,63	1088,06
30		102,36	13,25	660,88	631,88	1087,77

**Tabla 3.** VANC de la inversión para diferentes frecuencias de renovación. Modelo B. Fuente: (Arregui de la Cruz, et al., 2007)

Año	Costes iniciales (€)	Volumen registrado (m <sup>3</sup> )	Valor		VAN total de los ingresos (€)	VANC de los ingresos (€)
			Valor actual de los ingresos por agua contabilizada (€)	Valor actual de los ingresos acumulados por agua registrada (€)		
1	-34	114	34,2	34,2	0,20	7,00
2		113,64	33,12	67,32	33,32	591,51
3		113,28	32,07	99,39	65,39	785,07
4		112,92	31,05	130,44	96,44	880,91
5		112,56	30,07	160,51	126,51	937,66
6		112,20	29,12	189,63	155,63	974,89
7		111,84	28,20	217,83	183,83	1000,96
8		111,48	27,30	245,13	211,13	1020,07
9		111,12	26,44	271,57	237,57	1034,55
10		110,76	25,60	297,16	263,16	1045,78
...		...	...	...	...	...

24	105,72	16,28	580,85	546,85	1090,91
25	105,36	15,76	596,61	562,61	1091,34
26	105,00	15,26	611,87	577,87	1091,63
27	104,64	14,77	626,65	592,65	1091,80
28	104,28	14,30	640,95	606,95	<b>1091,88</b>
29	103,92	13,85	654,79	620,79	1091,86
30	103,56	13,40	668,20	634,20	1091,77

Se puede observar en las Tablas 1 y 2, como el contador más adecuado para un periodo de renovación determinado, en este caso suponemos que es igual a 10 años, es el Modelo A, ya que, es el que más ingresos genera a la empresa obteniendo un mayor VAN.

Por otro lado, las tablas muestran los diferentes tiempos óptimos de renovación de cada modelo de contador. El periodo óptimo del Modelo A es de 26 años y el del Modelo B es de 28 años. Ya que, son estos años en los que los beneficios para la empresa son mayores, es decir, el VANC obtiene su máximo valor, y a partir de este periodo el VANC va disminuyendo. En caso de que un contador supere los 30 años de vida útil, es mejor desestimar los cálculos y sustituirlo antes, ya que no se considera razonable tener tanto tiempo instalado un aparato de medida. Si se cumpliera ese año de renovación para ese modelo de contadores, probablemente un gran número de contadores se encontrarían parados o sujetos a grandes errores de medición, ya que, las características de un abastecimiento varían y no afectan a cada contador por igual.

## 3 DESARROLLO DE UN NUEVO MODELO ECONÓMICO

### 3.1 Introducción al nuevo modelo económico

El modelo económico creado en este proyecto se programa en el lenguaje de Microsoft Visual Basic for Applications (VBA), para conseguir una exposición de los resultados más clara y sencilla de entender.

Con el desarrollo de este modelo, no solo se pretende estimar la vida útil de los contadores con mayor exactitud, sino que también se pretende organizar la sustitución de los mismos agrupándolos por baterías.

A diferencia del modelo ya creado, el nuevo modelo tiene en cuenta, además de los parámetros y metodología existente, otros factores de interés como la evaluación de los contadores tanto individual como conjuntamente dentro de la batería que le corresponde a cada uno y, la inclusión de los costes de desplazamiento y montaje por separado dentro de los costes iniciales. Fundamentalmente, esto es lo que permite aproximar los cálculos aún más a la realidad. Agrupando los contadores en baterías se puede planificar la sustitución de los mismos, priorizando el cambio de aquellas baterías en peor estado y que, además, se sitúen en una misma zona para evitar gastos adicionales en el desplazamiento. Esto modificaría los costes iniciales y, por lo tanto, la vida útil de los contadores. Los costes iniciales, en este caso, varían con cada día que se lleven a cabo las sustituciones, por lo que, no sería un dato fijo como se ha considerado hasta ahora, sino variable. Con este propósito, se intentaría reducir los costes iniciales para aumentar, por un lado, los beneficios de la empresa y, por el otro, la eficiencia del funcionamiento del parque de contadores al disponer de aparatos renovados y de un control más exhaustivo de las sustituciones.

### 3.2 Datos de partida

A continuación, se describen los datos de entrada necesarios para la ejecución del modelo económico. Principalmente, los datos que se requieren son parámetros de ubicación, identificación y precios que se consideran de fácil obtención para la empresa gestora.

En primer lugar, se piden datos sobre la identificación y características de los contadores:

- **Número de serie de los contadores (Id):** es importante, tanto para la empresa como para el desarrollo del modelo, tener una base de datos con la que se pueda identificar cada contador y sus correspondientes características. Además, esto permite al modelo asignar de forma más automática a los contadores algunas variables o características.
- **Referencia geográfica del lugar donde se encuentran instalados los contadores (coordenadas UTM):** este dato es fundamental para poder agrupar a los contadores en sus respectivas baterías y estudiar el estado de los mismos de forma conjunta. Aquellos contadores que tengan las mismas coordenadas se les asignará el mismo número de identificación de la batería. Además, conocer las coordenadas de los contadores permite calcular con mayor exactitud los costes de desplazamiento, como se explica más adelante.
- **Diámetro de los contadores (mm):** es necesario conocer el diámetro de cada contador, ya que, los costes de instalación no son los mismos para contadores de diferente calibre. Instalar o sustituir un contador con diámetro menor o igual a 30 mm, es decir, un contador de uso residencial, supone menos tiempo de mano de obra y, por lo tanto, menor coste de montaje que un contador de mayor calibre.
- **Consumo medio anual de los usuarios registrado (m<sup>3</sup>):** este dato aporta información sobre el volumen de agua que registra anualmente cada contador y permite estimar el consumo real de los usuarios ( $V_r$ ), para poder calcular términos de interés como la vida útil de los medidores o los ingresos que generan las sustituciones de los mismos.
- **Tipo de uso al que se destina el agua que miden los contadores (doméstico, industrial, riego o comercial):** el precio del m<sup>3</sup> de agua consumida varía según el uso al que se destine, siendo mayor para aquellos abastecimientos destinados a industrias y menor para los abastecimientos de uso residenciales.
- **El tipo de tarifa a la que se somete el abastecimiento (fija o por bloques):** el cálculo de los ingresos obtenidos por la realización de las sustituciones y de la vida útil de los contadores, puede variar según el tipo de tarifa. Si la tarifa es por bloques, se toma el precio del último m<sup>3</sup> de agua registrada para el cálculo de la vida útil y, el precio medio o exacto para el cálculo de los ingresos.



- **La fecha de instalación de los contadores y la fecha en la que se ejecute el modelo (dd/mm/aaaa):** permiten estimar la edad del contador o el tiempo que llevan los mismos en funcionamiento.
- **El error inicial que presentan los contadores ( $\epsilon_i$ ) (%).**
- **Velocidad de degradación o ritmo al que se deterioran los contadores (%/año):** conocer el ritmo de deterioro de los contadores y su error inicial es fundamental para calcular la evolución del error y estimar el periodo óptimo de reemplazo de los contadores. Aquellos contadores con un error inicial y ritmo de deterioro más elevado necesitarán sustituirse con mayor prioridad que otros.
- **Exponente “c” para el cálculo del error (adim):** en el nuevo modelo cabe la posibilidad de considerar la velocidad de degradación de la medición como no lineal incluyendo, en la ecuación del cálculo del error, dicho exponente “c”. Si se prefiere emplear una degradación lineal, bastaría con asignar el valor de “c” = 1.
- **Los costes de adquisición, instalación y administración de los contadores (€):** dichos costes dependen de las características y modelo de los contadores. Aunque en el nuevo modelo se tendrán en cuenta los costes de instalación por separado, como costes de desplazamiento y montaje, se deben introducir los costes fijos de instalación para realizar los cálculos empleando el modelo actual y compararlo con el nuevo.

En segundo lugar, es necesaria la introducción de datos sobre los operarios que van a realizar la sustitución de los contadores:

- **Número de horas de la jornada laboral (h):** como en el modelo nuevo se pretende llevar a cabo la planificación de la sustitución de los contadores en tiempo real, es necesario conocer el horario de los operarios para poder calcular cuántos contadores pueden cambiar en un día.
- **Ubicación inicial de los operarios (coordenadas UTM):** hace referencia a las coordenadas de la base donde los operarios montan el camión e inician su trayecto hasta las viviendas para sustituir los contadores. Este lugar suele ser alguna nave de la empresa suministradora. Este dato permite conocer el desplazamiento inicial que deben realizar los operarios y el coste que esto supone.

Además, se deben introducir datos de precios para poder calcular los costes de desplazamiento y de montaje por separado y los costes distribuidos con mayor exactitud:

- **El valor de la tasa de actualización nominal (r) (%).**
- **El valor de la inflación (s) (%):** este parámetro junto con el anterior (r), es necesario para conocer la tasa de actualización real ( $r'$ ) que se explicó en el “Apartado 2.1” de este proyecto.
- **El mínimo de horas que los operarios van a dedicar al montaje y desmontaje de los camiones ( $h_{\min}$ ) (h):** este dato hace referencia a lo que tardan los operarios en colocar correctamente los aparatos necesarios para la sustitución en el camión y lo que tardan en colocar los aparatos retirados tras la sustitución. Además, tiene en cuenta el tiempo mínimo que los operarios van a estar desplazándose de un lado a otro.
- **El coste mínimo que supone las horas mínimas de montaje-desmontaje de los camiones ( $C_{\min.\text{despl}}$ ) (€/h):** si un operario está menos del tiempo mínimo establecido montando y desmontando el camión, se le aplica directamente el precio mínimo. Este precio se tendrá en cuenta dentro del coste de desplazamiento.
- **El coste asociado a las horas que dura el desplazamiento ( $C_{\text{camión}}$ ) (€/h):** es el precio que supone las horas que tardan los operarios en realizar un recorrido en un tiempo superior al tiempo mínimo ( $h_{\min}$ ) y, que se supone igual al coste de mano de obra.
- **El precio del kilómetro recorrido o kilometraje ( $C_{\text{despl}}$ ) (€/Km):** permite calcular el coste que suponen los kilómetros recorridos por los operarios.
- **Velocidad a la que se desplaza el camión (velocidad) (Km/h):** se estima una velocidad de desplazamiento de los operarios para calcular el coste que supone el tiempo de desplazamiento. Esta velocidad debe tener un valor que represente situaciones reales con las que se puede encontrar un operario como atascos, semáforos, paso de peatones, tiempo que tardan en encontrar el edificio al que deben desplazarse y aparcamiento, etc. Por ello, es aconsejable reducir su valor por debajo de la velocidad mínima que puede alcanzar un vehículo dentro de una ciudad.
- **El precio de la mano de obra ( $C_{\text{Mano.Obra}}$ ) (€/h):** depende del diámetro del contador, ya que, se tarda más tiempo en cambiar un contador con diámetro superior a 30mm que uno con diámetro inferior. Esto no solo afecta a los costes iniciales, sino también al número de contadores que un operario puede cambiar durante su jornada laboral.

- **Factor aplicable a las horas extras que puedan realizar los operarios algún día (FactorExtra) (adim):** en el caso de que los operarios tengan que alargar algún día su jornada laboral debido al número de contadores que le corresponden cambiar, se tendrá en cuenta en los costes iniciales y se les pagará las horas extras realizadas. Además, con la aplicación de este factor extra, también se puede tener en cuenta el coste de desplazamiento que le supone a los operarios regresar al punto de partido, para ello, basta con aumentar más el valor del factor.
- **El precio del m<sup>3</sup> de agua según el tipo de tarifa (fija o por bloques) y el uso al que se destina esa agua (doméstico, industrial, riego o comercial) (€/m<sup>3</sup>)**

Finalmente, se deben introducir algunas variables que más adelante, en el procedimiento de cálculo detallado, se explicará su utilidad en el modelo:

- **Radio de la zona de estudio (m):** una vez el operario ha llegado a un edificio para cambiar los contadores, si en ese edificio los contadores a cambiar no superan el número de contadores que puede cambiar un operario durante su jornada laboral, se estudian los edificios de los alrededores para ver cuántos contadores más se deben cambiar. Para ello, se establece un radio en el que se considera que los costes de desplazamiento son los mínimos, es decir, que el tiempo de desplazamiento no supera el tiempo establecido como mínimo.
- **Umbral máximo del Periodo de Retorno de la Inversión (PRI) (años):** el PRI, explicado con más detalle en el “Apartado 3.4.3.1”, permite conocer el tiempo en el que una empresa recupera los costes que invirtió para efectuar el cambio de los contadores y priorizar la sustitución de las baterías. El umbral máximo de PRI se establece con la finalidad de no sustituir aquellas baterías cuyo valor de PRI lo superen, ya que, se considera que la recuperación de los ingresos sería muy larga para la empresa y el estado de la batería no está tan deteriorado como para llevar a cabo la renovación. De esta forma, la empresa puede elegir el tiempo máximo con el que quiere recuperar su inversión.
- **Umbral a partir del cual se cambian los contadores (años):** para saber si un contador ha superado su vida útil (VU) y, por lo tanto, debe sustituirse hay que calcular la diferencia entre su VU y el tiempo de lleva en servicio o edad. Si el valor de dicha

diferencia es inferior al umbral establecido, se considera que debe cambiarse dicho contador.

- **Vida útil límite (años):** Hay que tener en cuenta que, un abastecimiento con contadores instalados desde hace más de 25 años no es eficiente porque estarán sujetos a muchos errores de medición. Por lo que, si la VU final de un contador supera esta edad, se considera una edad elevada para seguir en funcionamiento y se reduce su valor a este límite para garantizar mejor su funcionalidad.
- **Condiciones que debe cumplir una batería para cambiar más contadores de los que se tenía previsto:** como ya se explicó, comparando la diferencia entre la vida útil y la edad del contador con el “umbral a partir del cual se cambian los contadores”, se puede saber cuántos contadores hay que cambiar en cada batería. Sin embargo, se puede dar el caso de que, en algunas baterías, la cantidad de contadores que quedan sin sustituirse sea ínfima y que, además, estos contadores presenten una vida útil muy baja dando como resultado que los operarios no tengan que reemplazarlos actualmente pero sí en un periodo de tiempo posterior muy corto. En este caso, se implantan tres condiciones que permiten conocer si es más rentable cambiar directamente todos los contadores de la batería o dejar esa cantidad instalada y volver al cabo de un tiempo para realizar la sustitución. Las condiciones impuestas son las siguientes: si la cantidad de contadores que no se piensa cambiar, porque superan el “umbral a partir del cual se cambian los contadores”, representa un 20% de la batería en total y un total de 3 contadores o menos y, además, la vida en servicio que les queda [VU-Edad] es menor de 3 años, se considera que es más rentable cambiar la batería completa.

### 3.3 Esquema general del funcionamiento del modelo económico nuevo

A continuación, se expone un esquema general con la intención de esquematizar el proceso que sigue el modelo programado y, posteriormente se irá explicando detalladamente por pasos la metodología empleada y se definirán los términos que aparecen nuevos.

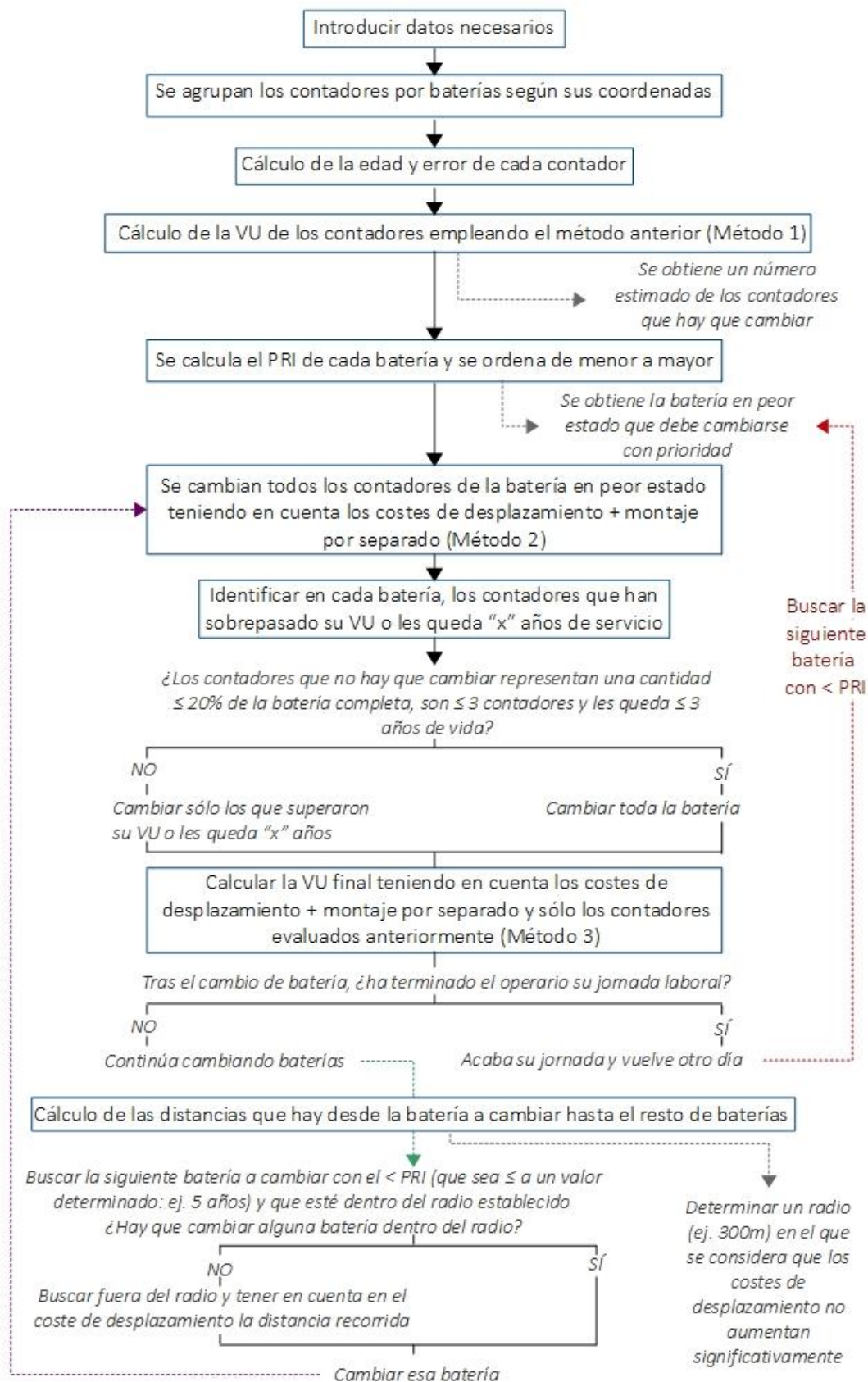


Ilustración 2. Esquema general de la metodología del nuevo modelo económico

### 3.4 Procedimiento de cálculo detallado

En términos generales, el modelo económico desarrollado emplea tres métodos diferentes para calcular la VU final de los contadores:

- **Método 1:** emplea la metodología del modelo económico que existe actualmente, es decir, calcula la vida útil de los contadores individualmente y tiene en cuenta unos costes iniciales fijos.
- **Método 2:** tiene en cuenta los costes iniciales variables, es decir, el montaje y desplazamiento por separado, y cambia todos los contadores de todas las baterías como método de aproximación para calcular el número final de contadores que se considera necesario cambiar.
- **Método 3:** tiene en cuenta los costes iniciales variables y cambia sólo aquellos contadores de cada batería que se consideraron necesarios sustituir con el Método 2.

En los siguientes apartados, se explicará con más detalle todo el procedimiento de la sustitución por pasos y cada uno de los métodos indicados anteriormente.

#### 3.4.1 Paso 1: Agrupar los contadores en baterías

En primer lugar, hay que introducir en el modelo los datos de partida señalados en el “Apartado 3.2” para poder realizar los cálculos. El modelo desarrollado en Excel dispone de dos hojas para la introducción de los datos, en las cuales se indica dónde deben ir los mismos.

En la primera hoja se introducen los datos necesarios sobre las características de cada contador, tal y como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 4.** Ejemplo de introducción datos de partida

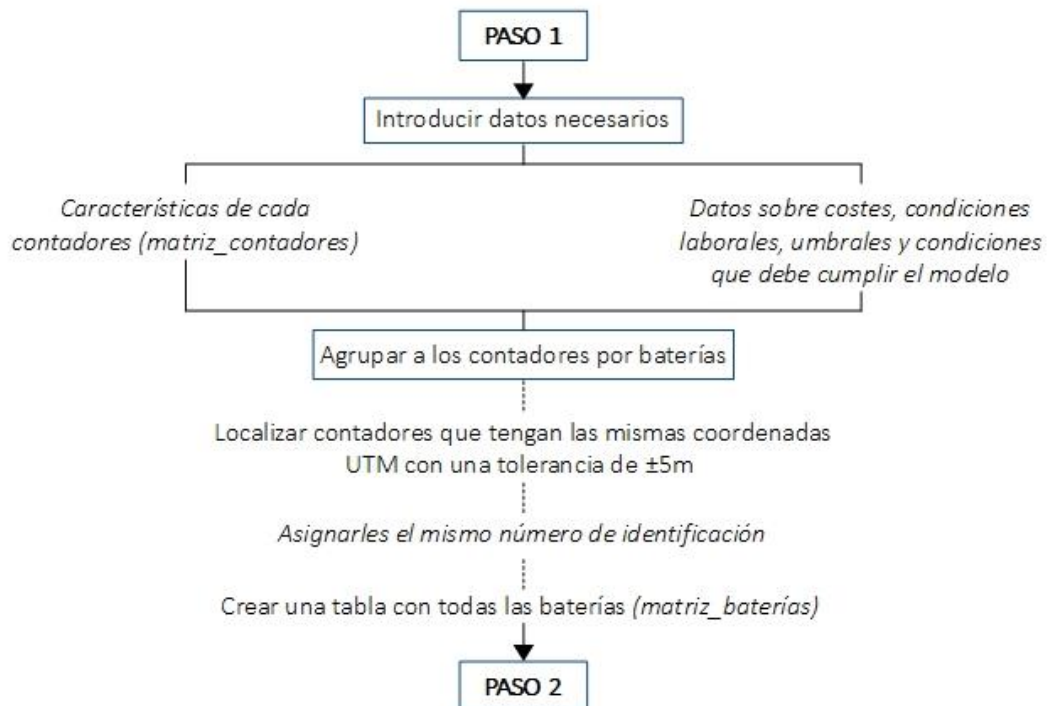
Nº de serie del contador	Coordenadas UTM		Diámetro contador [mm]	Consumo medio anual registrado [m³]	Tipo de uso	Tipo de tarifa	Fecha de instalación
	x2	y2					
a	71.200	4.369.600	15	1.499,9	Doméstico	Fija	28/06/2005
b	71.800	4.370.900	15	664,1	Doméstico	Bloque	24/02/1994

...	Volumen totalizado a fecha actual [m <sup>3</sup> ]	Ritmo de deterioro [%/año]	Error Inicial [%]	Exponente "c"	Coste adquisición [€]	Coste instalación [€]	Coste administración [€]
...	14.369,8	-0,5%	-5%	1	17,65 €	9,00 €	2,00 €
...	20.688,4	-0,5%	-5%	1	17,65 €	9,00 €	2,00 €

Y en la segunda hoja, se introducen datos sobre los costes que se deben tener en cuenta en el desplazamiento y montaje y el resto de variables explicadas en el "Apartado 3.2".

En segundo lugar, una vez se introducen los datos, se procede a la agrupación de los contadores en sus respectivas baterías. Para ello, se localizan todos contadores que tengan las mismas coordenadas UTM o cuyas coordenadas sean iguales, pero con una tolerancia de más o menos 5 metros, y se les asigna el mismo indicador de batería (Id\_batería). Las baterías existentes se agrupan en una tabla quedando, por un lado, una primera tabla con los datos de cada contador por individual y una segunda con los datos de cada batería. Con la final de optimizar la ejecución del proceso de cálculo, cada tabla se declara como una matriz dentro de la programación (la primera matriz con el nombre de "datos\_contadores" y la segunda como "datos\_bateria").

La matriz datos\_contadores presenta resultados como la vida útil calculada con cada método (Método 1, 2 y 3) o los ingresos que genera cada contador empleando los diferentes métodos, y la matriz datos\_bateria muestra resultados como el número de contadores total que presenta cada batería, el número de contadores que se deben sustituir según cada método, el orden de sustitución de las baterías, las horas que se tardan en cambiar cada una de las baterías, el periodo en el que se amortiza la inversión realizada en cada batería, los ingresos y gastos que genera cada batería sustituida según el método empleado o el error global que presenta cada batería tras realizar las sustituciones con los diferentes métodos, entre otras cosas.



*Ilustración 3. Esquema del primer paso que sigue el modelo económico desarrollado*

### 3.4.2 Paso 2: Aplicación del Método 1

El segundo paso que ejecuta el modelo, es el cálculo de la vida útil de cada contador siguiendo la metodología empleada en el modelo económico que existe actualmente y el cual se explicó con detalle en el “Apartado 2.3” de esta memoria y se resumen por pasos en la “Ilustración 1”.

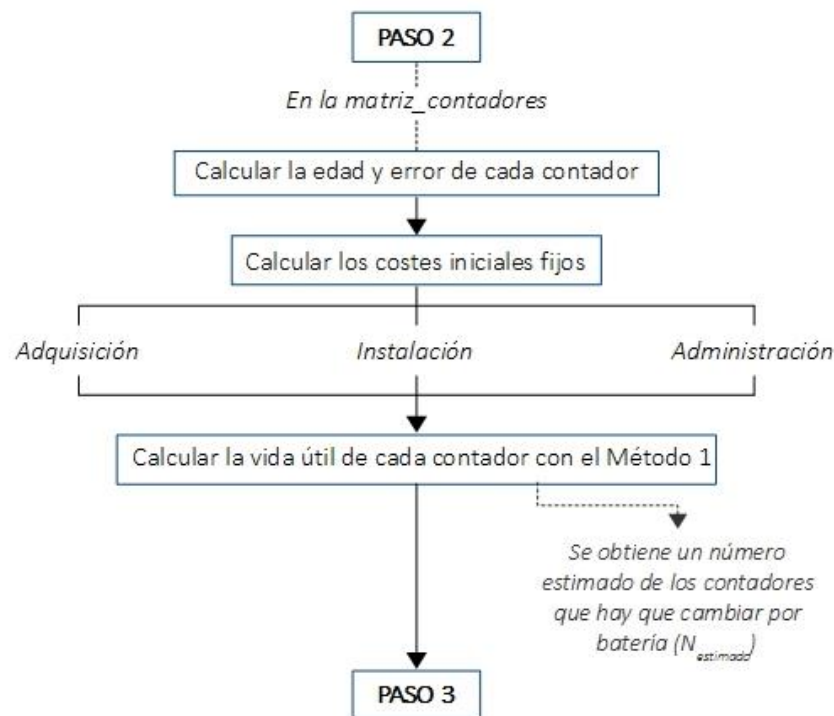
La única diferencia que presenta el cálculo de la vida útil de cada contador con el Método 1 respecto al método existente ya explicado, es que en vez de prolongar los cálculos durante “i” años, se han calculado por meses llegando a un total de 30 años. De esta forma se obtiene una mayor exactitud en el modelo, ya que, se puede calcular la evolución del error de la medición y el volumen que registra el contador cada mes logrando una mayor fidelidad de los resultados. Por otro lado, el cálculo no se prolonga más de 30 años porque se considera que este tiempo ya es un periodo excesivo para mantener un contador instalado.

Una vez los contadores están agrupados por baterías y se calcula la vida útil de cada uno de ellos, sólo habría que localizar dentro de cada batería, el número de contadores que presentan una diferencia entre su VU y edad inferior al “Umbral a partir del cual se cambian los



contadores” establecido como dato de partida. Dicho umbral se describe en el “Apartado 3.2” e indica que todos aquellos contadores que llevan instalados más tiempo del que deberían o del que indica el umbral, deben ser sustituidos.

Cabe destacar que el modelo actual utiliza como costes iniciales unos costes fijos (coste de adquisición, instalación y administración) que se introducen como datos de partida, tal y como se indica en la Tabla 4. Por lo que, el número de contadores que hay que sustituir calculado con el Método 1 ( $N_{\text{estimado}}$ ), es sólo una estimación que se empleará en alguno de los siguientes apartados.



**Ilustración 4.** Esquema del segundo paso que sigue el modelo económico desarrollado

### 3.4.3 Paso 3: Localización de la primera batería a cambiar

Se considera que un contador debe sustituirse cuando ya no aporta ingresos a la empresa abastecedora. Esto suele ser por dos razones: porque la compañía ya ha recuperado la inversión inicial que hizo en los aparatos y porque el contador está tan sujetos a errores de medición que la empresa suministra más agua de la que realmente contabiliza, generando pérdidas económicas.

Como uno de los objetivos de este trabajo es planificar la sustitución de los contadores, es necesario conocer cuáles están en peor estado para cambiarlos lo antes posible.

### 3.4.3.1 Periodo de Retorno de la inversión (PRI)

Para poder priorizar el cambio de los medidores se emplea el parámetro conocido como Periodo de Retorno de la Inversión (PRI):

$$PRI = \frac{C_i}{\Delta_{\text{ingresos}}} = \frac{C_i}{V_r * \Delta\varepsilon * C_{H2O}} \quad (9)$$

Donde:

- PRI: Periodo de Retorno de la Inversión (años)
- $\Delta_{\text{ingresos}}$ : mejora de los ingresos al sustituir el contador (€/año)
- $V_r$ : Consumo medio anual real de los usuarios calculado con la Ecuación 10 ( $\text{m}^3/\text{año}$ )

$$V_r = \frac{\text{consumo registrado}}{1 + \varepsilon} \quad (10)$$

- $C_{H2O}$ : es el coste del agua teniendo en cuenta que, si el tipo de tarifa es por bloques, se coge el precio del último  $\text{m}^3$  como ocurre en el cálculo de la VU. Esto se emplea como aproximación. La sustitución de un contador conlleva un registro más exacto del agua consumida por los usuarios, es decir, un aumento del volumen de agua registrado respecto al volumen que registrada el contador deteriorado. Dado que no se conoce a priori la magnitud de dicho aumento para poder aplicar el precio exacto o medio por bloque que le corresponde, se asume directamente que el precio que le pertenece es el precio que tiene el último  $\text{m}^3$  registrado por el contador deteriorado. (€/m<sup>3</sup>)
- $\Delta\varepsilon$ : mejora del error calculada con la Ecuación 11 (%)

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_i \quad (11)$$

Donde:

- $\varepsilon$ : error actual del contador calculado con la Ecuación 12 (%)

$$\varepsilon = \varepsilon_i - \text{ritmo} * (\text{edad})^c \quad (12)$$

Donde:

- c: exponente que permite considerar la degradación de la medición del contador como lineal si su valor es 1 o, como no lineal si su valor es distinto a 1 (adim)
- edad: es la edad que tienen los contadores o el tiempo que llevan instalados, calculada como la diferencia entre la fecha de instalación y la fecha en la que se ejecuta el modelo (años)

El error que tiene el contador en el año actual ( $\varepsilon$ ) se representa como el error que presentaba inicialmente el mismo, sujeto a una degradación temporal que puede ser mayor cuanto mayor sea la velocidad a la que se degrada (ritmo) la medición en el tiempo.

Por otro lado, se conoce como mejora del error a la mejora en la medición que supondría reemplazar un contador usado con un error ya degradado, por otro con un error de medición inicial y, por lo tanto, mucho menor. Esta mejora del error, lleva consigo una mejora de los ingresos.

El PRI representa, por lo tanto, el tiempo que la empresa tarda en recuperar la inversión realizada por la instalación del contador. Su ecuación establece la relación entre lo que la compañía invierte (los costes iniciales) y lo que ganaría de más si cambiara el contador ( $\Delta_{\text{ingresos}}$ ).

Para entender mejor la funcionalidad del parámetro PRI, suponemos el siguiente ejemplo: consideramos dos contadores (Contador A y Contador B) con el mismo volumen registrado y los mismos costes iniciales, pero con diferentes características metrológicas, es decir, cada uno con una precisión en la medición distinta. Se supone que el contador A, lleva instalado más tiempo y tiene un error de la medición mayor que el contador B.

**Tabla 5.** Datos del ejemplo para el cálculo del PRI

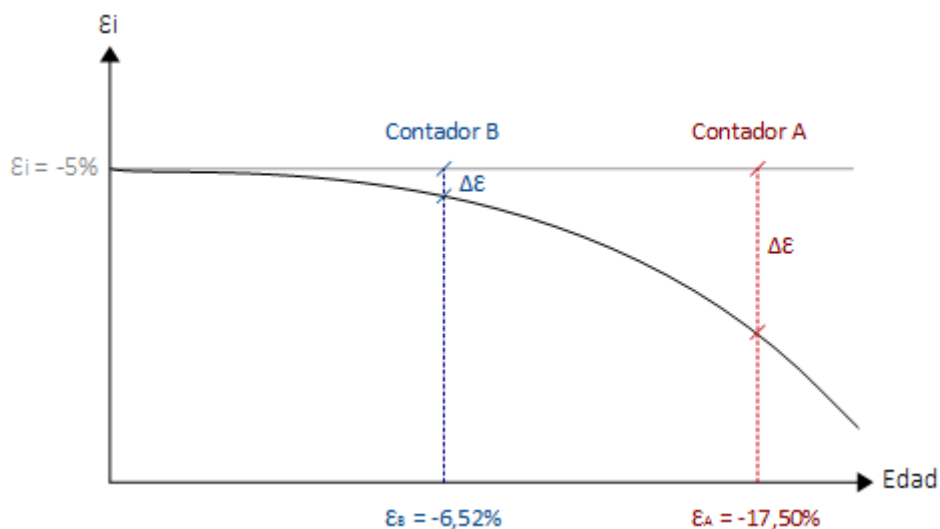
ID contador	$V_r$ (m <sup>3</sup> )	$P_{H_2O}$ (€/m <sup>3</sup> )	$\varepsilon_i$ (%)	$\varepsilon$ (%)	$C_i$ (€)
A	1.155,24	0,5	-5%	-17,50%	28,65
B	1.155,24	0,5	-5%	-6,52%	28,65

**Tabla 6.** Ejemplo para el cálculo del PRI

ID contador	$\Delta\epsilon$ (%)	$V_r * \Delta\epsilon * C_{H_2O}$ (€/año)	PRI (años)
A	12,50%	72,20	0,40
B	1,52%	8,78	3,26

Se puede observar como el contador A, está más deteriorado al tener mayor error de medición, por lo que, la mejora del error, en el caso de que éste se reemplazara por otro nuevo, sería mayor que en el caso del contador B (Ilustración 3). La mejora del error, si se cambia el contador A por uno nuevo, supondría un aumento de los ingresos en mayor medida que si se cambia el contador B. Si calculamos la relación entre los gastos iniciales de la empresa y la mejora de los ingresos, podemos obtener el valor PRI de cada contador y apreciar como una mayor mejora de los ingresos supone un menor valor de PRI. Por lo que, cuanto menor sea el valor del PRI antes debe cambiarse el contador por su peor estado de deterioro.

En el caso contrario, el contador B está menos deteriorado, por lo que, la mejora del error es menor, es decir, lo que registraría el contador de más si se cambiara, frente a lo que registra actualmente ( $V_r$ ) no tendría mucha variación. De manera, que si se sustituye el contador B se incrementarían los costes iniciales frente a los ingresos que se ganarían de más y la inversión se recuperaría en un periodo de tiempo demasiado largo para la empresa. En el caso del contador B se recuperaría la inversión en 3,26 años. En cambio, la inversión del contador A se recuperaría en menos de un año (PRI= 0,40 años).



**Ilustración 5.** Mejora del error de dos contadores con diferente error

Como se puede ver, gracias al parámetro PRI se puede priorizar la sustitución de los contadores y saber qué contador le conviene a la empresa reemplazar.

En este proyecto, se establece el parámetro “Umbral máximo del Periodo de Retorno de la Inversión” (Apartado 3.2) como límite a partir del cual no se deben sustituir los contadores porque se considera que el PRI es elevado y a la empresa le sale más rentable dejar instalado el medidor que llevar a cabo la sustitución. Además, como se pretende estudiar los contadores en batería y no de forma individual, se empleará el PRI de cada batería (Ecuación 13).

$$PRI_{batería} = \frac{\sum C_i}{\sum \Delta_{ingresos}} = \frac{\sum C_i}{\sum (V_r * \Delta E) * C_{H2O}} \quad (13)$$

$$\equiv \frac{C_i * N_{estimado}}{((V_r * \Delta E) * N_{estimado}) * C_{H2O}}$$

En el cálculo del periodo de retorno de inversión de las baterías se realiza el sumatorio de los costes iniciales ( $C_i$ ) y mejora de los ingresos ( $V_r * \Delta E * C_{H2O}$ ) sólo de aquellos contadores que se estimaron con el Método1 ( $N_{estimado}$ ) que debían sustituirse como aproximación, ya que, aún no se conoce el número final de contadores a cambiar. Dentro de los costes iniciales se tiene en cuenta el sumatorio de los costes fijos de adquisición de los contadores y de administración de los mismos y los costes variables de desplazamiento y montaje. Los costes variables se calculan como una aproximación teniendo en cuenta el número de contadores que deben cambiarse según el Método 1 ( $N_{estimado}$ ), y se calculan con la siguiente ecuación:

$$C_{desplazamiento} + C_{montaje} = C_{mín_{despl}} + h_{montaje} * N_{estimado} * C_{Mano.Obra} \quad (14)$$

Donde:

- $C_{mín_{despl}}$ : es el precio mínimo que se les pagará a los operarios por el desplazamiento que realicen en un tiempo mínimo (€)
- $h_{montaje}$ : son las horas que un operario tarda en cambiar un contador (h) (\*)
- $N_{estimado}$ : el número estimado de contadores que hay que cambiar en la batería (ud)
- $C_{Mano.Obra}$ : el precio de la mano de obra (€/h)

(\*) Se supone que un operario puede cambiar durante una jornada laboral de 8h, 35 contadores con diámetros menores o igual a 30 mm y 25 contadores con diámetros mayores a 30mm.

La realización de esta primera aproximación es fundamental para saber qué baterías deben cambiarse con mayor prioridad y poder gestionar posteriormente los reemplazos y calcular la vida útil de los contadores teniendo en cuenta los costes variables.

Finalmente, para conocer la priorización, el modelo ordena los  $PRI_{batería}$  calculados de menor a mayor y considera que la batería con menor PRI es la que debe cambiarse en primer lugar, debido a que es la batería en peor estado y la que más pérdida de los ingresos le está suponiendo a la empresa.

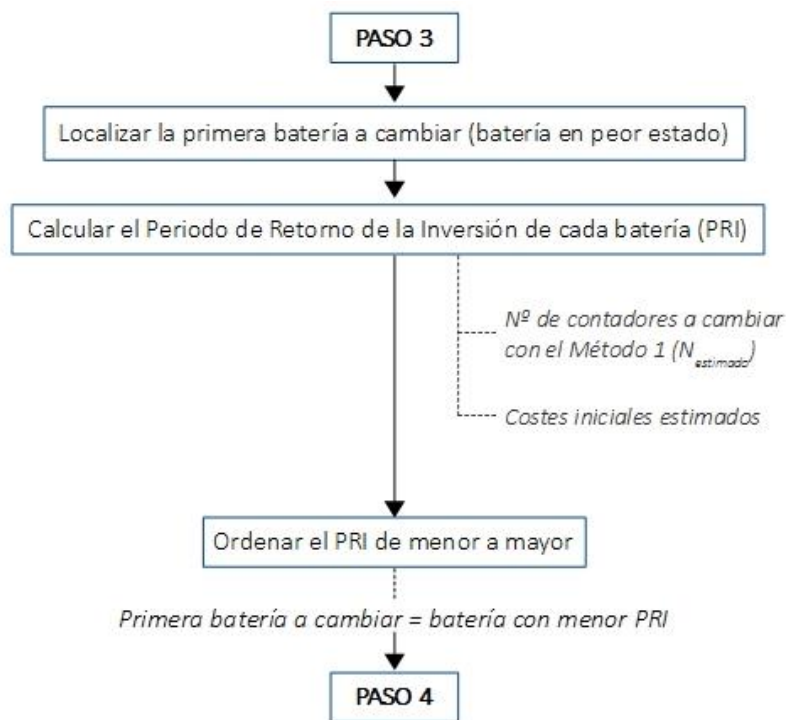


Ilustración 6. Esquema del tercer paso que sigue el modelo económico desarrollado

### 3.4.4 Paso 4: Aplicación del Método 2

Una vez se calculan los errores de medición que presentan los contadores actualmente y se localiza la primera batería a cambiar, el modelo busca y diferencia del resto los contadores

que pertenecen a dicha batería, comparando la identificación de las mismas (Id\_batería) y aplica el Método 2.

El segundo método calcula los costes iniciales variables que supondría cambiar la batería completa, para calcular la vida útil de todos los contadores que la constituyen. El cambio de todos los contadores que constituyen una batería sería el caso más favorable que podría pasar en cuanto a términos económicos se refiere, ya que, el coste que supone el desplazamiento de los operarios desde la empresa hasta la batería a cambiar es el mismo, sin embargo, el coste por contador se reduce al mínimo si se cambian todos los contadores a la vez que si se cambia un número determinado de contadores en la batería. Por otro lado, la vida útil de los contadores sería la más corta posible, ya que, se recuperaría antes la inversión. Esto supondría una mejora total en la eficiencia del parque de contadores. Sin embargo, se estarían cambiando aparatos que aún no están sujetos a grandes errores de medición y que pueden seguir en funcionamiento. Por ello, se considera que este método de sustitución, llevado a cabo aún por algunas empresas, es simplista y no se ajusta a la realidad. Aun así, la aplicación a priori del mismo permite estimar el número máximo de contadores que se deben cambiar en una batería. Gracias a este método se calcula la vida útil más corta que pueden llegar a tener los contadores y, restándole a ésta la edad que tiene cada contador, se conoce el número final de contadores que ya han sobrepasado su vida útil o que presentan una diferencia entre su VU y edad inferior al “Umbral a partir del cual se cambian los contadores” (Apartado 3.2) y que, por lo tanto, deben sustituirse. Finalmente, a este número final de contadores se le aplica posteriormente el Método 3.

En este trabajo, se ha optado por incluir esta metodología con la finalidad de que el número de contadores final a cambiar sea el máximo posible que pueda darse en una batería, aproximándonos a la realidad y consiguiendo una mejora de los ingresos y de la eficiencia del parque de contadores sin necesidad de realizar un cambio íntegro de las baterías, sino aprovechando al máximo la funcionalidad que ofrece cada contador.

#### ***3.4.4.1 Costes iniciales variables según el Método 2***

A continuación, se explica el cálculo de los costes iniciales que emplea el Método 2, teniendo en cuenta el cambio de todos los contadores de la batería en peor estado.

$$C_i = C_{compra} + C_{inst} + C_{adm} \quad (15)$$

Donde los costes de instalación se separan en costes de desplazamiento y de montaje (Ecuación 16).

$$C_{inst} = C_{desplazamiento} + C_{montaje} \quad (16)$$

Por un lado, los costes de desplazamiento del Método 2 ( $C_{desplazamiento.M2}$ ) se calculan como:

$$C_{desplazamiento.M2} = C_{mín_{despl}} + C_{tiempo.recorrido} + C_{recorrido} \quad (17)$$

Donde:

- $C_{tiempo.recorrido}$ : es el coste asociado al tiempo que los operarios tardan en desplazarse desde la empresa hasta el primer edificio donde realizan la sustitución (€)
- $C_{recorrido}$ : es el coste asociado a la distancia que recorren los operarios desde la empresa hasta el primer edificio donde realizan la sustitución (€)

Finalmente, el coste de desplazamiento se calcula con la Ecuación 18:

$$C_{desplazamiento.M2} \equiv \left( C_{mín_{despl}} + \left( (h_{despl} - h_{mín}) * C_{camión} \right) + (distancia * C_{despl}) \right) * N^o_{operarios} \quad (18)$$

Donde:

- $h_{despl}$ : son las horas que tardan los operarios en recorrer la distancia desde la empresa hasta el primer edificio. Se estima con la Ecuación 19, donde la velocidad es un dato de entrada (Apartado 3.2). (h)

$$h_{despl} = \left( distancia * \frac{1}{velocidad} \right) + h_{mín} \quad (19)$$



- $h_{\text{mín}}$ : es el tiempo mínimo que se supone que los operarios tardarán en realizar el trayecto y en cargar y descargar los contadores del camión. A este tiempo mínimo le corresponde un precio mínimo ( $C_{\text{mín.despl}}$ ) y, si los operarios tardan menos tiempo en realizar el recorrido, se les asignará directamente dicho coste. En la (Ecuación 18) se le resta a las  $h_{\text{despl}}$  el tiempo mínimo porque este ya se tiene en cuenta en el precio de  $C_{\text{mín.despl}} \cdot (h)$
- $C_{\text{camión}}$ : coste asociado al tiempo que tardan los operarios en hacer el recorrido y que se considera igual al coste de mano de obra (€/h)
- distancia: distancia que tienen que recorrer los operarios desde la base donde se encuentran y donde montan el camión hasta el edificio donde hay que realizar las sustituciones. Se calcula con las coordenadas UTM de cada ubicación. (Km)
- $C_{\text{despl}}$ : es lo que cuesta el Km de desplazamiento (€)
- $N^{\circ}_{\text{operarios}}$ : es el número de operarios que van a realizar la sustitución (ud)

Por otro lado, los costes de montaje del Método 2 ( $C_{\text{montaje.M2}}$ ) se calculan como:

$$C_{\text{montaje.M2}} = h_{\text{montaje}} * N^{\circ}_{\text{contadores}} * C_{\text{Mano.Obra}} * N^{\circ}_{\text{operarios}} \quad (20)$$

Las Ecuaciones 18 y 20 muestran los costes de desplazamiento y montaje, respectivamente, del grupo de contadores. Como el cálculo de la vida útil se realiza de forma individual para cada contador, es necesario asignar en la matriz `datos_contadores` el precio de desplazamiento y montaje que le corresponde a cada contador que se quiere reemplazar por individual, dividiendo el coste total entre el número de contadores a cambiar.

#### 3.4.4.2 Vida útil según el Método 2

Una vez se obtienen los costes iniciales variables que supone el cambio de todos los contadores de la batería, se puede calcular la vida útil de cada contador siguiendo la metodología que utiliza el método actual descrita en el “Apartado 2.3”. Es importante recordar que, según el tipo de tarifa, el coste del agua puede variar según la cantidad de volumen que registre el contador, como es el caso de la tarifa por bloques, o puede existir un precio único del agua, como ocurre con la tarifa fija. Si la tarifa a la que se somete el

abastecimiento en el que se encuentra un determinado contador es por bloques, para el cálculo de la vida útil hay que tener en cuenta el precio del último m<sup>3</sup> para estimar “el valor actual de los ingresos por agua contabilizada”.

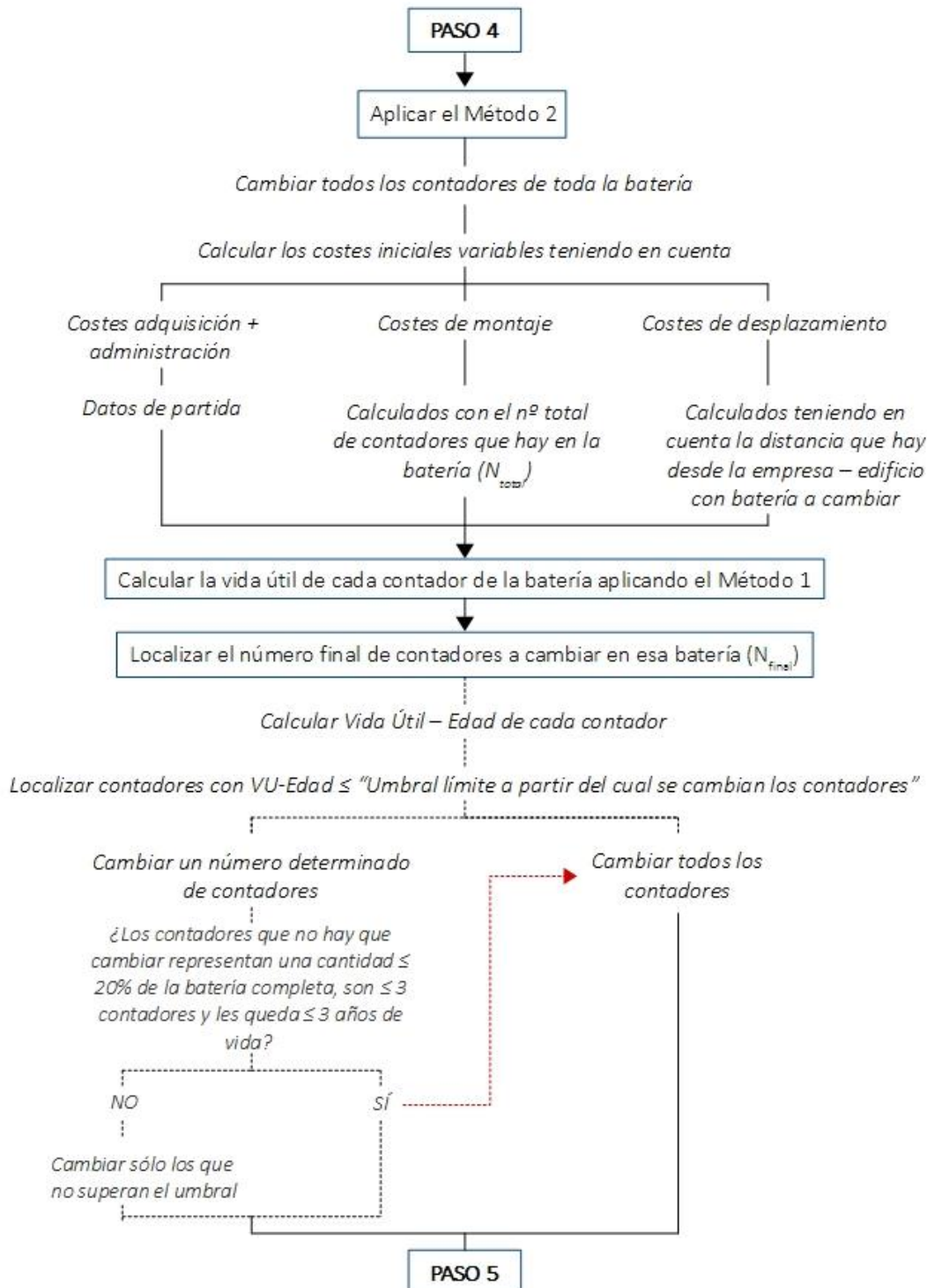


Ilustración 7. Esquema del cuarto paso que sigue el modelo económico desarrollado

### 3.4.5 Paso 5: Aplicación del Método 3

El siguiente paso, consiste en localizar el número de contadores final que hay que cambiar en la batería. Para ello, se calcula la diferencia entre la vida útil, calculada en el anterior apartado con el Método 2, y la edad o tiempo que lleva instalado cada contador. Si dicho valor es igual o inferior al “umbral a partir del cual se cambian los contadores”, que se introduce como dato de partida (Apartado 3.2), se considera que ese contador se debe sustituir, bien porque ha sobrepasado su vida útil o porque le queda poco tiempo para superarla y sale más rentable sustituirlo ya que dejarlo instalado. De esta forma, se conoce el número exacto de contadores que deben sustituirse en la batería analizada y se puede calcular las vidas útiles finales de los mismos, teniendo en cuenta en los costes iniciales sólo el montaje de los contadores que no superan el umbral establecido y el coste de desplazamiento que supone el cambio de cada uno de ellos.

#### 3.4.5.1 Costes iniciales variables según el Método 3

En el caso de que el número de contadores final a cambiar sea igual al número total de contadores que constituyen la batería, los costes de instalación variables y las vidas útiles son las mismas que las calculadas anteriormente con el Método 2. Sin embargo, si hay que cambiar menos contadores del número total hay que recalcular los costes iniciales, ya que, estos cambian con el número de contadores a sustituir.

A parte de tener en cuenta el “umbral a partir del cual se cambian los contadores”, en el modelo económico desarrollado se añaden las siguientes condiciones para el cálculo final del número de contadores a cambiar:

- El porcentaje de contadores que se deja en la batería sin cambiar porque aún superan el parámetro de “umbral a partir del cual se cambian los contadores”, supone menos o igual a un porcentaje impuesto (ej. 20%) del total de contadores que hay en la batería. (\*)
- El número de contadores que se dejan en la batería sin cambiar es igual o menor a una cantidad asignada contadores (ej. 3 contadores). (\*)
- Y la diferencia entre la vida útil y la edad de todos los contadores que se dejan sin cambiar es menor o igual a un número de años determinados (ej. 3 años). (\*)

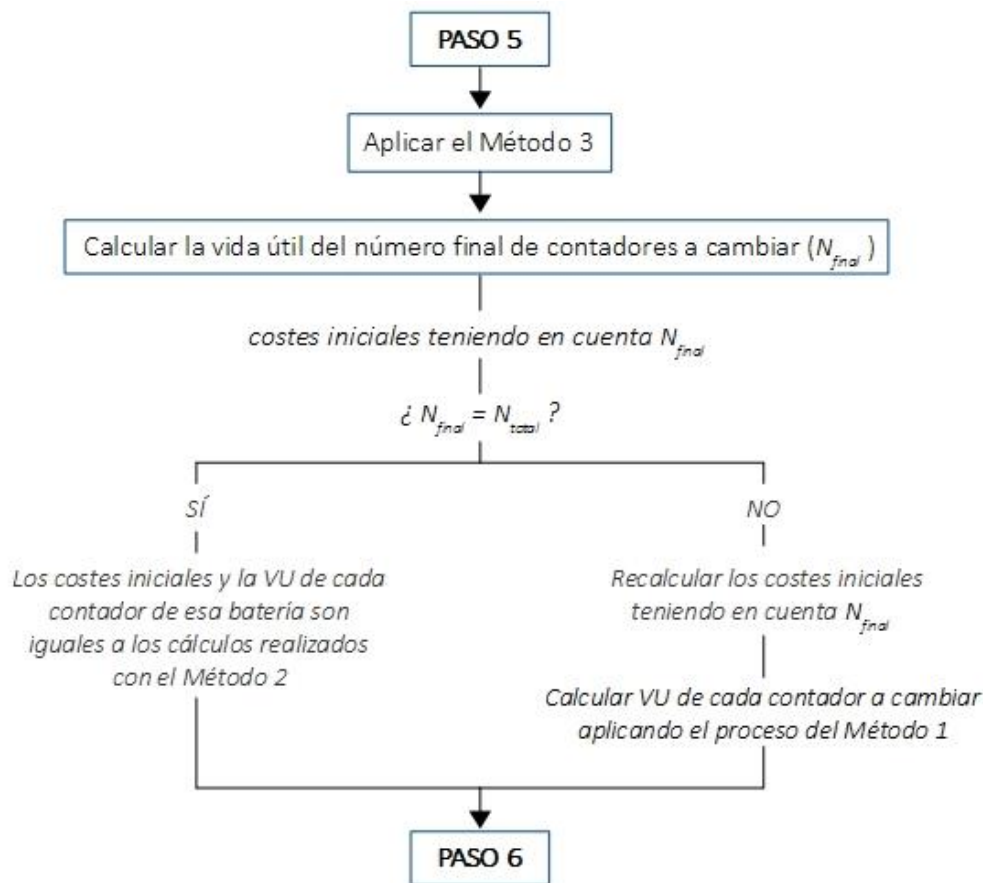
(\*) “Condiciones que debe cumplir una batería para cambiar más contadores de los que se tenía previsto” descritas en el “Apartado 3.2”.

Si se cumplen las tres condiciones, se considera que es más rentable cambiar en ese desplazamiento toda batería que volver, por ejemplo, dentro de 3 años para cambiar únicamente esos 3 contadores. Considerar estas condiciones y cumplirlas hace que los ingresos de la empresa aumenten aún más que si no se tuvieran en cuenta. En caso de que se cumplan las tres condiciones, los costes iniciales variables y la vida útil de cada contador será la misma que la calculada con el Método 2, ya que, hay que cambiar toda la batería.

Por otro lado, si no se cumplen las condiciones, se supone que no sale rentable cambiar toda la batería en ese desplazamiento, sino que conviene esperar unos años para realizar el resto de sustituciones, puesto que el número de contadores que quedan sin cambiar es elevado o les quedan aún mucho tiempo de puesta en servicio y su cambio inmediato sólo supondría a la empresa gastos adicionales y el no aprovechamiento completo de la funcionalidad del contador. En este último caso, habría que recalcular los costes iniciales siguiendo el mismo procedimiento que se empleó en el “Apartado 3.4.4.1”, y la vida útil de los contadores que hay que cambiar.

A medida que se van sustituyendo las baterías, el modelo muestra en la tabla resumen (datos\_bateria), los datos de interés de cada batería como:

- El número total de contadores que hay en cada batería (ud)
- El número de contadores final que hay que cambiar en cada batería según el Método 1 y el Método 3 (ud)
- El tiempo que se tarda en reemplazar los contadores a cambiar de cada batería (h)
- El número de operarios que harían falta para cambiar los contadores de cada batería de una vez (ud)
- Los costes iniciales invertidos en cada batería (€)
- El estado de cada batería, es decir, si ya está cambiada (valor = 1) o si aún no se ha cambiado (valor = 0)
- El orden de cambio de las baterías



*Ilustración 8. Esquema del quinto paso que sigue el modelo económico desarrollado*

### 3.4.6 Paso 6: Localización de las siguientes baterías a cambiar

Hasta aquí se ha explicado cómo localizar y cambiar la primera batería en peor estado. A continuación, para seguir con la planificación, habría que localizar las siguientes baterías a cambiar de forma automática. Para ello, se siguen los siguientes pasos:

En primer lugar, se revisa el número de horas que se tardó en cambiar la batería anterior y se establecen dos casos: si el número de horas que tardan en cambiar la anterior batería no supera la jornada laboral de los operarios, se continúa cambiando contadores ese mismo día (a). Si, por el contrario, se supera el número de horas laborales, el operario debe regresar al punto de partida y continuar otro día con la sustitución (b).

#### a. Si no se ha completado la jornada laboral de los operarios:

En este caso, los operarios deben continuar con la sustitución de contadores ese mismo día y, dado que ya se cambió la primera batería, se necesita ahora localizar la siguiente que esté en

peor estado. La siguiente batería a cambiar es aquella que está en peor estado y que más cerca se encuentra de la anterior batería cambiada, para generar el mínimo coste posible en el desplazamiento. La batería en peor estado se considera aquella que tenga el siguiente menor valor de Periodo de Retorno de la Inversión estimado (Apartado 3.4.3.1) y que, además, tenga un valor de PRI inferior al “umbral máximo del Periodo de Retorno de la Inversión” (Apartado 3.2).

Para poder localizarla, en primer lugar, se calcula la distancia que hay desde la anterior batería cambiada hasta el resto de las baterías, utilizando las coordenadas UTM. En segundo lugar, se ordenan las baterías por niveles según la zona en la que se encuentren:

- **Nivel 0:** engloba a todos aquellos contadores que ya se cambiaron en la anterior batería.
- **Nivel 1:** son todos aquellos contadores, en sus respectivas baterías, que no se han cambiado y están dentro del “radio de la zona de estudio” (Apartado 3.2). Este radio, como ya se explicó, define el perímetro dentro del cual los costes de desplazamiento son los mínimos ( $C_{\text{mín.despl}}$ ) al no superarse el tiempo mínimo de desplazamiento ( $h_{\text{mín}}$ ).
- **Nivel 2:** son todos aquellos contadores en sus respectivas baterías que no se han cambiado y están fuera del radio definido y que, por lo tanto, desplazarse hasta ellos supone un gasto adicional respecto al coste mínimo.

Con las baterías englobadas en niveles y ordenadas de menor a mayor según el Periodo de Retorno de la Inversión (Apartado 3.4.3.1), sólo habría que buscar la siguiente batería con menor PRI que esté dentro del nivel 1, es decir, aquella batería que esté en peor estado y que desplazarse hasta ella no suponga un gasto adicional.

Una vez se localiza la siguiente batería, se aplica el Método 2 (Apartado 3.4.4) para cambiar la batería completa calculando los costes de desplazamiento y montaje de la siguiente forma:

$$C_{\text{desplazamiento}_{NIVEL1}} = C_{\text{mín}_{despl}} * N^{\circ}_{\text{operarios}} \quad (21)$$

$$C_{\text{montaje}_{NIVEL1}} = h_{\text{montaje}} * N^{\circ}_{\text{contadores}} * C_{\text{Mano.Obra}} * N^{\circ}_{\text{operarios}} \quad (22)$$

Posteriormente, se aplica el Método 3 (Apartado 3.4.5.1) para obtener el número de contadores finales a cambiar en la batería en estudio y el cálculo de la vida útil de cada uno de ellos.

Si, por el contrario, no se existe ninguna batería en el nivel 1 que deba cambiarse porque su PRI es superior al “umbral máximo del Periodo de Retorno de la Inversión” (Apartado 3.2), se pasaría a localizar la peor batería en el nivel 2. Una vez el modelo encuentra la siguiente batería a cambiar, se aplica el Método 2 (Apartado 3.4.4) para calcular la vida útil de todos los contadores que hay en la batería. A diferencia de los costes empleados para el Nivel 1, en este caso, los costes de instalación se calculan con las Ecuaciones 18 y 20, ya que, al desplazarse fuera del radio, el tiempo de duración del recorrido supera el tiempo establecido como mínimo.

Para optimizar la programación y facilitar el procedimiento, debido a la cantidad de cálculos que se necesita realizar, se crean dos tablas (Tabla 7 y 8) que permiten obtener el coste de instalación total (desplazamiento + montaje) según el diámetro de los contadores, que afecta al montaje, y según la distancia que tengan que recorrer los operarios, que afecta al desplazamiento.

**Tabla 7.** Costes de instalación de los contadores que están en el Nivel 2 y tienen un diámetro  $\leq 30\text{mm}$

Contadores de diámetro $\leq 30\text{ mm}$	Nº final de contadores a cambiar:		6		Distancia que hay entre edificios [m]:		890,5	
	Fila de la matriz según esa cantidad:		7		Columna de la matriz según esa distancia:		7	
Nº contadores a cambiar	Distancias entre edificios [m]							
	400	500	600	700	800	900	...	9000
12	13,34 €	13,58 €	13,82 €	14,06 €	14,30 €	14,54 €	...	34,05 €
2	15,71 €	15,96 €	16,20 €	16,44 €	16,68 €	16,92 €	...	36,43 €
3	18,09 €	18,33 €	18,57 €	18,81 €	19,05 €	19,29 €	...	38,80 €
4	20,47 €	20,71 €	20,95 €	21,19 €	21,43 €	21,67 €	...	41,18 €
5	22,84 €	23,08 €	23,32 €	23,56 €	23,80 €	24,05 €	...	43,56 €
6	25,22 €	25,46 €	25,70 €	25,94 €	26,18 €	26,42 €	...	45,93 €
...	...	...	...	...	...	...	...	...
130	319,79 €	320,03 €	320,27 €	320,51 €	320,75 €	320,99 €	...	340,50€

**Tabla 8.** Costes de instalación de los contadores que están en el Nivel 2 y tienen un diámetro > 30mm

Contadores de diámetro >30 mm	Nº final de contadores a cambiar:		4		Distancia que hay entre edificios [m]:		500,5	
	Fila de la matriz según esa cantidad:		5		Columna de la matriz según esa distancia:		3	
Nº contadores a cambiar	Distancias entre edificios [m]							
	400	500	600	700	800	900	...	9000
1	14,29 €	14,53 €	14,77 €	15,01 €	15,25 €	15,49 €	...	35,00 €
2	17,62 €	17,86 €	18,10 €	18,34 €	18,58 €	18,82 €	...	38,33 €
3	20,94 €	21,18 €	21,42 €	21,66 €	21,90 €	22,15 €	...	41,66 €
4	24,27 €	24,51 €	24,75 €	24,99 €	25,23 €	25,47 €	...	44,98 €
5	27,59 €	27,83 €	28,07 €	28,32 €	28,56 €	28,80 €	...	48,31 €
6	30,92 €	31,16 €	31,40 €	31,64 €	31,88 €	32,12 €	...	51,63 €
...	...	...	...	...	...	...	...	...
130	443,32 €	443,56 €	443,80 €	444,04 €	444,28 €	444,52 €	...	464,03€

Las tablas recogen el número de contadores que hay que reemplazar en la batería en estudio (fila) y la distancia redondeada que tienen que recorrer los operarios desde la batería anterior hasta la nueva batería a cambiar (columna) y, según estos datos, se busca el coste de instalación total que le corresponde a dicha batería (celda resultado indicada en rojo para cada ejemplo). Cabe destacar que las tablas muestran los costes de instalación globales de cada batería, sin embargo, el cálculo de la vida útil se realiza de forma individual para cada contador, por ello, este coste se divide entre el número de contadores a cambiar y se le asigna a cada contador de la batería que se quiere reemplazar.

Se puede observar como el coste de montaje depende del diámetro de los contadores, ya que, cuanto mayor sea este, mayor es el coste de la mano de obra y el tiempo de sustitución. Por otro lado, a mayor distancia recorrida mayor es el coste de desplazamiento y, por lo tanto, el precio de instalación.

Una vez se aplica el Método 2, ya sólo quedaría aplicar el Método 3 (Apartado 3.4.5.1) para obtener el número de contadores finales a cambiar en la batería en estudio y el cálculo de la vida útil de cada uno de ellos.

Hay que tener en cuenta que, a medida que se estudia la sustitución de cada batería, los niveles 0, 1 y 2 van cambiando. Puede que en el cambio de la primera batería, que es la que más urge cambiar por su mal estado, luego no se encuentren más baterías cerca y haya que



salir del Nivel 1. Sin embargo, tras el cambio de la segunda batería, las distancias se recalculan y los niveles cambian, pudiendo existir un gran número de baterías a cambiar en el que antes se consideraba el Nivel 2.

Finalmente, para saber si el operario ha superado o no su jornada laboral, se calcula el sumatorio del tiempo que ha tardado en cambiar las anteriores baterías (resultado que muestra el modelo en la tabla resumen o matriz datos\_bateria) y el tiempo que se estima que se va a tardar en cambiar la siguiente batería. Si este tiempo no supera la jornada laboral de los operarios, se continúa con la sustitución de las baterías ese mismo día y, por lo tanto, con el procedimiento descrito en este apartado (a). Si, por el contrario, se estima que los operarios van a superar su jornada con la siguiente batería o ya la superaron, se pasa al “apartado b”.

Para realizar la evaluación de las horas que tardarían en cambiar la siguiente batería, se emplea el número de contadores ( $N_{estimado}$ ) que se estimó con el Método 1 (Apartado 3.4.2) que debían cambiarse, pues no se tiene constancia a priori de la magnitud del mismo al no saber aún el número final de contadores a sustituir.

$$h_{estimadas} = \left( \sum \text{horas. baterías. anteriores} \right) + (N_{estimado} * h_{montaje}) \quad (23)$$

**b. Si se superó la jornada laboral de los operarios:**

Este apartado se aplica cuando los operarios ya han superado su jornada laboral o la van a superar con el cambio de la próxima batería. Si se da el primer caso, se aplicará a los costes iniciales un valor extra por el suplemento de horas trabajadas.

Las horas extras ( $h_{extras}$ ) se calculan como la diferencia entre el sumatorio de horas que han tardado los operarios en cambiar las anteriores baterías más las horas que se estima en el apartado anterior ( $h_{estimadas}$ ) que van a tardar en cambiar la siguiente batería, menos la jornada laboral de los operarios. Y el precio extra ( $C_{extra}$ ) que suponen las horas extras, se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{extra} = h_{extras} * C_{Mano.Obra} * FactorExtra \quad (24)$$

Donde:

- FactorExtra: es el factor por el que se multiplica el coste de la mano de obra para tener en cuenta el suplemento de horas y el regreso de los operarios al punto origen. “Factor aplicable a las horas extras que puedan realizar los operarios algún día” explicado en el Apartado 3.2. (adim)

Teniendo en cuenta esto, los costes de instalación para cada nivel (Nivel 1 o 2) serían los siguientes:

- *Costes de instalación para aquellas baterías que están ubicadas dentro del Nivel 1:*

$$C_{instNIVEL1} = (C_{mín_{despl}} + (h_{montaje} * C_{Mano.Obra} * N^{\circ}_{contadores}) + C_{extra}) * N^{\circ}_{operarios} \quad (25)$$

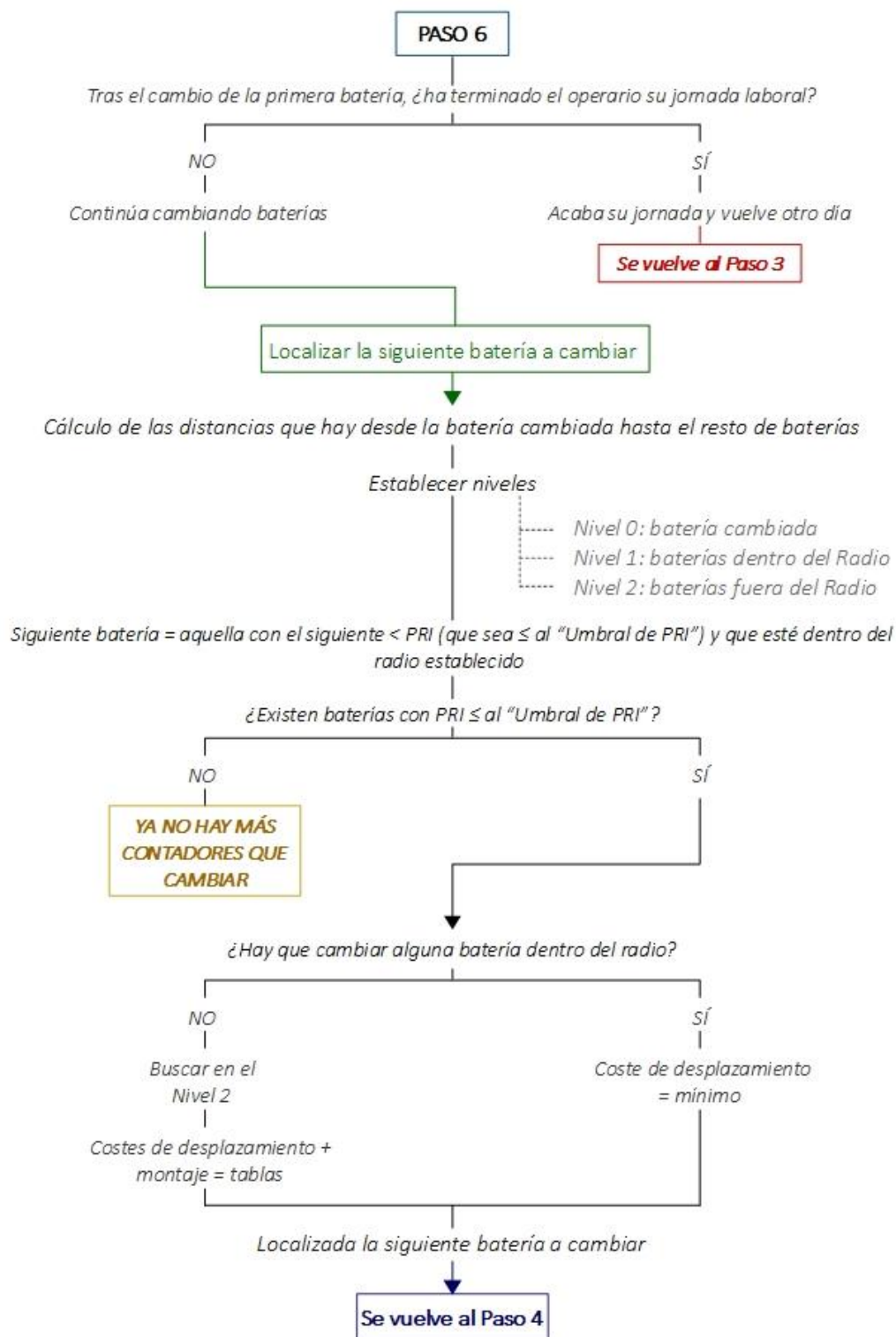
La (Ecuación 24) sólo tiene en cuenta dentro de los costes de desplazamiento el coste mínimo porque las baterías están dentro del radio que forma el Nivel 1.

- *Costes de instalación para aquellas baterías que están ubicadas dentro del Nivel 2:*

$$C_{instNIVEL2} = \left( \left( C_{mín_{despl}} + ((h_{despl} - h_{mín}) * C_{camión}) + (distancia * C_{despl}) \right) + C_{extra} \right) * N^{\circ}_{operarios} \quad (26)$$

Como ya se explicado, los costes de instalación calculados para cada batería, se desglosa y asigna a cada contador que se va a reemplazar.

Una vez se supera la jornada laboral, los operarios regresan al punto de partida y se continúa con la sustitución otro día siendo  $h_{estimadas}$  igual a 0 horas. En este caso, la siguiente batería a cambiar será aquella que tenga menor PRI sin distinción de distancias. Por lo que, se empezaría a aplicar de nuevo lo expuesto a partir del Apartado 3.4.3.



**Ilustración 9.** Esquema del sexto paso que sigue el modelo económico desarrollado

### 3.5 Indicadores para la comparación de métodos

Finalmente, el modelo permite realizar una comparación entre el Método 1, perteneciente al modelo económico existente en la actualidad, y el nuevo método planteado en este trabajo o Método 3. La finalidad de dicha comparación es evaluar la mejora de los ingresos que genera la empresa con la aplicación del nuevo método, la recuperación de la inversión realizada en un periodo de tiempo más corto y la mejora de la eficiencia del parque de contadores. Para ello, se utilizan los parámetros que se explican a continuación.

#### 3.5.1 Gastos e ingresos

- *Gastos (€):*

Los gastos que origina el cambio de los contadores a la empresa, se calcula como el sumatorio de los costes iniciales. Para el Método 1 se realiza el sumatorio de los costes fijos de los contadores que se cambian (Ecuación 27) y al Método 3 le corresponde el sumatorio de los costes variables de los contadores que se cambian con este método (Ecuación 28).

$$Gastos_{M1} = \sum C_{i_{fijos}} \quad (27)$$

$$Gastos_{M3} = \sum C_{i_{variables}} \quad (28)$$

- *Ingresos (€/año):*

El modelo calcula cuatro tipos de ingresos diferentes para una mejor comparación de los resultados entre modelos:

- Ingresos anuales que generan los contadores instalados actualmente, es decir, sin realizar la sustitución (€/año):**

$$Ingresos\ anual\ actual = V_r * C_{H2O_{exacto}} \quad (29)$$

Estos ingresos son igual al precio exacto del m<sup>3</sup> de agua que registran los contadores, los cuales se encuentran instalados en la actualidad y están sujetos a errores de medición mayores ( $\epsilon$ ).

En primer lugar, se calculan de forma individual para cada contador en la matriz datos\_contadores y, posteriormente, se realiza el sumatorio de los mismos agrupándolos por baterías en la correspondiente matriz o tabla, obteniendo así, los ingresos actuales de cada batería sin cambiar.

**b. Ingresos anuales que generan los contadores si se sustituyen (€/año):**

$$Ingresos\ anual\ nuevos = V_r * (1 + \epsilon_i) * C_{H_2O_{exacto}} \quad (30)$$

Los ingresos que genera un contador si se reemplaza por uno nuevo, se calcula como el precio exacto que tendría el agua registrada por el nuevo contador y el volumen que este registra. Al ser contadores nuevos, el volumen que registran es el volumen de agua realmente consumida por los usuarios (Ecuación 10) sujeto al error de medición inicial que presentan los aparatos.

Estos ingresos se calculan de forma individual para ayudar en el cálculo de los ingresos totales de cada batería según el método empleado (Apartado d). Además, ambos ingresos, a diferencia del cálculo de la vida útil, se calculan teniendo en cuenta el precio exacto que le corresponde a cada m<sup>3</sup> registrado ( $C_{H_2O_{exacto}}$ ), ya sea una tarifa por bloque o fija. Esto se debe a que no se está realizando ninguna estimación, sino que se está calculando el valor real de los ingresos que tendrían los contadores tanto si se sustituyen como si no.

**c. Incremento de los ingresos originado en las baterías por el cambio de aquellos contadores que, tras el cálculo, se considera necesaria su sustitución (€/año):**

$$\Delta ingresos_{M1/M3} = V_r * \Delta \epsilon * C_{H_2O} \quad (31)$$

El incremento de los ingresos ( $\Delta$ ingresos) se calcula como el producto del volumen que los usuarios están consumiendo realmente por la mejora del error que supone la sustitución del contador y el precio del último m<sup>3</sup> del agua registrada por el contador sin sustituir.

Este incremento se calcula, en primer lugar, de forma individual (matriz datos\_contadores) y, en segundo lugar, de forma grupal (matriz datos\_bateria), tanto para el número de contadores estimados a cambiar con el Método 1 como para el número final de contadores a cambiar con el Método 3. Y, con ellos, se puede conocer cuánto mejorarían los ingresos de más si se aplica un método u otro.

**d. Ingresos anuales totales que se obtendrían si se cambian los contadores de las baterías con el Método 1 y 3 (€/año):**

$$\begin{aligned}
 & \text{Ingresos anual total}_{M1/M3} \\
 &= \sum \text{Ingresos anual actual} + \sum \text{Ingresos anual nuevos} \quad (32)
 \end{aligned}$$

Estos ingresos se calculan como el sumatorio de los ingresos que proporcionan los contadores actuales que se quedan en las baterías sin cambiar (Ingresos anual actual) y los ingresos que generan los contadores que se cambian según el Método 1 y 3.

Finalmente, restándole a los ingresos anuales totales obtenidos con el Método 1 y 3 (Ecuación 32), los gastos que genera la sustitución de contadores según cada método, se obtienen las ganancias finales de cada procedimiento. De esta forma, se puede evaluar qué metodología genera a la empresa más ingresos.

### 3.5.2 Volúmenes y error global

- **Volúmenes:**

En la tabla correspondiente a los resultados de las baterías, también se muestran los siguientes datos de volúmenes:

**a. Volumen anual registrado de toda la batería actual, es decir, sin someterla a sustituciones ( $V_{\text{registrado.actual}}$ ) ( $m^3$ ):**

Es la suma de los volúmenes de agua que registran los contadores instalados en la actualidad en cada batería y cuya medición está sometida a errores actuales ( $\epsilon$ ). Este parámetro es el

“consumo medio anual registrado de los usuarios” introducido como dato de entrada y explicado en el “Apartado 3.2”.

El cálculo del volumen anual registrado de las baterías actuales sirve para comparar cuánto mejora la medición del volumen registrado realizando la sustitución de las baterías según el Método 1 y 3.

**b. Volumen de agua anual consumido en cada batería por los usuarios ( $V_{\text{consumido}}$ ) ( $m^3$ ):**

Es la suma del volumen que pasa realmente por cada contador de cada batería calculado con la Ecuación 30. Este volumen es el mismo para todos los métodos.

**c. Volumen anual registrado en cada batería según el Método 1 y 3 ( $V_{\text{registrado.M1/M3}}$ ) ( $m^3$ ):**

Es la suma del volumen registrado por los contadores que no se cambian en las baterías y del volumen real consumido por los contadores que se sustituyen según el Método 1 y 3. Como los contadores, incluso al inicio de su vida útil están sometidos a errores, el volumen que registran los contadores sustituidos es el consumo real sujeto al error inicial de medición de cada contador (Ecuación 33).

$$Volumen\ registrado\ por\ un\ contador\ nuevo = Consumo\ real * (1 + \epsilon_i) \quad (33)$$

• **Errores globales:**

El error global de un contador se calcula con la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{global.actual} = \frac{V_{registrado}}{V_{consumido}} - 1 \quad (34)$$

Como ya se indicó, el volumen consumido por los usuarios es el mismo para todos los métodos, por lo que, variando el numerador de la Ecuación 34, con el cálculo de los anteriores volúmenes registrados, es posible conocer los siguientes errores de medición de las baterías y estudiar cómo mejora el error con tras la aplicación de ambos métodos respecto al error actual y qué método supone una mayor mejora en el error de medición:

**a. Error global de la batería actual (%):**

$$\varepsilon_{global.actual} = \frac{V_{registrado.actual}}{V_{consumido}} - 1 \quad (35)$$

**b. Error global de las baterías cambiadas con el Método 1 y 3 (%):**

$$\varepsilon_{global.actual} = \frac{V_{registrado.M1/M3}}{V_{consumido}} - 1 \quad (36)$$

### 3.5.3 Periodo de Retorno de la Inversión Real ( $PRI_{real}$ )

En el “Apartado 3.4.3.1”, se explicó que el PRI permite a la empresa conocer el tiempo de amortización de la inversión realizada en la sustitución de los contadores. Sin embargo, este parámetro se calculó inicialmente como una aproximación teniendo en cuenta el número de contadores estimado que se debían cambiar según el Método 1 y los costes iniciales estimados que supone cambiar ese número de medidores (Ecuación 13). Una vez ha finalizado todo el proceso de reemplazo de las baterías, se conoce el número de contadores real a cambiar en cada una de ellas y el valor de los costes iniciales variables, por lo que, se repite el cálculo del PRI con los datos finales para saber el tiempo de amortización real que supone el cambio de cada batería (Ecuación 37).

$$PRI_{real} = \frac{\sum C_{i.variables}}{\sum \Delta_{ingresos}} \equiv \frac{\sum C_{i.variables}}{\sum (V_r * \Delta E) * C_{H2O}} \equiv \frac{C_{i.variables} * N_{final}}{((V_r * \Delta E) * N_{final}) * C_{H2O}} \quad (37)$$

Por otro lado, para comparar el tiempo en el que la empresa amortiza la inversión realizada según cada uno de los métodos, se emplea la Ecuación 38.

$$PRI_{M1/M2} = \frac{\sum Gastos}{\sum Ganancias} \quad (38)$$

$$\equiv \frac{\sum C_{i.M1/M2}}{\sum Ingresos anuales totales_{M1/M3} - \sum Ingresos anual total_{M1/M3}}$$



La ecuación calcula la media ponderada del PRI de todas las baterías para ambos métodos, permitiendo evaluar con qué método se amortizan antes el dinero invertido en la sustitución de los contadores. Dicha ecuación refleja la relación entre los gastos que genera la empresa por el reemplazo de los medidores y los ingresos que ganan anualmente.

## 4 EJEMPLO DE APLICACIÓN (CONTADORES DOMÉSTICOS)

### 4.1 Creación de un parque sintético de contadores de pequeño calibre

A medida que se ha ido diseñando y programando el nuevo modelo económico se han creado diferentes parques de contadores de pequeñas dimensiones para evaluar la funcionalidad y viabilidad del mismo. Además, se han seleccionado de forma aleatoria diferentes baterías de los parques de contadores creados y se han realizado a mano todos los cálculos que conllevan los diferentes métodos explicados, con el objetivo de verificar que todo funciona correctamente.

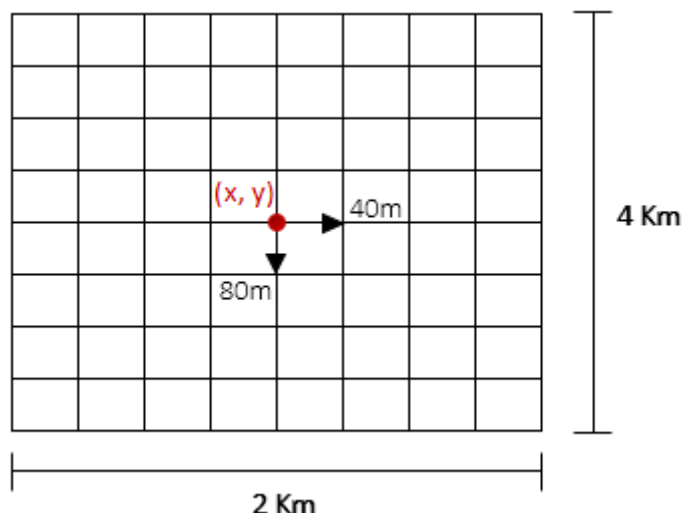
Una vez realizadas las comprobaciones necesarias, se creó un parque de contadores final para mostrar, en este proyecto, los resultados obtenidos. A continuación, se explican las características del parque creado, las cuales constituyen los datos de partida que se deben introducir en el modelo y que se explicaron en el “*Apartado 3.2*” de esta memoria.

#### 4.1.1 Características del parque de contadores

El parque de contadores creado está formado por un total de 50.000 medidores de pequeño calibre que, una vez agrupados, forman un total de 3.200 baterías.

- **Coordenadas UTM:**

Para agrupar los contadores en baterías se han determinado unas coordenadas UTM como origen (x, y), a partir de las cuales, sumándoles números enteros aleatorios se ha formado una cuadrícula de 2Km de ancho y 4km de alto con una batería ubicada cada  $\pm 40m$  en las coordenadas x y  $\pm 80m$  en las coordenadas y (Ilustración 10). Después de varias pruebas, se ha elegido esta separación entre baterías para conseguir que, dentro de cada una de ellas, el número de contadores sea lo más cercano posible a la realidad, consiguiendo que no superen una cantidad mayor de 30 ni menor a 4 contadores.



*Ilustración 10. Cuadrícula para agrupar los contadores en baterías*

Gracias a la elaboración de esta cuadrícula, el modelo puede asignar a cada contador el número de identificación de la batería a la que pertenece (Id= “a\_coordenadaX\_coordenadaY”) y agrupar los contadores que tengan el mismo número de identificación para saber cuántos hay en cada batería.

- **Diámetro nominal (mm):**

En cuanto al diámetro de los contadores, se ha decidido que todos tengan un diámetro nominal igual a 15mm, ya que, todos pertenecen a un abastecimiento meramente residencial o doméstico y este es el diámetro más común para este tipo de uso.

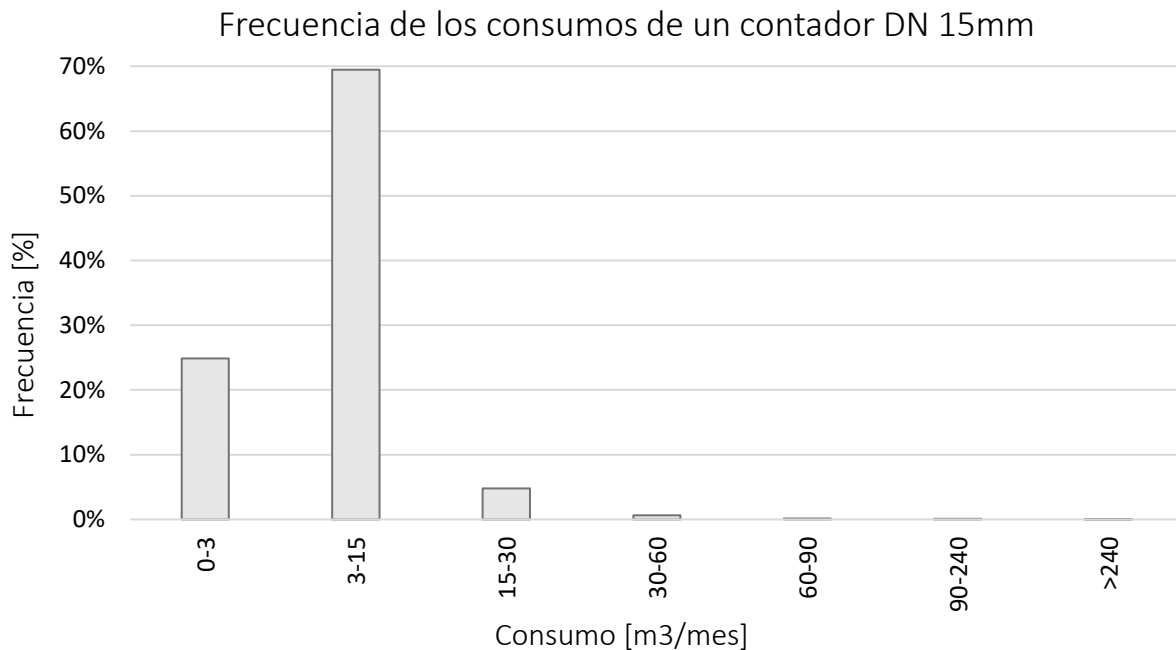
- **Costes iniciales fijos (€):**

El precio de adquisición de los contadores se ha estimado comparando diferentes catálogos de fabricantes y se ha elegido un coste igual a 19 €/ud para todos los contadores. En cuanto a los costes fijos de instalación y administración, se han considerado los precios de 12€ y 2€, respectivamente. Dado que todos tienen el mismo diámetro, se les ha asignado a todos ellos estos precios por igual.

- **Consumo medio anual registrado (m<sup>3</sup>):**

Para asignar a cada contador un consumo registrado, se ha elaborado una tabla con diferentes rangos de volúmenes a los que se les ha asignado una frecuencia de consumo según el diámetro del contador. Se puede ver en la Ilustración 11, como para un contador de diámetro

igual a 15mm es más frecuente registrar volúmenes entre 3 – 15 m<sup>3</sup>/mes y, como a partir de los 240 m<sup>3</sup>/mes ya no hay registro porque se emplean contadores de mayor calibre. La gráfica se ha creado tomando como base la información de un abastecimiento de agua típico.



*Ilustración 11. Gráfico sobre la frecuencia de los consumos típicos de un contador de DN 15mm*

Finalmente, para asignarle a cada contador un consumo registrado diferente, se ha elegido de forma aleatoria un consumo multiplicado por otro número aleatorio.

- **Fecha de instalación de los contadores (dd/mm/aaaa):**

Para poder calcular la edad de los contadores o el tiempo que llevan en funcionamiento, es necesario conocer la fecha de instalación de los mismos. Para ello, se le ha asignado a cada contador de forma aleatoria una fecha que esté dentro del rango de años 1.996 – 2.016, es decir, con 25 a 2 años de antigüedad.

- **Características metrológicas:**

Se ha considerado que todos los contadores tienen un error inicial del -5%, siendo este el error típico que presentan los contadores nuevos de pequeño calibre. Además, se les ha asignado un ritmo de deterioro igual al -0.5%/año, ya que, es el ritmo promedio al que se suelen deteriorar este tipo de contadores. Finalmente, como ya se explicó, se puede tener en cuenta en la fórmula del cálculo del error actual de los contadores (Ecuación 12), un ritmo de

deterioro lineal o no lineal si se emplea el exponente “c” explicado en el “Apartado 3.2”, en este parque de contadores se considera un valor del exponente igual a 1, es decir, con una tasa de degradación lineal.

- **Tipo de tarifa:**

Dado que un abastecimiento de agua gestionado por una misma entidad tiene el mismo tipo de tarifa para un mismo uso, en este trabajo se han simulado dos parques de contadores con las mismas características descritas en este apartado, pero con diferentes tarifas, para comparar cómo afecta en el modelo esta diferencia. A uno de los parques se le aplica una tarifa fija y al otro una tarifa por bloque, cuyos precios se describen en las siguientes tablas:

**Tabla 9.** Precios para un abastecimiento con tarifa fija según el uso al que se destine

<b>Tarifa fija:</b>			
€/m <sup>3</sup>			
Doméstico	Industrial	Riego	Comercial
0,75	1,95	1,55	0,85

**Tabla 10.** Precios para un abastecimiento con tarifa por bloques según el uso al que se destine

<b>Tarifa por bloques:</b>				
m3 límites	€/m <sup>3</sup>			
	Doméstico	Industrial	Riego	Comercial
< 5	0,50	1,75	1,00	0,65
5 - 10	1,25	1,90	1,50	1,25
> 10	1,50	2,00	1,75	1,50

Para representar el valor del dinero con el paso del tiempo se tiene en cuenta la tasa de actualización real ( $r'$ ). Para su cálculo se emplean unos valores típicos de tasa de actualización nominal ( $r$ ) igual al 5% y una inflación ( $s$ ) del 2%.

- **Mano de obra de los operarios ( $C_{Mano.Obra}$ ):**

Se ha supuesto que los operarios trabajan 8h diarias durante 5 días a la semana y que, durante todo el año tienen un total de 251 días laborables, quitando los fines de semana, 20 días de vacaciones y 12 días festivos. Estos datos se cogen como referencia del calendario laboral del año 2018. Además, para calcular la mano de obra, se tiene en cuenta que ganan un sueldo mensual de 1.000€ y la empresa, a parte del sueldo mensual, invierte en su contratación un factor extra igual a 1,33 para arreglar papeles de la seguridad social y un factor de 1,20

destinado a costes indirectos que supone la contratación. Con todo ello, el coste de mano de obra se calcula con la siguiente fórmula:

$$C_{Mano.Obra} = \frac{1000 * 1,33 * 1,20}{22 * 8} * \left( \frac{251 - (20 + 12)}{251} \right)^{-1} = 10,39\text{€} \quad (39)$$

Por lo tanto, la mano de obra es el coste por hora que le supone a la empresa contratar al operario, por un factor que tiene en cuenta los días laborales que la empresa paga al operario y los días que este trabaja realmente al considerarse las vacaciones y los días festivos.

Además, se tiene en cuenta que, si los operarios algún día exceden su jornada laboral, se le aplica al coste de mano de obra un factor de 1,50 por las horas extras trabajadas (FactorExtra). Por otro lado, se considera que un operario durante su jornada laboral puede cambiar un total de 35 contadores si tienen un diámetro igual o inferior a 30mm, como es el caso de este parque de contadores, y un total de 25 contadores mayores de 30mm.

- **Costes de desplazamiento:**

Como ya se indicó, en el desplazamiento se tiene en cuenta un coste mínimo (a), un coste por el tiempo que tarda en realizarse el recorrido (b) y un coste por la distancia recorrida (c).

- a. El coste mínimo de desplazamiento ( $C_{\text{mín.despl}}$ ) se supone igual a 10€ por media hora trabajada ( $h_{\text{mín}}$ ). Estas horas mínimas representan el tiempo que tarda un operario en montar y desmontar del camión los contadores de la forma correcta, es decir, colocándolos en cajas y desplazándolos con precaución para evitar que cualquier perturbación afecte a las características metrológicas de los mismos y, por lo tanto, a su funcionalidad. Se considera que un operario tarda aproximadamente 12 minutos en realizar cada tarea de montaje y desmontaje y, aproximadamente unos 6 minutos en realizar un desplazamiento dentro del Nivel 1.

Para estimar el radio del Nivel 1 se ha interpretado que el camión se desplaza, dentro de la ciudad, a una velocidad de 5Km/h (velocidad). La velocidad de circulación se ha minimizado a este valor con la finalidad de tener en cuenta los diferentes factores y situaciones que retrasan el desplazamiento de los operarios, como son: tramos curvos, cruces de peatones, semáforos, atascos, la localización del edificio y el tiempo de

búsqueda de un aparcamiento cercano y el tiempo que tardan los vecinos en darles acceso al interior del edificio para poder realizar las tareas de sustitución de los contadores. Multiplicando esta velocidad, en las unidades correspondientes, por el tiempo supuesto de desplazamiento igual a 6 minutos, se obtiene que un camión recorre, durante ese tiempo y a esa velocidad, aproximadamente 500m siendo, por lo tanto, esta distancia el radio del Nivel 1.

- b. El coste por el tiempo que tarda en realizarse el recorrido ( $C_{\text{camión}}$ ) una vez se superan las horas mínimas establecidas es igual al coste de la mano de obra.
- c. En cuanto al coste por distancia recorrida ( $C_{\text{despl}}$ ), se tiene en cuenta un precio de kilometraje igual a 0,33€/Km. Este valor es el empleado en España desde el año 2.016 según el Informe Captio del Kilometraje (Captio, s.f.).

- **Umbral y condiciones del modelo:**

En el “Apartado 3.2” se definieron los datos que deben introducirse en el modelo. A continuación, se muestran los valores de los umbrales y condiciones que se añaden:

- a. Umbral máximo del Periodo de Retorno de la Inversión (PRI) (años): en este ejemplo, el modelo realiza el cambio de aquellas baterías cuyo umbral de PRI no supera los 5 años.
- b. Umbral a partir del cual se cambian los contadores (años): se considera que se deben cambiar todos aquellos contadores cuya diferencia entre la vida útil y la edad de los mismos sea igual o inferior a 1 año. De esta manera, se cambiarán todos aquellos aparatos que ya han superado su vida útil o que les queda menos de un año de vida en servicio, evitando que la empresa tenga que volver al cabo de pocos meses para retirar uno o una pequeña cantidad de contadores.
- c. Vida útil límite (años): dado que el parque de contadores cuenta con medidores instalados hace tan solo 2 años y, por lo tanto, aún no presentan mucho deterioro, los cálculos pueden dar como resultado, para estos contadores, una vida útil de 30 años. Considerándose este valor como elevado, se limita la vida útil de estos medidores a 25 años para no dejar contadores instalados durante tanto tiempo.
- d. Condiciones que debe cumplir una batería para cambiar más contadores de los que se tenía previsto: se considera que en aquellas baterías donde se deja sin cambiar un

porcentaje de contadores menor o igual al 20% respecto al total y que este porcentaje suponga un número de contadores inferior o igual a 3, cuyas vidas útiles no superen o sean igual a 3 años, se debe reemplazar la batería completa, ya que, es más rentable para la empresa.

A continuación, se muestra unas tablas a modo resumen con los datos de partida del parque creado que se explican en este apartado y que afecta a todos los contadores por igual:

**Tabla 11.** Características de los contadores que forman el parque diseñado

Nº de serie del contador	-
Coordenada UTM x	-
Coordenada UTM y	-
Diámetro Nominal (mm)	15
Consumo medio anual registrado (m <sup>3</sup> )	-
Tipo de uso	Doméstico
Tipo de tarifa	Fija/Bloque
Fecha de instalación (dd/mm/aaaa)	-
Ritmo de deterioro (%/año)	-0,5%
Error inicial ( $\epsilon_i$ ) (%)	-5%
Exponente "c" (adim)	1
Coste de adquisición (€)	19,00 €
Coste de instalación (€)	12,00 €
Coste de administración (€)	2,00 €

**Tabla 12.** Datos de entrada que afecta a los operarios

Nº horas laborales de un operario (h/día)	8
Nº contadores DN < 30 mm que puede cambiar un operario (ud)	35
Nº contadores DN > 30 mm que puede cambiar un operario (ud)	25

**Tabla 13.** Datos de entrada necesarios para calcular los costes iniciales variables

Tasa de actualización nominal ( $r$ ) (%)	5%
Inflación ( $s$ ) (%)	2%
Horas mínimas dedicadas ( $h_{\min}$ ) (h)	0,50
Costes mín. de desplazamiento ( $C_{\min.\text{despl}}$ ) (€/h)	10,00 €
Coste del kilometraje ( $C_{\text{despl}}$ ) (€/Km)	0,33 €
(*) Costes horas dedicadas ( $C_{\text{camión}}$ ) (€/h)	10,39 €
(*) Costes mano de obra ( $C_{\text{Mano.Obra}}$ ) (€/h)	10,39 €



Factor aplicable a las horas extras (adim)	1,50
Radio de la zona (m)	500

**Tabla 14.** Datos necesarios para el cálculo de la mano de obra (\*)

Sueldo operario (€)	1.000
Factor Seguridad Social	1,33
Factor Costes Indirectos	1,2
Días laborables 2018	251
Días festivos 2018	12
Días de vacaciones	20

**Tabla 15.** Umbrales aplicados en el modelo económico

Umbral máximo del PRI (años)	5
Umbral a partir del cual se cambian los contadores (años)	1
Vida útil límite (años)	25

**Tabla 16.** Condiciones aplicadas en el modelo económico

Condiciones para cambiar más contadores de los previstos	
Porcentaje de contadores sin cambiar (%)	20%
Nº de contadores sin cambiar (ud)	3
Vida en servicio que les queda (años)	3

## 4.2 Análisis de los resultados

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en la aplicación del parque de contadores creado al nuevo modelo económico desarrollado. En el “Apartado 4.2.1” se detallan los resultados obtenidos al introducir en el modelo el parque de contadores con tarifa fija y se comparan los resultados obtenidos con el Método 1 y 3. En el “Apartado 4.2.2” se comparan y evalúan los resultados obtenidos al introducir al modelo el mismo parque de contadores, pero con tarifas diferentes: uno con tarifa fija y otro con tarifa por bloques.

#### 4.2.1 Comparación del modelo desarrollado con el modelo actual

En este apartado se evalúan los resultados obtenidos al introducir en el modelo el parque de contadores creado para el tipo de tarifa fija y, se comparan los resultados obtenidos con el Método 1 o actual y el Método 3 o nuevo. Se han obviado los resultados del Método 2, ya que, se considera que no es un método real ni representa la mejor solución para la empresa.

Como ya se ha explicado, la principal diferencia entre el Método 1 y 3 es que, el Método 1 calcula la frecuencia de renovación óptima o vida útil de cada contador empleando unos costes fijos (adquisición, instalación y administración) asignados a priori e independientes al resto de contadores que se encuentran en las baterías. En cambio, el Método 3 planifica y prioriza el cambio de los contadores evaluando el estado de los mismos dentro de sus correspondientes baterías y desglosa los costes de instalación en el coste que supone el desplazamiento hacia las baterías y el montaje de los contadores. De esta manera, estudiando los contadores en baterías, planificando la sustitución de las mismas y teniendo en cuenta los costes de desplazamiento y montaje por separado, los costes iniciales varían para cada grupo de medidores. La finalidad de gestionar la sustitución de los contadores es reducir lo máximo posible el coste de desplazamiento y, por lo tanto, los costes que tiene que invertir la empresa en la sustitución.

A continuación, se muestran todos los resultados obtenidos de interés para evaluar la funcionalidad del nuevo modelo económico desarrollado.

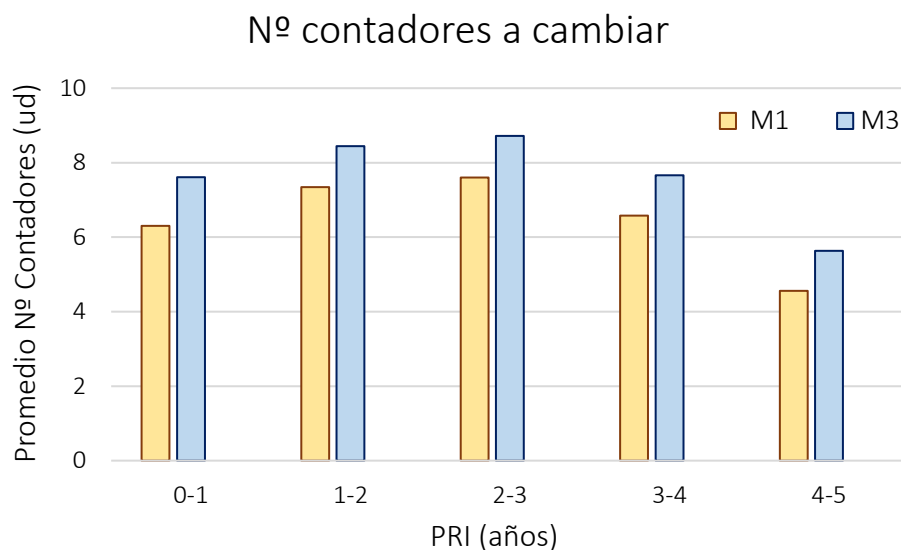
- **Número de contadores a cambiar:**

Para saber el número de contadores que hay que sustituir en cada batería, primero hay que calcular la vida útil de cada contador y localizar aquellos que ya hayan superado su vida útil o les queda un año de vida en servicio, es decir, aquellos contadores cuya diferencia entre vida útil y edad sea menor o igual al “umbral a partir del cual hay que cambiar los contadores” (Apartado 3.2). Dado que los costes iniciales empleados para el cálculo de la vida útil varían para cada método, el número de contadores a cambiar tampoco será igual.

El Método 3 emplea como base los resultados del Método 2. El segundo método también emplea unos costes iniciales variables y realiza el cambio de todos los contadores del parque. De esta forma, los costes de desplazamiento para cada contador serán los mínimos posibles, ya que, sale más rentable desplazarse para cambiar un mayor número de contadores que un

número más reducido. Esto tiene como consecuencia una reducción de la vida útil, ya que, la inversión que realiza la empresa se recupera más rápido al ser menor. Por lo tanto, calculando la diferencia entre vida útil y edad de cada contador, el Método 2 nos aporta la cantidad de contadores máxima que habría que sustituir en cada una de las baterías, siendo esta la empleada por el Método 3. Es por ello que el Método 3 sustituye una cantidad de contadores superior a la estimada en el Método 1, en el cual, los costes iniciales son superiores y suponen un mayor tiempo de amortización de la inversión. Con el Método 3 aquellos contadores que en el Método 1 les queda una vida de servicio relativamente corta, pueden ahora pasar a necesitar una renovación al disminuir la vida útil de los mismos.

Para observar este efecto de forma gráfica, dada la gran cantidad de datos obtenidos, se agrupan las baterías según su PRI y se calcula para cada grupo el promedio del número de contadores que se deben reemplazar en cada uno de ellos según ambos métodos. Se puede observar cómo se cambia un mayor número de contadores con el Método 3 que con el Método 1.



*Ilustración 12. Número de contadores promedio a cambiar según el Método 1 y 3*

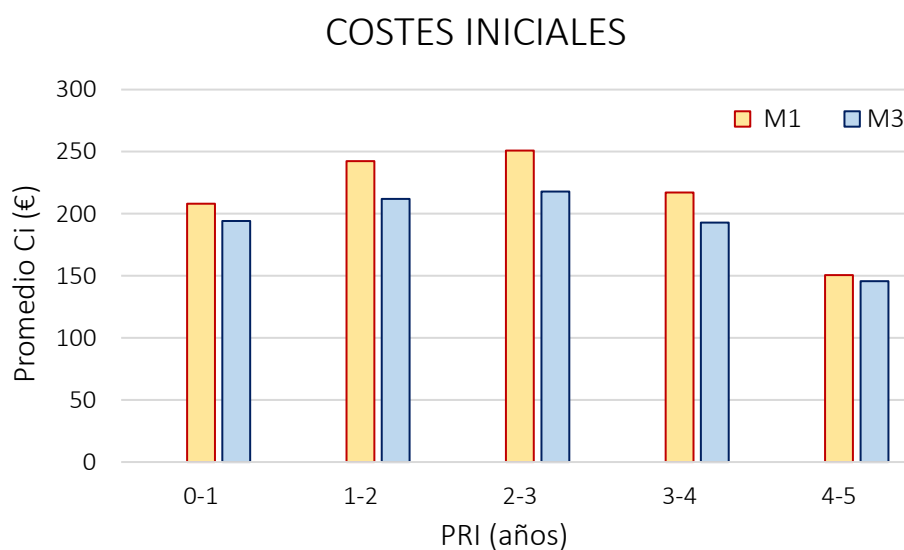
En la siguiente tabla, se muestra el número total de contadores a cambiar en cada método de los 50.000 contadores que constituyen el parque. Dado que en el Método 3 el número de contadores a cambiar es mayor, el tiempo de duración de la renovación del parque de contadores es superior al estimado con el Método 1, suponiendo 5 meses más de trabajo.

**Tabla 17.** Número total de contadores a cambiar y duración del proceso según el Método 1 y 3

	MÉTODO 1	MÉTODO 3	DIFERENCIA M3 CON EL M1
Nº total de contadores a cambiar (ud)	23.215	26.744	3.529
Nº de contadores con DN ≤ 30mm que puede cambiar 1 operario durante su jornada laboral de 8 horas (ud)	35	35	-
Horas que tarda 1 operario en realizar el cambio (h)	5.306	6.113	807
Días que tarda 1 operario en realizar el cambio suponiendo una jornada laboral de 8 horas (días)	663	764	101
Meses que tarda 1 operario en realizar el cambio suponiendo 20 días al mes laborales (meses)	33	38	5

- **Costes iniciales (€):**

Uno de los objetivos principales de planificar la renovación del parque y tener en cuenta los costes de desplazamiento y montaje por separado en el Método 3, es reducir los costes iniciales que invierte la empresa. Por lo que, se puede observar en la Ilustración 13 como los costes iniciales son en todo momento inferiores a los costes iniciales que emplea el Método 1, a pesar de que con el Método 3 se cambia un mayor número de contadores. Como ya se explicó, esto se consigue gracias a una mayor aproximación a la realidad, en la que se puede estudiar la sustitución de las baterías de la forma más económica reduciendo los desplazamientos que realizan los operarios.



**Ilustración 13.** Costes iniciales promedios según el Método 1 y 3

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos sobre los costes iniciales totales que emplea cada método para el cálculo de la vida útil de los contadores.

**Tabla 18.** Costes iniciales totales según el Método 1 y 3

	MÉTODO 1	MÉTODO 3	DIFERENCIA M3 CON EL M1
Costes iniciales totales (€)	76.095,00 €	670.314,18 €	95.780,82 €

Además, en la Tabla 19 se muestra el resultado del cálculo de la Vida útil (VU) según cada método para una muestra de 10 contadores. Se puede apreciar como para un mismo contador los costes iniciales disminuyen con la aplicación del Método 3 y como la VU también es menor respecto a los resultados obtenidos con el Método 1.

**Tabla 19.** Ejemplo sobre VU obtenido con método para un número de contadores

Id contador	Consumo anual registrado (m3)	Ritmo de deterioro (%/año)	$\epsilon_i$ (%)	Edad (años)	$\epsilon$ (%)	Costes Iniciales M1 (€)	VU M1 (Años)	Costes Iniciales M2 (€)	VU M2 (Años)
C1	4.240	-0,5%	-5,0%	17,75	-13,88%	33,00 €	1,89	26,90 €	1,71
C2	2.683	-0,5%	-5,0%	22,58	-16,29%	33,00 €	2,34	24,55 €	2,02
C3	2.499	-0,5%	-5,0%	23,92	-16,96%	33,00 €	2,42	24,62 €	2,09
C4	2.230	-0,5%	-5,0%	24,08	-17,04%	33,00 €	2,56	24,92 €	2,22
C5	2.646	-0,5%	-5,0%	20,33	-15,17%	33,00 €	2,38	27,72 €	2,18
C6	2.475	-0,5%	-5,0%	19,17	-14,58%	33,00 €	2,46	26,45 €	2,21
C7	2.660	-0,5%	-5,0%	17,00	-13,50%	33,00 €	2,39	24,49 €	2,06
C8	2.083	-0,5%	-5,0%	19,00	-14,50%	33,00 €	2,69	25,08 €	2,34
C9	1.939	-0,5%	-5,0%	19,75	-14,88%	33,00 €	2,78	24,80 €	2,41
C10	1.439	-0,5%	-5,0%	24,75	-17,38%	33,00 €	3,18	26,11 €	2,83

- **Ingresos y gastos de la empresa:**

- a. **Incremento de los ingresos ( $\Delta$ ingresos) (€):**

En cuanto al incremento de los ingresos por batería ( $\Delta$ ingresos) calculados con la Ecuación 31 en el “Apartado 3.5.1”, estos dependen directamente del consumo real de los usuarios sujeto a la mejora del error que supone la sustitución de los contadores deteriorados según cada método y del precio del último m<sup>3</sup> de agua registrado que, en este caso, sólo existe un precio para todos al tratarse de una tarifa fija. En otras palabras, el  $\Delta$ ingresos representa las

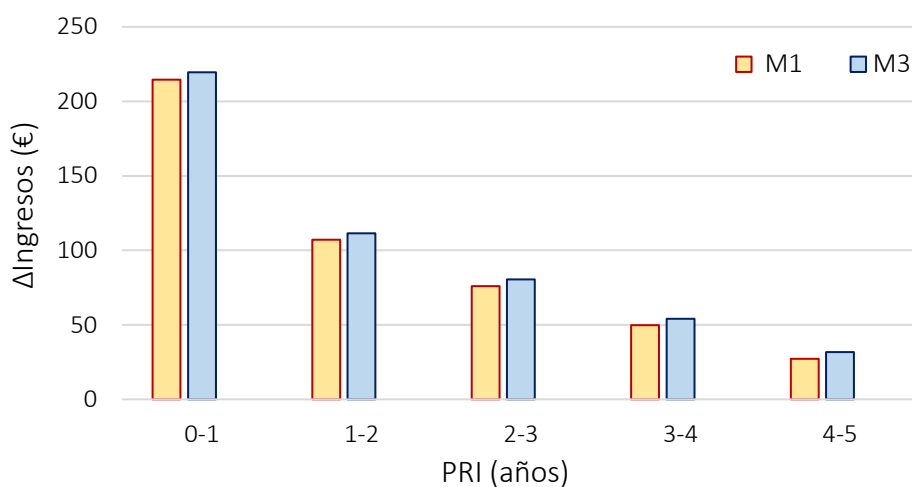
ganancias que supone la sustitución de los contadores, por lo que, a mayor número de contadores sustituidos, mayor es el incremento. Esto se debe a que todos los contadores que se encuentran deteriorados, al estar sujetos a un error de medición importante, miden cada vez menos volumen de agua del que realmente consumen los usuarios, haciendo que la empresa pierda dinero. Al reemplazar estos contadores por unos nuevos, el volumen registrado por los mismos es más exacto al generarse una mejora en el error de la medición de la batería donde se instalan.

Todo esto da lugar a que con el Método 3 el incremento de los ingresos sea mayor que si se emplea el Método 1, ya que, el nuevo método realiza la sustitución de un mayor número de contadores por batería.

En la Ilustración 14 se puede comprobar como para rango de baterías agrupadas, el incremento es mayor si se aplica el Método 3. Además, se puede observar como a medida que aumenta el Periodo de Retorno de la Inversión (eje de abscisas), el incremento de los ingresos es menor para ambos métodos. Este último efecto se debe a que el PRI, como se explicó en el *"Apartado 3.4.3.1"*, representa el tiempo en el que una empresa amortiza una inversión realizada, de manera que, cuando menor sea su valor más rápido recupera la entidad su inversión. En cambio, a mayor valor del PRI mayor es el tiempo de amortización llegando a ser en ocasiones tan extenso que no vale la pena llevar a cabo la inversión. Si el PRI es elevado quiere decir que el estado de los contadores que constituyen las baterías aun es aceptable y si se realizara alguna sustitución los gastos frente a las ganancias tendrían más peso, ya que, los contadores estarían sujetos a una mejora de error muy baja o despreciable. Es por ello, que a medida que se llega al año límite de sustitución de los contadores (*"Umbral máximo del PRI"* = 5 años, Tabla 15) el incremento de los ingresos es cada vez menor para ambos métodos.

Además, en la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos del incremento de los ingresos que generan las baterías aplicándoles ambos métodos de sustitución y, el aumento de los ingresos que supone el Método 3 respecto al Método 1.

### Incremento de los ingresos

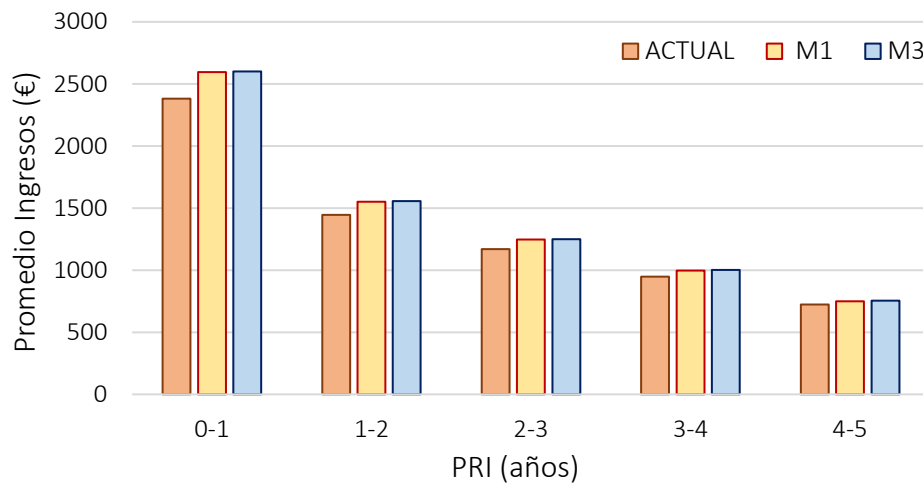


*Ilustración 14. Incremento de los ingresos promedios según el Método 1 y 3*

#### **b. Ingresos totales (€):**

Con los ingresos totales actuales de las baterías, sin someterse a ninguna sustitución, calculados con la Ecuación 29 y los ingresos totales de las baterías, realizando las sustituciones según ambos métodos, calculados con la Ecuación 32, ocurre lo mismo que con la mejora de los ingresos. Estos ingresos representan el precio de cada m<sup>3</sup> registrado por los contadores. Aquellos contadores que estén deteriorados o que lleven tiempo instalados registran el consumo de los usuarios sujeto al error que presentan los contadores, que es mayor al error inicial. En cambio, los contadores que se sustituyen pasan a registrar el consumo de los usuarios sujeto al error inicial que presentan estos aparatos. Los ingresos totales son el sumatorio de los ingresos que aportan los contadores cambiados y los ingresos que aportan los contadores sin cambiar de cada batería. Por lo que, para el Método 3 los ingresos totales son mayores que para el Método 1, ya que, con él se cambia un mayor número de contadores. En la Ilustración 15 se puede observar lo explicado anteriormente. Además, se puede ver como ambos métodos mejoran los ingresos respecto al estado actual del parque de contadores. Por otro lado, en la Tabla 20 aparecen los ingresos totales actuales y los pertenecientes a cada método, además, se puede ver lo que se ingresa de más aplicando el Método 3 respecto al Método 1.

### Ingresos totales



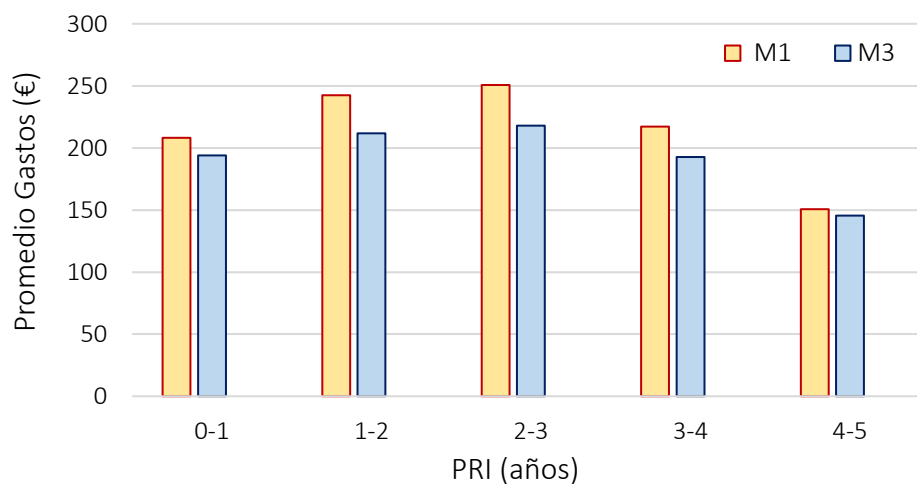
**Ilustración 15.** Ingresos totales promedio actuales y según el Método 1 y 3

#### c. Gastos totales (€):

Los gastos originados por el cambio de los contadores según cada método empleado, son iguales a los costes iniciales invertidos por la empresa para realizar las sustituciones que se explicó anteriormente. De todas formas, en la Ilustración 16 se representan los gastos para ambos métodos y se refleja el aumento de los gastos con la aplicación del Método 1.

Además, en la Tabla 20 aparece el valor total de los gastos para cada método y la diferencia que suponen los gastos del Método 1 respecto al Método 3.

### Gastos

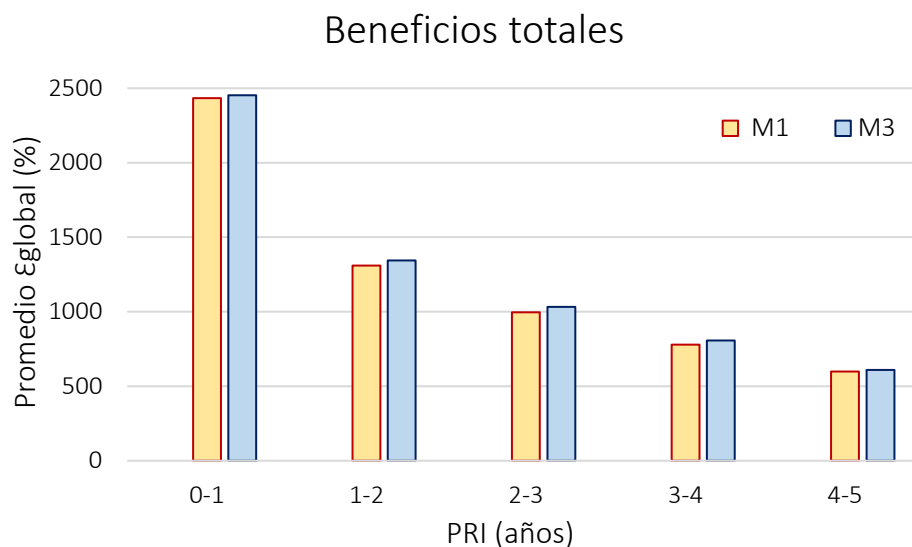


**Ilustración 16.** Gastos totales promedio según el Método 1 y 3



**d. Beneficios totales (€):**

Los beneficios totales de la empresa se calculan restándole los ingresos totales obtenidos con cada método los gastos que estos suponen. Se puede observar en la Ilustración 17 como el Método 3 aporta más beneficios a la empresa gestora al contribuir mayores ingresos y generar menores gastos. Además, en la Tabla 20 se presentan los beneficios totales que se obtienen al aplicar ambos métodos y la diferencia entre ellos.



**Ilustración 17.** Beneficios totales promedio según el Método 1 y 3

**Tabla 20.** Resultados totales sobre los ingresos y gastos según el Método 1 y 3

	ACTUALIDAD	MÉTODO 1	MÉTODO 3	DIFERENCIA M3 CON EL M1
Incremento de los ingresos (€)	-	240.600,58 €	254.794,00 €	14.193,42 €
Ingresos totales (€)	3.723.934,55 €	3.964.535,12 €	3.978.728,55 €	14.193,42 €
Gastos (€)	-	766.095,00 €	670.314,18 €	95.780,82 €
Beneficios (€)	-	3.198.440,12 €	3.308.414,37 €	109.974,24 €

En la Tabla 20 se puede ver como aplicando el Método 3 la empresa ganaría 109.974,24€ de más respecto al método actual o Método 1. A modo de estimación, si se divide esa cantidad entre el número total de contadores que tiene el parque, es decir, 50.000, se estimaría que, con la aplicación del nuevo método, la empresa estaría ganando aproximadamente 2,20€ más

por contador. Extrapolando esa cantidad a un abastecimiento real que conste de más contadores instalados, la empresa podría ganar al año más de un millón de euros de más por cambiar de forma planificada los medidores en peor estado.

- **Periodo de Retorno de la Inversión final:**

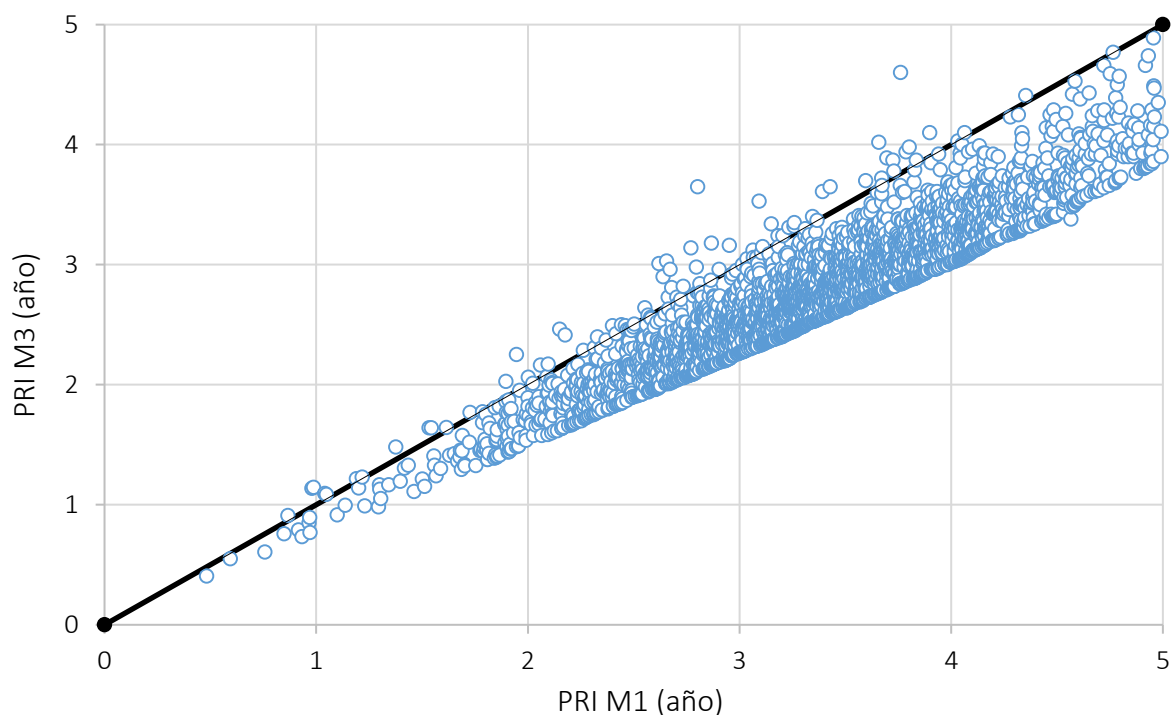
Aplicando la Ecuación 38 se calcula el PRI real y ponderado para cada método. En la Tabla 21 se aprecia como el Método 3 recupera la inversión realizada por la empresa en un menor periodo de tiempo que el Método 1. Esto se debe a que los gastos generados por este método son menores y sus ganancias, como ya se ha comprobado, mayores.

**Tabla 21.** Periodo de retorno de la inversión final según el Método 1 y 3

	MÉTODO 1	MÉTODO 3	DIFERENCIA ENTRE M1 Y M3
PRI (año)	3,18	2,63	-0,55

En la siguiente ilustración se ha graficado en el eje de las abscisas el PRI que presentan todas las baterías con el Método 1 y en el eje de las ordenadas el PRI de todas las baterías aplicando el Método 3 y, se ha trazado una línea diagonal que permite estudiar visualmente la cantidad de baterías en las que disminuye el valor del PRI al aplicar el método nuevo. Por ejemplo, el PRI de las baterías con un PRI M1 igual o próximo a 3 años disminuye por debajo de este periodo en casi todas las baterías al aplicar el M3. Además, en el gráfico se puede apreciar como para un periodo entre 0-1 año el PRI es prácticamente igual para ambos métodos, ya que, es ahí donde se agrupan las baterías que se encuentran en peor estado, teniendo que sustituir casi la misma cantidad de contadores en ambos métodos. En otras palabras, como los contadores de esas baterías están tan deteriorados, una sustitución de los mismos supondría una mejora del error y de los ingresos elevada haciendo que el valor del PRI sea ínfimo para cualquier método. En cambio, a medida que el PRI calculado con el Método 1 aumenta, la disminución del PRI aplicando el Método 3 es mayor, ya que, las baterías no están completamente en mal estado, haciendo que varíe, por un lado, el número de contadores a cambiar según el método empleado y, por otro lado, la mejora de los ingresos y gastos.

### Periodo Retorno de la Inversión

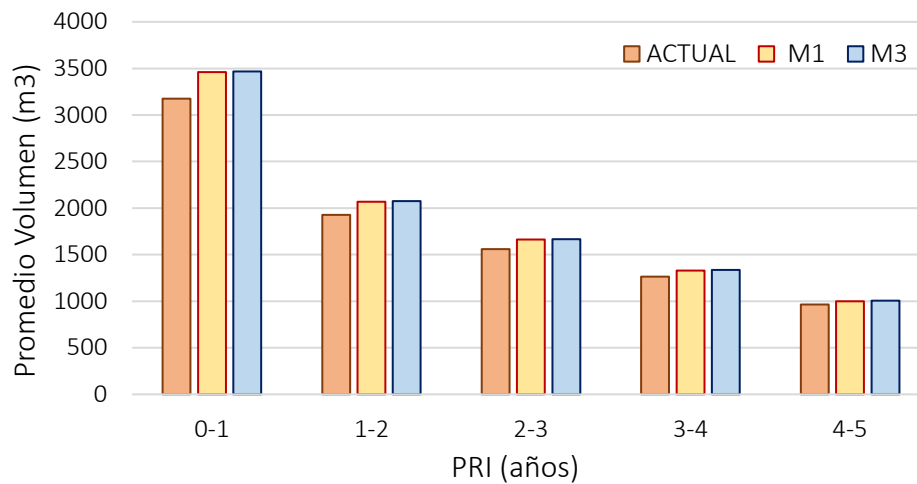


*Ilustración 18. Comparación del periodo de retorno de la inversión del Método 1 y 3*

- **Volúmenes:**

El reemplazo de un contador deteriorado por uno nuevo supone una mejora en el registro del agua consumida por los usuarios. Por lo que, si se sustituye una cantidad mayor de contadores, el parque de contadores en total tendrá una mejora en la medición haciendo que aumenten los ingresos como ya se mostró anteriormente. Es por esto que, tanto el Método 1 como el 3 registran un mayor volumen de agua registrada respecto al estado actual del parque de contadores y, como el Método 3 es el que realiza el registro más exacto del consumo.

### Volumen registrado



**Ilustración 19.** Volumen registrado promedio actual y según el Método 1 y 3

Además, en la Tabla 22 se exponen los resultados totales de los volúmenes registrados y el volumen que registra de más el parque de contadores aplicando el Método 3 respecto al Método 1.

Teniendo en cuenta que el consumo anual total de los usuarios de este abastecimiento creado es igual a 5.639.031,98 m<sup>3</sup>, se confirma que el Método 3 es el que más se acerca a este valor registrando aproximadamente el 94% del consumo real.

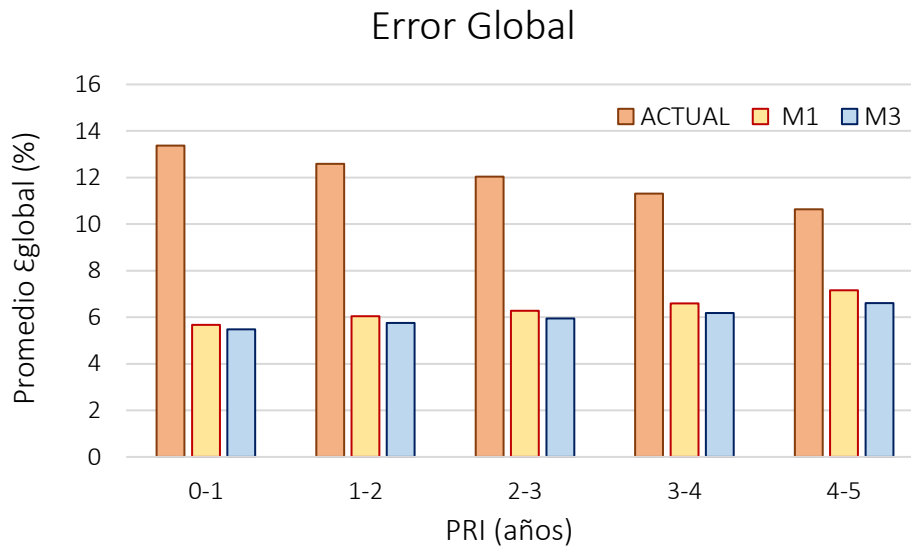
**Tabla 22.** Volumen total registrado por el parque de contadores en la actualidad y según el Método 1 y 3

	ACTUALIDAD	MÉTODO 1	MÉTODO 3	DIFERENCIA M3 CON EL M1
Volumen total registrado (m <sup>3</sup> )	4.965.246,06	5.286.046,83	5.304.929,31	18.882,48

- Errores globales:**

Conociendo el consumo real de los usuarios y el volumen de agua que registra el parque de contadores en la actualidad y con los Métodos 1 y 3, se puede calcular el error global de las baterías con las Ecuaciones 35 y 36. Dado que el peor caso es no reemplazar ningún contador del parque actual, los dos métodos presentan una mejora del error global respecto a la situación actual. Sin embargo, es el Método 3 el que menor error presenta al ser su medición la que más se acerca al consumo real.

En la Ilustración 20 y la Tabla 23 puede verse la mejora del error con la aplicación de ambos métodos y como el Método 3 es el que menor error presenta.



**Ilustración 20.** Error global promedio actual y según el Método 1 y 3

**Tabla 23.** Error global promedio del parque de contadores en la actualidad y según el Método 1 y 3

	ACTUALIDAD	MÉTODO 1	MÉTODO 3	DIFERENCIA M3 CON EL M1
ε global promedio (%)	11,95%	6,33%	5,99%	-0,35%

Finalmente, cabe destacar que el Método 3 es el que más tiempo de trabajo supone (5 meses más de trabajo respecto al Método 1) porque supone un mayor cambio de contadores. Sin embargo, tanto en términos económicos como de eficiencia, es el método que más beneficios le genera a la empresa, aumentando sus ingresos, disminuyendo sus gastos, amortizando más rápido la inversión y mejorando la medición del parque de contadores para conseguir un mayor control de los volúmenes de agua ingresados a la red de abastecimiento.

#### 4.2.2 Comparación de los resultados según el tipo de tarifa empleada

En el modelo creado se ha simulado el mismo parque de contadores explicado anteriormente cambiando la tarifa fija por una tarifa por bloques con los precios correspondientes que se exponen en la Tabla 10 del “Apartado 4.1”. La intención de esta simulación es comparar los resultados obtenidos según el tipo de tarifa empleada. Dado que el efecto que tiene el Método

1 respecto al 3 es el mismo para ambas tarifas, se analizarán los resultados obtenidos sólo con el Método 3.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para cada tipo de tarifa:

- **Número de contadores a cambiar:**

El número de contadores a cambiar aplicando el tipo de tarifa por bloques es 2.199 veces mayor que aplicando la tarifa fija. Este aumento en el número de medidores a reemplazar se debe a que la tarifa por bloque aplica, en la mayoría de casos, precios más elevados que la tarifa normal. Un mayor coste del m<sup>3</sup> de agua aumenta el peso que tiene el volumen de agua no registrada por los contadores, ya que, para el mismo volumen de agua no registrada la empresa pierde más dinero en aquel abastecimiento donde el coste del m<sup>3</sup> tiene un mayor valor. Esto hace que en el parque de contadores con tarifa por bloque los aparatos puedan permanecer menos tiempo instalado que en el parque con tarifa fija.

Cabe destacar que, si el precio del m<sup>3</sup> en la tarifa fija hubiera sido mayor que los empleados en la tarifa por bloque se hubiera dado el caso contrario, teniendo que cambiar un mayor número de contadores en el parque con tarifa fija.

**Tabla 24.** Número total de contadores a cambiar y duración del proceso según el tipo de tarifa

	TARIFA FIJA	TARIFA BLOQUES	DIFERENCIA BLOQUES ENTRE FIJA
Nº total de contadores a cambiar (ud)	26.744	28.943	2.199
Nº de contadores con DN ≤ 30mm que puede cambiar 1 operario durante su jornada laboral de 8 horas (ud)	35	35	-
Horas que tarda 1 operario en realizar el cambio (h)	6.113	6.616	503
Días que tarda 1 operario en realizar el cambio suponiendo una jornada laboral de 8 horas (días)	764	827	63
Meses que tarda 1 operario en realizar el cambio suponiendo 20 meses laborales (meses)	38	41	3

- **Costes iniciales (€):**

Los datos de precio que se emplean para el cálculo de los costes iniciales son los mismos para ambos métodos. Dado que los costes iniciales dependen directamente del número de

contadores a cambiar, estos son más elevados en la sustitución del parque de contadores con tarifa por bloque, suponiendo 52133.46€ más.

**Tabla 25. Costes iniciales totales según el tipo de tarifa**

	TARIFA FIJA	TARIFA BLOQUES	DIFERENCIA BLOQUES ENTRE FIJA
Costes iniciales (€)	670.314,18 €	722.447,64 €	52.133,46 €

- **Ingresos y gastos de la empresa:**

La tarifa por bloques, al sustituir un mayor número de contadores, da lugar a un incremento de los ingresos superior respecto al Método 1 y en comparación con el incremento que genera el caso de la tarifa fija. Lo mismo ocurre con los ingresos totales, los cuales aumentan incluso un millón de euros por encima respecto a la tarifa fija, ya que, el cambio de más contadores da lugar a una medición más exacta que genera más ingresos y hace perder menos beneficios.

En la Tabla 26, se puede ver como los beneficios son mayores al aplicar la tarifa por bloques, a pesar de que los gastos con dicha tarifa sean superiores a los que genera la tarifa fija.

**Tabla 26. Resultados totales sobre los ingresos y gastos según el tipo de tarifa**

	TARIFA FIJA	TARIFA BLOQUES	DIFERENCIA BLOQUES ENTRE FIJA
Incremento de los ingresos respecto al M1 (€)	254.794,00 €	503.788,03 €	248.994,03 €
Ingresos totales (€)	3.978.728,55 €	5.248.881,49 €	1.270.152,95 €
Gastos (€)	670.314,18 €	722.447,64 €	52.133,46 €
Beneficios (€)	3.308.414,37 €	4.526.433,85 €	1.218.019,49 €

Por otro lado, comparando las ganancias por cada uno de los 50.000 contadores del parque, se recuerda que la tarifa fija ganaba 2,20€ más respecto al Método 1. En el caso de la tarifa por bloque, se gana 3,18€ de más por contador respecto al Método 1.

- **Periodo de Retorno de la Inversión final:**

El parque de contadores con tarifa por bloque, recupera la inversión 1,39 años antes que el parque con tarifa fija, a pesar de que sus gastos sean superiores. Esto sucede porque la diferencia de la mejora de los ingresos entre ambos métodos tiene mayor peso en relación a la diferencia de los gastos, es decir, las ganancias que genera el parque con tarifa por bloques son muy superiores a las que genera el parque con tarifa fija, haciendo que el tiempo de amortización sea inferior al de este último.

**Tabla 27.** Periodo de retorno de la inversión final según el tipo de tarifa

	TARIFA FIJA	TARIFA BLOQUES	DIFERENCIA BLOQUES ENTRE FIJA
PRI (año)	2,63	1,24	-1,39

- **Volúmenes y error:**

Como ya se comentó, el parque de contadores con tarifa fija registra el 94% del consumo real de los usuarios. Sin embargo, el parque de contadores con tarifa por bloque, al tener más contadores reemplazados, tiene una medición un poco más exacta igual al 94,30%, ya que, son más los contadores del parque que no están sujetos a mayores errores de medición sino al error inicial que presentan los aparatos.

Teniendo en cuenta esta mejora en la medición, el error global del parque de contadores con tarifa por bloques es el menor como se puede comprobar en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Volumen total registrado y error global promedio del parque de contadores según el tipo de tarifa

	TARIFA FIJA	TARIFA BLOQUES	DIFERENCIA BLOQUES ENTRE FIJA
Volumen total registrado (m <sup>3</sup> )	5.304.929,31	5.317.876,52	12.947,21
ε global promedio (%)	5,99%	5,76%	-0,23%

Como conclusión a este apartado, se ha podido observar la repercusión que tiene el número de contadores a sustituir en los diferentes parámetros que se han comparado. Y como dicha cantidad está vinculada al precio del m<sup>3</sup> de agua impuesto por la empresa, ya que, cuanto



mayor sea este, menor será la vida útil de los contadores y mayor será la cantidad de contadores a cambiar. Aparentemente parece que, a mayor cantidad de contadores sustituidos mayor serán los ingresos, sin embargo, esto no es así. Hay que recordar que es necesario mantener un equilibrio entre los gastos e ingresos generados para que los beneficios sean los máximos posibles y para que la inversión se recupere lo antes posible. Sustituir contadores en grandes cantidades, como hace el Método 2, no permite aprovechar al máximo la funcionalidad de los mismos, llegando al punto en el que a la empresa tenga que lidiar con una mayor cantidad de gastos. Es por ello, que no es aconsejable sustituir más contadores de los señalados en el Método 3, pues este método nos calcula la cantidad máxima de contadores que deben reemplazarse en cada batería para que los beneficios de la empresa sean los máximos posibles. Que la cantidad sea una u otra para un mismo método, depende de algunas de las características del abastecimiento como es el tipo de tarifa y su precio.

## 5 ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE CONTADORES DE MEDIANO CALIBRE

En este capítulo se exponen los pasos seguidos para conseguir el segundo objetivo del presente Trabajo Fin de Máster: aportar los primeros datos sobre el ritmo al que se deterioran los contadores de agua de mediano calibre, ya que, actualmente la falta de información sobre valores reales de este parámetro es absoluta.

Como ya se ha explicado en la introducción, incluso los contadores de agua nuevos están sujetos a errores de medición. Este error va aumentando a lo largo de la vida en servicio de los contadores haciendo que la medición se deteriore hasta tal punto que estos deban sustituirse por otros nuevos. Asimismo, se ha podido ver en los anteriores apartados, la importancia que tiene conocer la velocidad o ritmo de degradación que sufren los diferentes modelos de contadores para poder calcular el tiempo óptimo de reemplazo de los mismos. Dado que lo que se quiere conocer es cómo ha evolucionado el error en campo de los contadores de agua en servicio, se necesita ensayar contadores de este calibre que lleven un tiempo en funcionamiento.

Para lograr dicho objetivo, la empresa Aguas de Valencia/Global Omnium se ha encargado de seleccionar y extraer contadores de uso industrial, comercial, riego, docente u otras actividades y enviarlos al laboratorio de la Universidad Politécnica de Valencia, donde se encuentra el banco de ensayo de contadores de agua del Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua, en el cual se realizan los ensayos de este proyecto.



*Ilustración 21. Contadores de mediano calibre*

## 5.1 Descripción de los contadores ensayados

En este proyecto se ensaya un total de 118 contadores agrupados en cinco categorías de diámetro (20, 25, 30, 32 y 40). Dentro de cada una de estas categorías, los contadores se separan por modelos, existiendo cinco diferentes (M1, M2, M3, M4 y M5) pertenecientes a cuatro grupos de fabricantes (F1, F2, F3 y F4).

La mayoría de los contadores son de tipo chorro único, a excepción de un contador que es volumétrico y otro que es de chorro múltiple. La edad media de la muestra oscila entre los 8 y 9 años, es decir, son contadores que ya han pasado suficiente tiempo instalados para estar sometido a errores de medición. Además, la clase metrológica dominante en la muestra es la "Clase C" o "Clase R200", a excepción del contador volumétrico que tiene "Clase R160".

En las siguientes tablas se muestra el número de contadores que se ensaya según cada diámetro, fabricante y modelo. Y se muestra la edad media de los contadores según el diámetro.

**Tabla 29.** Número de contadores ensayados y promedio de la edad según el diámetro

Diámetro nom. (mm)	Nº de contadores ensayados	Edad media (años)
20	28	8,04
25	27	9,63
30	18	8,33
32	17	9,61
40	28	8,32
<b>Total (ud) y Promedio (años):</b>	<b>118</b>	<b>8,79</b>

**Tabla 30.** Número de contadores ensayados según el fabricante

Fabricante	Nº de contadores ensayados
F1	51
F2	18
F3	48
F4	1
<b>Total (ud):</b>	<b>118</b>

**Tabla 31.** Número de contadores ensayados según el modelo

Modelo	Nº de contadores	Tipo de contador
M1(F1)	51	Chorro único
M2 (F2 y F3)	15	Chorro único
M3 (F2, F3 y F4))	50	Chorro único y múltiple
M4 (F2)	1	Volumétrico
M5 (F3)	1	Chorro único
<b>Total (ud):</b>	<b>118</b>	-

## 5.2 Descripción de los equipos y material de laboratorio

A continuación, se exponen los diferentes equipos y materiales empleados para la ejecución de los ensayos en el laboratorio:

- a. **Válvula de seccionamiento a la entrada al banco de ensayos:** permite o no el paso del agua a la línea de ensayo (Ilustración 22).



**Ilustración 22.** Válvula de seccionamiento a la entrada del banco de ensayo

- b. **Manómetros hidráulicos:** para medir la presión a la entrada y salida de la línea de ensayo (Ilustración 23 y 24).

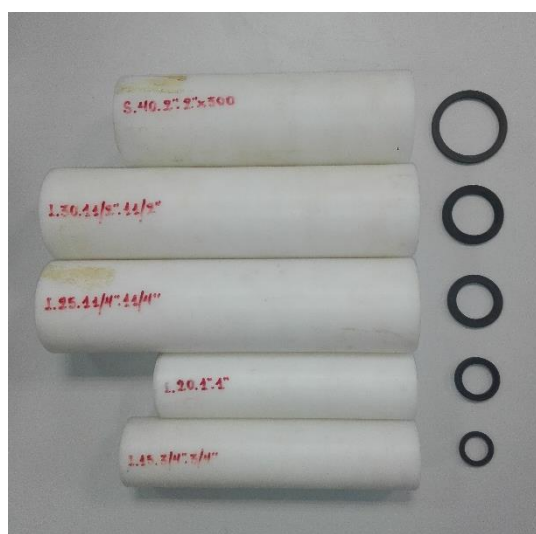


*Ilustración 23. Línea de ensayo de contadores desmontada*



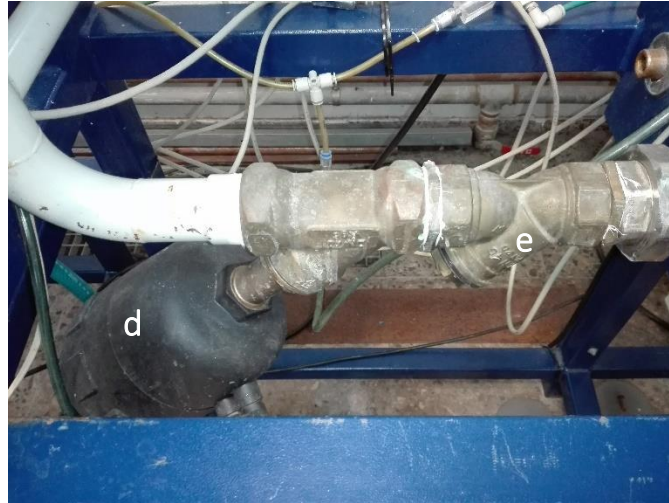
*Ilustración 24. Línea de ensayo de contadores montada*

- c. **Tubos de unión y juntas para el montaje de los contadores en la línea de ensayo del banco:** los tubos, aparte de unir los contadores en la línea de ensayo, realizan la función de estabilizadores del flujo, ya que, permiten una separación suficiente entre los medidores para que evitar el flujo llegue con distorsiones en el perfil de velocidades y que estas puedan afectar la medición de los contadores ubicados aguas abajo. Las juntas, colocadas entre los tubos y los contadores, ayudan a conseguir la estanqueidad en la línea de ensayo (Ilustración 25).



*Ilustración 25. Tubos y juntas para la instalación de contadores en el banco*

- d. **Válvula con control neumático direccional (2 vías y 2 posiciones):** actúa como llave de paso. Consta de dos vías, una es la entrada y la otra es la de salida. Cuando la válvula está en posición abierta, las dos vías se conectan sin nada en el medio y permiten que el aire comprimido fluya. Y al cerrarse, se corta el paso (Ilustración 26).
- e. **Filtro tipo “Y” de latón:** posee una malla filtrante para impedir el paso de posibles partículas existentes en el circuito y que puedan dañar los equipos (Ilustración 26).

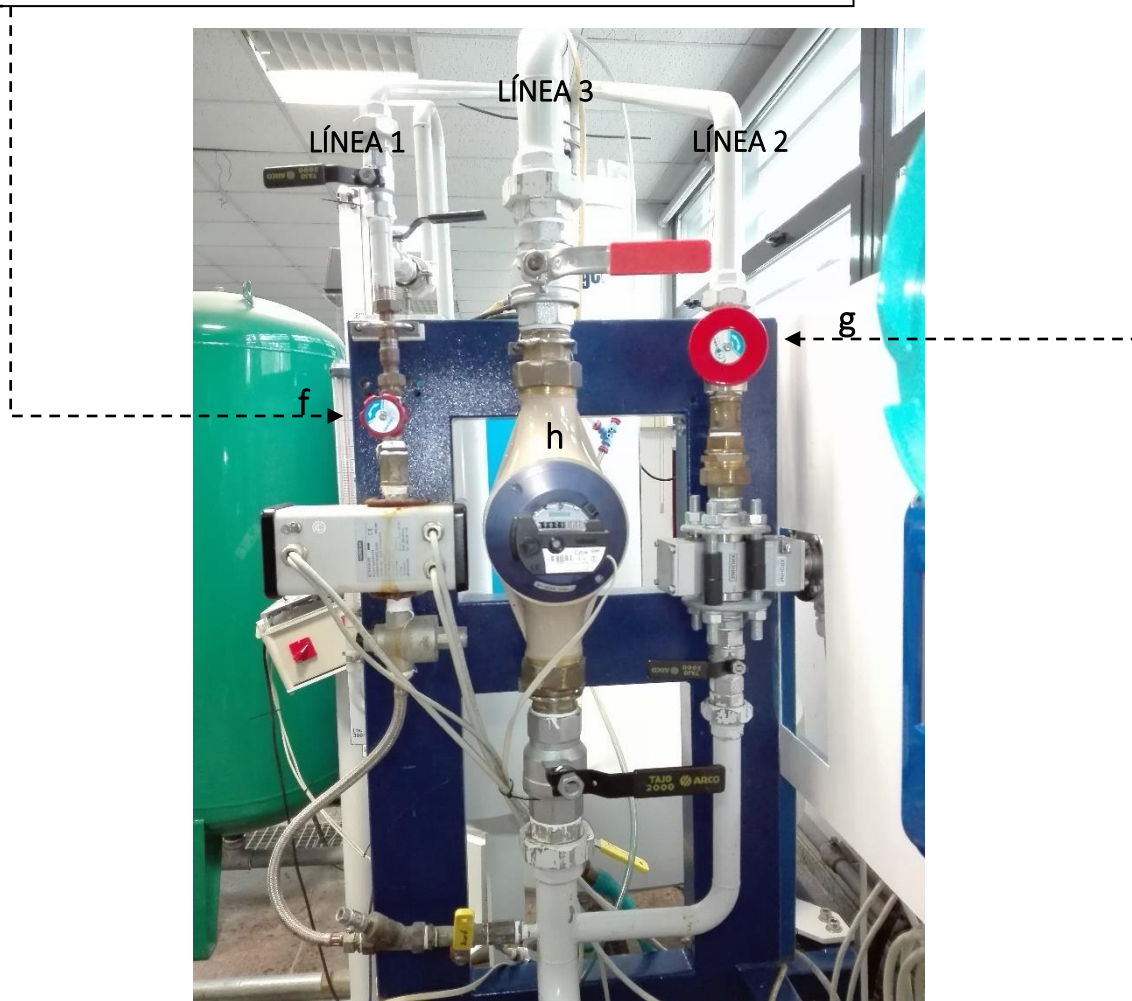


*Ilustración 26. Válvula con control neumático y filtro*

- f. **Válvula de regulación manual precisa (RG-91) para microcaudales, marca TECVAL:** se encarga de regular el caudal de ensayo que pasa por la línea 1, correspondiente a caudales bajos (Ilustración 27).
- g. **Válvula de regulación manual precisa (CR-100) para caudales, marca TECVAL:** se encarga de regular el caudal de ensayo que pasa por la línea 2, correspondiente a caudales medios y altos (Ilustración 29).
- h. **Contador de agua volumétrico de la marca Schlumberger:** se emplea para la medición de los caudales que pasan por la línea 3, correspondiente al ensayo de caudales altos (Ilustración 28).
- i. **Panel de control:** permite poner en marcha todo el banco encendiendo los equipos. Además, permite visualizar el caudal o volumen que pasa por la línea 3 sacándolo a partir de la medición que realiza el contador de agua de Schlumberger (h) (Ilustración 30).



**Ilustración 27.** Válvula de regulación precisa (RG-91) para microcaudales



**Ilustración 28.** Líneas de ensayo, válvulas de regulación y contador



**Ilustración 29.** Válvula de regulación precisa (CR-100) para caudales



*Ilustración 30. Panel de control para ver la medición del caudal que pasa por la línea 3*

- j. **Sensor electromagnético de caudal de la marca Krohne (Modelo: OPTIFLUX 1.000):** permite conocer el caudal que pasa por la línea 2 (Ilustración 31).
- k. **Sensor electromagnético de caudal de la marca Siemens (Modelo: SITRANS FM Medio tipo 911/F5):** permite conocer el caudal que pasa por la línea 1 (Ilustración 32).
- l. **Temporizador digital Panasonic LT4H:** nos muestra el tiempo en segundos que dura un ensayo. Se pone en marcha de forma automática cuando la válvula neumática (d) permite el paso del agua y deja de contabilizar el tiempo cuando la válvula se para (Ilustración 33).
- m. **Transmisor de caudal electromagnético de la marca Siemens (Modelo: SITRANS F M MAG 6.000 I / 6.000 I EX DE):** es un caudalímetro empleado para la medición del caudal que pasa por la línea 1 con una precisión de medida del +0,2% del caudal y que recibe información del caudal que registra el sensor “k” (Ilustración 33).
- n. **Caudalímetro electromagnético de la marca Krohne (Modelo: IFC100):** es un convertidor de caudal electromagnético que permite conocer el caudal que pasa por la línea 2, correspondiente a la de caudales medios y altos. Recibe la información del sensor “j” (Ilustración 33).





**Ilustración 31.** Sensor electromagnético de caudal de la marca Krohne (Modelo: OPTIFLUX 1000)



**Ilustración 32.** Sensor de Siemens (Modelo: SITRANS FM Medio. Tipo:911/F5)

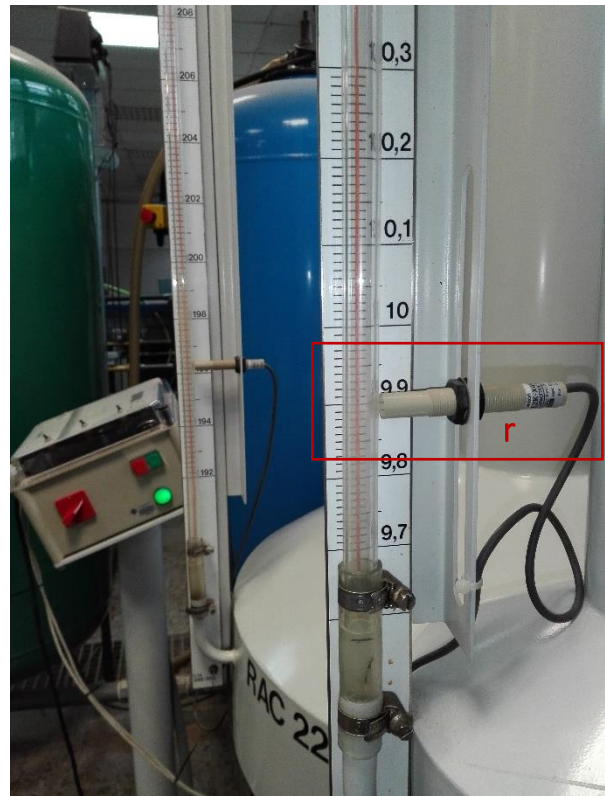


**Ilustración 33.** temporizador digital Panasonic y caudalímetros electromagnéticos de Krohne (izquierda) y Siemens (derecha)

- o. Depósito Schlumberger de volumen 10 litros:** recoge el volumen de agua que se ha utilizado en los ensayos realizados por la línea 1, es decir, a caudales bajos. Comprende los ensayos de caudales dentro del rango de 15 - 120 l/h (Ilustración 35).
- p. Depósito Schlumberger de volumen 200 litros:** recoge el volumen de agua que se ha utilizado en los ensayos realizados por la línea 2 y 3, es decir a caudales medios y altos. Comprende los ensayos de caudales dentro del rango de 750 – 17.000 l/h (Ilustración 35).
- q. Probetas de los depósitos:** para tomar la lectura del volumen de los depósitos tras el ensayo y poder calcular el error de medición de los contadores de agua (Ilustración 34).



*Ilustración 35. Depósitos Schlumberger de 10l (derecha) y 200l (izquierda)*



*Ilustración 34. Probetas de los depósitos*

- r. **Sensor de caudal:** cuando se llena el depósito, el sensor colocado en la probeta detecta el agua y termina el ensayo de forma automática (Ilustración 34).
- s. **Llave de corte de los depósitos:** se debe cerrar la llave de corte del depósito correspondiente al ensayo que se esté realizando (Ilustración 36).



*Ilustración 36. Llave de corte de los depósitos*

- t. **Grupo de bombeo:** se pone en funcionamiento una de las dos bombas del grupo para aportar una presión superior y constante durante los ensayos de caudales medios y altos (líneas 2 y 3) (Ilustración 38).

- u. **Calderines de aire comprimido:** se emplean para aportar presión durante el ensayo de caudales bajos, es decir, los realizados por la línea 1 (Ilustración 37).



*Ilustración 38. Grupo bombeo*



*Ilustración 37. Calderines*

## 5.3 Metodología de ensayo

### 5.3.1 Procedimiento del ensayo

Todos los contadores siguen el mismo procedimiento general de ensayo cambiando únicamente los caudales a los que se ensayan, los cuales se explicarán más adelante. A continuación, se explica la metodología seguida en los ensayos por pasos:

- **Paso 1: montar el banco de ensayo:**

En primer lugar, con la válvula de seccionamiento ubicada a la entrada del banco (a) cerrada, se colocan, desde aguas abajo hacia aguas arriba y en horizontal, todos los contadores posibles del mismo diámetro uniéndolos con los tubos de unión y juntas (c). Una vez están colocados, se presan ejerciendo fuerza con una palanca que se ubica al inicio de la línea de ensayo y que, junto con las juntas, proporciona estanqueidad al circuito y evita que se originen fugas durante los ensayos que puedan alterar las mediciones.

Posteriormente, se procede a purgar el aire existente en la línea de ensayo. Para ello, en el panel de control (i) se pone en marcha la válvula de control neumático (d) para que deje pasar

agua por la línea de ensayo. Para evitar una entrada brusca del agua que pueda alterar las condiciones en las que se encuentran los contadores o que, las burbujas de aire dañen los equipos, se abre la válvula de seccionamiento de la entrada del banco (a) muy lentamente dejando pasar el agua de forma gradual. Durante el purgado, las líneas 2 y 3 se encuentran cerradas, mientras que la línea 1 se encuentra abierta de manera que deje pasar el mínimo caudal de ensayo. Al cabo de un rato se va aumentando la apertura de la válvula de seccionamiento (f) y pasado aproximadamente unos 300 segundos, se cierra la línea 1 y se pasan a purgar las demás líneas aplicando el mismo método.

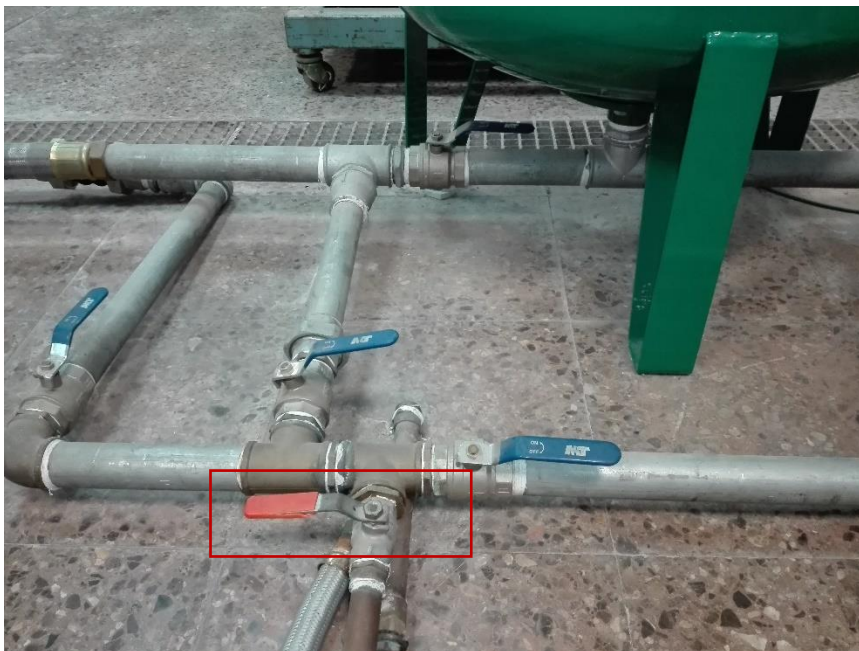
Es muy importante que, durante el purgado, se deje pasar el caudal de forma progresiva empezando primero por caudales muy bajos, ya que, si se empieza con caudales más elevados cabe la posibilidad de que el agua arrastre restos calcáreos o sedimentos que contengan los contadores cambiando su estado físico. Interesa ensayar los contadores en el estado y con las características que tienen al ser extraídos de la red para saber cuál es su funcionamiento real en el abastecimiento.

Durante el purgado se comprueba que la línea no fugue, si lo hiciera habría que desmontar y volver a montar los contadores.

- **Paso 2:** ensayo a caudales bajos:

Al acabar el purgado se comprueba que los calderines tengan la máxima presión posible, ya que, todo el ensayo a caudales bajos se realizará con la presión de los mismos y sin la ayuda de las bombas, pues se considera que no son necesarias para dichos caudales. Si los calderines no poseen suficiente presión o tienen una presión muy reducida, se procede a ganar presión. Para ello, se abre la llave de paso de los calderines y se vacían lo suficiente hasta que éstos vuelvan a recuperar presión (Ilustración 39).

Una vez se consigue presión en los calderines se puede comenzar con el ensayo a caudales bajos. En primer lugar, se toma lectura de los volúmenes totalizados que tienen los contadores. En segundo lugar, se cierran las llaves de paso y válvulas de seccionamiento de las líneas 2 y 3 y, se abren las llaves de paso de la línea 1, que es por la que se realiza el ensayo a estos caudales. Por otro lado, se cierra la llave de corte del depósito de volumen de 10 litros (o) para que acumule el volumen de agua durante el ensayo y, se abre la válvula de regulación para microcaudales (f) de manera que deje pasar el caudal mínimo de ensayo.



*Ilustración 39. Llave de corte para vaciar los calderines*

Se estudiaron con antelación los grados de apertura que deben tener las válvulas para dejar pasar los diferentes caudales de ensayos, contando el número de vueltas que se debe dar a la válvula mientras se comprobaba con el caudalímetro el caudal que pasaba por las líneas.

Con todo preparado, se pone en marcha el ensayo mediante el panel de control y, una vez se llena el depósito de 10 litros y el sensor de la probeta detecta caudal, se cierra la válvula neumática (d) de forma automática y termina el ensayo a caudal mínimo. Por último, se toma lectura de los volúmenes registrados por los contadores, del tiempo de ensayo y del volumen de ensayo que marca la probeta para calcular el error de la medición y obtener la curva de error (Apartado 5.4).

Finalmente, se repite el mismo proceso para el resto de caudales bajos que suele ser hasta el caudal de 120 l/h.

- **Paso 3: ensayo a caudales medios y altos:**

En el ensayo de contadores a caudales medio y altos se emplea una de las bombas para obtener mayor presión, por lo que, en primer lugar, se pone en marcha el grupo de bombeo (t).

Para caudales medios (de 750 – 4.000 l/h) se emplea la línea 2 y para caudales elevados (de 7.000 – 17.000 l/h) la línea 3. Por lo que, se cierran todas las líneas menos la correspondiente

al caudal que se quiere ensayar y, al igual que antes, se posiciona en la válvula de regulación el grado de apertura necesario para dejar pasar el caudal que se desea ensayar. En el caso de la línea 3, no hay válvula de regulación sino dos llaves de paso. Durante el ensayo, la llave superior se abre completamente y con la inferior (Ilustración 28) se regula su apertura para dejar pasar el caudal requerido, se controla el caudal que pasa evaluándolo mediante el panel de control (i).

Por otro lado, en el ensayo a caudales medios y altos se debe cerrar la llave del depósito de 200 litros, ya que, es este el que está conectado a las líneas 2 y 3.

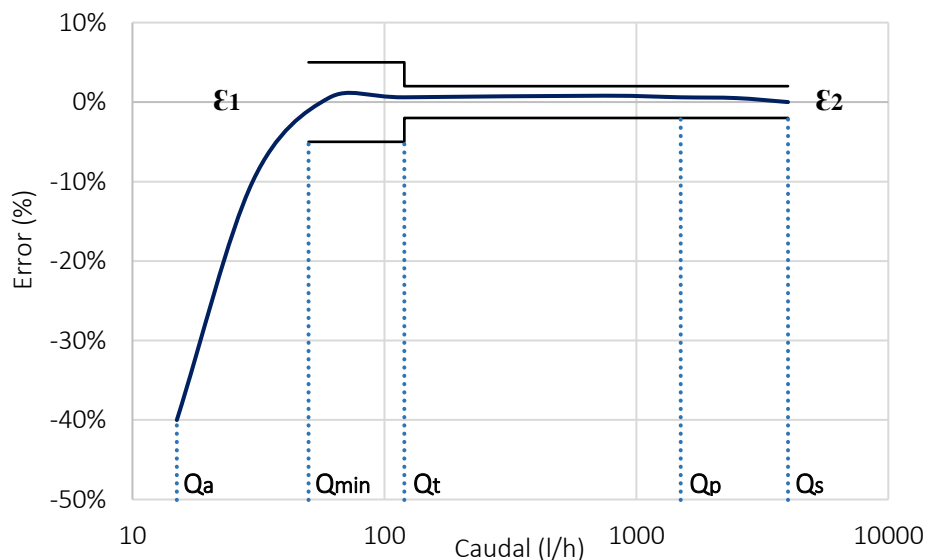
Finalmente, cuando termina el ensayo, se toma lectura de los volúmenes totalizados de los contadores, del tiempo de duración del ensayo que muestra el totalizador y del volumen acumulado en el depósito con la probeta del mismo.

- **Paso 4:** *desmontar la línea de ensayo:*

Una vez se termina de ensayar una tanda de contadores, se desmontan para seguir con el ensayo de otros medidores. Durante el desmontaje del banco de ensayo, el grupo de bombeo debe permanecer apagado. En primer lugar, se cierra la válvula de seccionamiento ubicada a la entrada del banco (a). A continuación, se abre la válvula neumática a través del panel de control para perder toda la presión que hay en la línea de ensayo y cuando los manómetros hidráulicos (b) marquen que ya no hay presión, se puede proceder a desmontar los contadores quitando la presión aplicada a la línea de ensayo durante el montaje, aflojando la palanca ubicada a la entrada del banco.

### 5.3.2 Selección de los caudales de ensayo

Para seleccionar los caudales de ensayos es necesario conocer primero los diferentes caudales que se tienen en cuenta en la curva de error de los contadores. La normativa actual de contadores de agua: “*Water meters for cold potable water and hot water - Part 1: Metrological and technical requirements (ISO 4064-1:2014)*” o la versión en español: “*Contadores de agua para agua fría potable y agua caliente. Parte 1: Requisitos metrológicos y técnicos. (ISO 4064-1:2015)*”, tienen en cuenta los siguientes valores de error y caudales para definir la calidad metrológica de un contador:



*Ilustración 40. Ejemplo de una curva de error con los caudales que la constituyen*

Los errores máximos permitidos por la normativa son:

- $\epsilon_1$ : es el error máximo permitido entre el caudal mínimo ( $Q_{min}$ ) y el caudal de transición ( $Q_t$ ). Es igual al  $\pm 5\%$ .
- $\epsilon_2$ : es el error máximo permitido entre el caudal de transición ( $Q_t$ ) y el caudal máximo o de sobrecarga ( $Q_s$ ). Es igual al  $\pm 2\%$ .

Y los valores característica de caudal, son los siguientes:

- **Caudal de Arranque ( $Q_a$ ):** se conoce como el caudal a partir del cual el contador empieza a moverse y, por lo tanto, a registrar volumen. Se considera un parámetro de difícil definición y en la práctica ninguna normativa precisa cómo estimarlo. Los contadores de agua están sujetos a grandes errores de medición a caudales bajos y, que éste parámetro sea lo menor posible depende de la precisión que tenga el contador. Aquellos contadores nuevos con una calidad metrológica superior tendrán un caudal de arranque inferior, sin embargo, es lógico que con el tiempo de uso del contador el caudal de arranque pueda aumentar. En el caso de los contadores de mediano calibre, objetivo principal de este trabajo, el error a caudales bajos es superior al que tienen los contadores residenciales. Esto se debe a que los contadores residenciales deben ser más precisos a caudales bajos, ya que, los usuarios domésticos presentan una frecuencia de consumo a caudales bajos elevada. Sin embargo, en los

contadores de mediano calibre destinados a uso comercial, docente, riego e industrial no frecuente el consumo a caudales tan bajos, por lo que, a mayor diámetro del contador, menos preciso se requiere que sea a estos caudales.

- **Caudal Mínimo ( $Q_1$  o  $Q_{min}$ ):** es el mínimo caudal en el que el contador funciona dentro del rango de error máximo permitido, es decir, dentro del  $\pm 5\%$ .
- **Caudal de Transición ( $Q_2$  o  $Q_t$ ):** es el valor de caudal situado entre el caudal mínimo ( $Q_{min}$ ) y el caudal permanente o nominal ( $Q_p$ ). Además, es el valor de caudal que divide en dos todo el rango de caudales, ya que, a partir de él, el error máximo permitido tiene que pasar del  $\pm 5\%$  al  $\pm 2\%$ , dejando la curva de error separa por dos zonas: la “zona superior” (ubicada a la derecha, le pertenece el error máximo permitido del  $\pm 2\%$ ) y la “zona inferior” (ubicada a la izquierda, le pertenece el error máximo permitido del  $\pm 5\%$ ) (Arregui de la Cruz, et al., 2007).
- **Caudal nominal o Permanente ( $Q_3$  o  $Q_p$ ):** es el valor máximo de caudal para el que se requiere que el contador funciona de manera satisfactoria dentro del error máximo permitido. Es un dato que dan los fabricantes y le suelen llamar “ $Q_3$ ” o “ $Q_n$ ” (Ilustración 41).



*Ilustración 41. Caudal nominal o  $Q_3$  de un contador indicado por el fabricante*

- **Caudal de máximo o de Sobrecarga ( $Q_4$  o  $Q_s$ ):** es el valor de caudal al cual el contador puede funcionar, durante periodos cortos de tiempo, manteniendo el error de



medición dentro del rango máximo permitidos del  $\pm 2\%$  y recuperando su plena funcionalidad cuando vuelva a las condiciones normales de operación. Dado que a caudal máximo la pérdida de carga en el contador está en el límite superior, también se debe cumplir a este caudal que la pérdida de carga no supere el valor máximo admisible (1 bar) (Arregui de la Cruz, et al., 2003).

En este trabajo, se ensaya cada contador a 8 caudales diferentes. Para poder establecer dichos caudales de ensayo, es necesario conocer cuatro de los cinco caudales definidos anteriormente, los cuales son:  $Q_{min}$ ,  $Q_t$ ,  $Q_p$  y  $Q_s$ . Teniendo en cuenta que el valor del caudal nominal o permanente es un dato que ofrecen los fabricantes, la normativa citada calcula el resto de caudales según la clase metrológica de las siguientes formas:

- Para los contadores cuya clase viene definida como A, B, C o D (Clases metrológicas especificadas por la Norma ISO 4064:1993), los valores de caudal mínimo y de transición se calculan con las fórmulas de la Tabla 32.

**Tabla 32.** Clases metrológicas definidas en la norma ISO 4064:2014 en función de su caudal permanente

Clase	Caudal	$Q_p$	
		$< 15 \text{ m}^3/\text{h}$	$\geq 15 \text{ m}^3/\text{h}$
A	$Q_{min}$	$0,04 \cdot Q_p$	$0,08 \cdot Q_p$
	$Q_t$	$0,10 \cdot Q_p$	$0,30 \cdot Q_p$
B	$Q_{min}$	$0,02 \cdot Q_p$	$0,03 \cdot Q_p$
	$Q_t$	$0,08 \cdot Q_p$	$0,20 \cdot Q_p$
C	$Q_{min}$	$0,01 \cdot Q_p$	$0,006 \cdot Q_p$
	$Q_t$	$0,015 \cdot Q_p$	$0,015 \cdot Q_p$
D	$Q_{min}$	$0,0075 \cdot Q_p$	-
	$Q_t$	$0,0115 \cdot Q_p$	-

Y el caudal de sobrecarga ( $Q_s$ ) se calcula, para todas las clases metrológicas existentes, como el doble del caudal permanente o nominal.

- Para los contadores cuya clase metrológica viene definida por el ratio  $Q_3/Q_1$  según la normativa ISO 4064:2005 ( $R[Q_3/Q_1]$ , ej. R200), se emplean las siguientes fórmulas:

$$Q_{min} = \frac{Q_p}{Ratio} \quad (40)$$

$$Q_t = 1.6 * Q_{min} \quad (41)$$

$$Q_s = 1.25 * Q_p \quad (42)$$

Aplicando lo descrito a los contadores ensayados en este proyecto, se calculan los caudales en m<sup>3</sup>/h según la clase metrológica y el caudal nominal o permanente de cada diámetro (Tabla 33), a partir de los cuales se pueden elegir los caudales de ensayo.

**Tabla 33.** Caudales que definen la curva de error según el diámetro y la clase metrológica de los contadores ensayados

Diámetro (mm)	Clase Metrológica	Q <sub>permanente</sub> (Q <sub>3</sub> /Q <sub>n</sub> ) (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>mínimo</sub> (Q <sub>1</sub> ) (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>transición</sub> (Q <sub>2</sub> ) (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>sobrecarga</sub> (Q <sub>4</sub> ) (m <sup>3</sup> /h)
20	R200	4,0	0,020	0,032	5,0
	C	2,5	0,025	0,038	5,0
	R160	4,0	0,025	0,040	5,0
25	C	3,5	0,035	0,053	7,0
30	R200	10,0	0,050	0,080	12,5
	B	5,0	0,100	0,400	10,0
32	C	6,0	0,060	0,090	12,0
40	R200	16,0	0,080	0,128	20,0
	C	10,0	0,100	0,150	20,0

Conociendo estos caudales, se elige un total de 8 caudales de ensayo cuyos valores estén dentro del rango entre el Q<sub>min</sub> y el Q<sub>s</sub>. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los caudales de ensayo elegidos según las clases metrológicas y los diámetros de los contadores que se han ensayado en el laboratorio del Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua.

**Tabla 34.** Caudales de ensayo según el diámetro del contador y su clase metrológica

<b>Clase C, R200 y R160</b>								
Diámetro (mm)	Q <sub>1</sub> (l/h)	Q <sub>2</sub> (l/h)	Q <sub>3</sub> (l/h)	Q <sub>4</sub> (l/h)	Q <sub>5</sub> (l/h)	Q <sub>6</sub> (l/h)	Q <sub>7</sub> (l/h)	Q <sub>8</sub> (l/h)
20	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000
25	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000
30	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000
32	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000
40	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000
<b>Clase B</b>								
30	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000

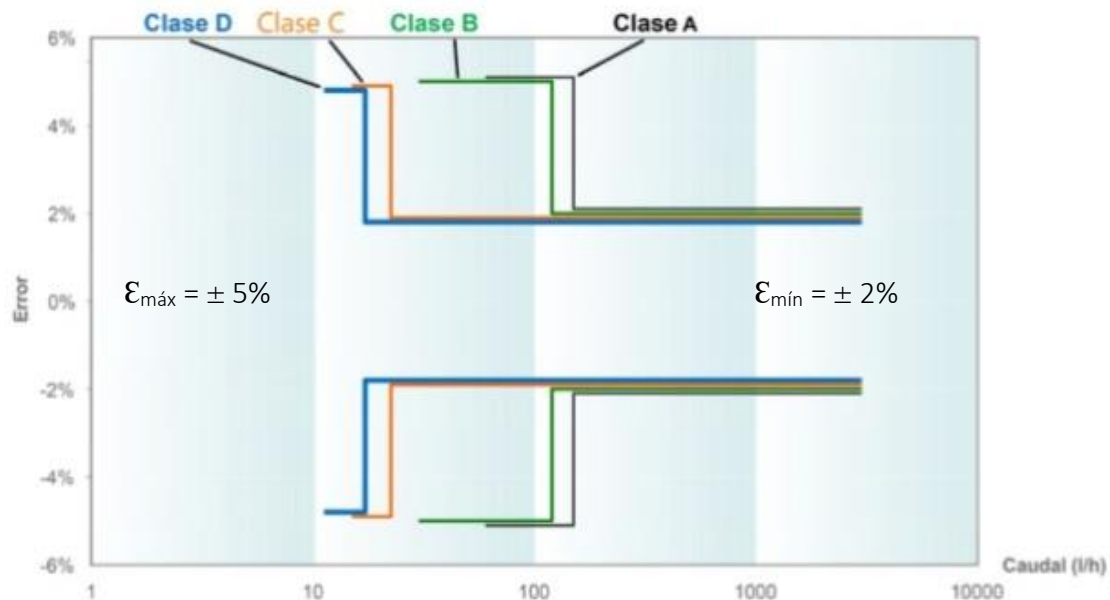
### 5.3.3 Obtención de la curva de error

Como ya se ha visto, la curva de error de los contadores nos proporciona información sobre cómo evoluciona la precisión de la medición de los mismos a diferentes caudales o consumos. Conocerla nos permite saber cuándo y a qué caudales un medidor está sujeto a sobrecontaje o subcontaje. En el caso de sobrecontaje, los contadores registran más volumen del que realmente está pasando, por lo que, se les está cobrando de más a los consumidores. Por el contrario, si existe subcontaje es la compañía abastecedora la perjudicada, ya que, el contador está midiendo menos cantidad de agua de la que realmente están inyectando, haciendo que la empresa pierda ingresos.

Por otro lado, se puede justificar el comportamiento que tiene la curva de error evaluando el estado físico y las condiciones de instalación de los contadores. Ya que, hay muchos factores que conllevan un deterioro de las partes físicas de los aparatos y que dan lugar a alteraciones en la medición.

Para saber si los aparatos están sujetos o no a errores de medición significativos, la normativa de contadores ISO 4064-1:2014 establece unos límites máximos de precisión que deben cumplir las curvas de error. Estos límites son los mismos para todas las clases metrológicas (A, B, C o D según ISO 4064:1993 y R[Q3/Q1] según ISO 4064:2005), lo único que varía es el rango de caudales en los que se exige al contador que mantenga una determinada precisión (Arregui de la Cruz, et al., 1998). Como ya se explicó en el “Apartado 5.2.2”, el rango de caudales a partir del cual los contadores deben garantizar un error inferior al  $\pm 5\%$  y al  $\pm 2\%$  ( $\epsilon_{\max}$  y  $\epsilon_{\min}$ , respectivamente), queda definido por el caudal mínimo y de transición ( $Q_{\min}$  y  $Q_t$ ,

respectivamente). Además, el rango de caudales depende de la clase metrológica del contador. Cuanto peor es la clase metrológica del contador, mayor es el rango de caudales que puede admitir un error máximo igual al  $\pm 5\%$ . Por el contrario, una clase metrológica más precisa acepta un error mayor en un menor rango de caudales (Ilustración 42).



**Ilustración 42.** Límites de precisión para diferentes clases metrológicas según ISO 4064:1993. Fuente: Diapositivas IT 2016. Asignatura: "Gestión técnica de abastecimientos de agua urbano sostenibles"

Una vez se conocen los ocho caudales de ensayo determinados a partir de los caudales que forman la curva de error ( $Q_{\text{min}}$ ,  $Q_t$ ,  $Q_p$  y  $Q_s$ ) (Apartado 5.2.2) y se realizan los ensayos de los contadores a los diferentes caudales (Apartado 5.2.3), se calcula el error de cada ensayo y los errores de medición de los contadores para construir la curva de error.

- **Error de ensayo:**

El error de ensayo nos indica cuánto se ha desviado el caudal real que pasa por la línea de ensayo del caudal al que se quiere realizar el ensayo. Hay que tener en cuenta algunos factores que intervienen durante el ensayo no permiten que el caudal que pasa por la línea de ensayo sea exactamente el caudal al que se quiere realizar el ensayo. Esto se debe, por ejemplo, a errores inevitables a los que están sujetos los caudalímetros. Los caudalímetros, durante el ensayo, son la única referencia para controlar el grado de apertura de las válvulas y, por lo tanto, el caudal que pasa por las líneas, sin embargo, al estar sometido a errores de medición, como todos los dispositivos, hacen que el control del caudal de ensayo no sea inmediato y varía respecto a su valor real. Por otro lado, el ensayo a caudales bajos se realiza con la presión

de los calderines y, estos van perdiendo presión a medida que evoluciona el ensayo haciendo que el caudal de ensayo real varíe y tenga que corregirse periódicamente la apertura de las válvulas. Para tener una idea de cuánto varía el caudal real del caudal de ensayo se realizan los siguientes cálculos. De manera que, si el error de ensayo es superior al  $\pm 3\%$  se considera que debe repetirse dicho ensayo. Esto nos proporciona una mayor fiabilidad a la hora de obtener la curva de error de los contadores.

$$\varepsilon_{ensayo} = \frac{Q_r - Q_e}{Q_e} \quad (43)$$

Donde:

- $\varepsilon_{ensayo}$ : es el error que tiene el ensayo realizado (%)
- $Q_e$ : es el caudal al que se quiere realizar el ensayo y que se define en la Tabla 31 para cada diámetro y clase metrológica (l/h)
- $Q_r$ : es el caudal que realmente pasa por la línea de ensayo, calculado con la Ecuación 43 (l/h)

$$Q_r = \frac{V_r}{t} \quad (44)$$

Donde:

- $V_r$ : es el volumen que acumula el depósito del laboratorio (o, p) y que se mide con la probeta (q). (litros)
- $t$ : es el tiempo que dura el ensayo y se mide con el temporizador (i). (h)
- **Error de medición de los contadores:**

El error de medición de los contadores ( $\varepsilon$ ) para cada caudal de ensayo ( $Q_e$ ) se calcula teniendo en cuenta los volúmenes que registran los contadores en los totalizadores y el volumen real que pasa por la línea de ensayo:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V - V_r}{V_r} \quad (45)$$

Donde:

- $\varepsilon$ : error de medición de los contadores (%)
- $\Delta V$ : es la diferencia entre el volumen registrado al inicio del ensayo y al final, es decir, el volumen que ha registrado el contador durante el ensayo (litros)

$$\Delta V = V_f - V_i \quad (46)$$

Donde:

- $V_i$ : volumen totalizado que indica el contador antes de comenzar el ensayo ( $m^3$ )
- $V_f$ : volumen totalizado que indica el contador al finalizar el ensayo ( $m^3$ )

Finalmente se construye una gráfica con los errores de medición obtenidos para cada caudal de ensayo y, se añaden los límites máximos de error permitidos, teniendo en cuenta la clase metrológica del contador y los caudales mínimos y de transición que le corresponden. De esta forma, se puede evaluar el estado de la medición de los contadores en el siguiente apartado.

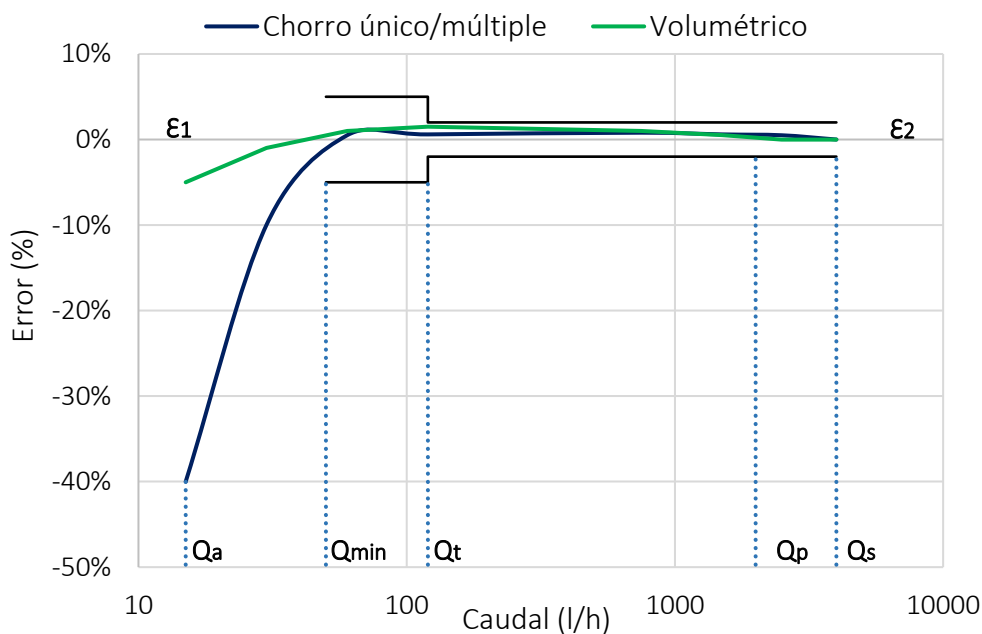
En el Anexo 10.1 se adjunta una tabla que recoge las características de cada contador y en el Anexo 10.2 los resultados de error obtenidos para cada caudal ensayado.

#### 5.4 Análisis de las curvas de error obtenidas

Evaluando la forma de la curva de error de los contadores usados, se puede observar si un contador ha seguido un deterioro de la medición normal, es decir, aquel deterioro inevitable que sufren los aparatos con el paso de su vida útil, o si se ha estropeado y está sujeto a grandes errores de medición. Esto es posible gracias a que, cada tipo de contador (chorro único, chorro múltiple, volumétrico, etc.), tiene una curva de error típica que define el comportamiento estándar que sigue su medición.

Se considera que la curva de error que presenta un contador de chorro único o múltiple, siendo el primero el tipo que más abunda en la muestra de ensayo, tiene un comportamiento normal cuando su forma es similar a la curva de error de la Ilustración 43. A caudales muy bajos entre 0-15 l/h el error es máximo porque el contador no mide o mide un porcentaje muy bajo del volumen consumido. A medida que se acerca al caudal mínimo, el error va mejorando gradualmente y, entre el caudal mínimo y el caudal de transición el error supera el 0%. Finalmente, a partir del caudal de transición hasta el caudal de sobrecarga el error de medición se va estabilizando y aproximando cada vez más al 0%.

En cuanto a la curva de error estándar de los contadores volumétricos, también se puede ver en la Ilustración 43 el comportamiento típico que suelen tener. A partir del caudal de arranque los errores no son tan bajos como ocurre en el caso de un contador de chorro único o múltiple, y van aumentando de forma progresiva hasta que llegan al caudal de transición, a partir del cual el error comienza a estabilizarse y obtener valores próximos al 0%.



**Ilustración 43.** Curvas de error estándar según el tipo de contador; chorro único/múltiple y volumétrico

Estas curvas estándar son típicas en medidores que no están muy deteriorados ni sujetos a defectos físicos o a un mal diseño que pueda cambiar sus características metrológicas, por ello, los errores de medición de los caudales superiores al mínimo, se encuentran dentro del rango de errores máximos permitidos. Sin embargo, con el paso de los años, las características físicas de los medidores se van deteriorando perjudicando a la medición y cambiando la forma

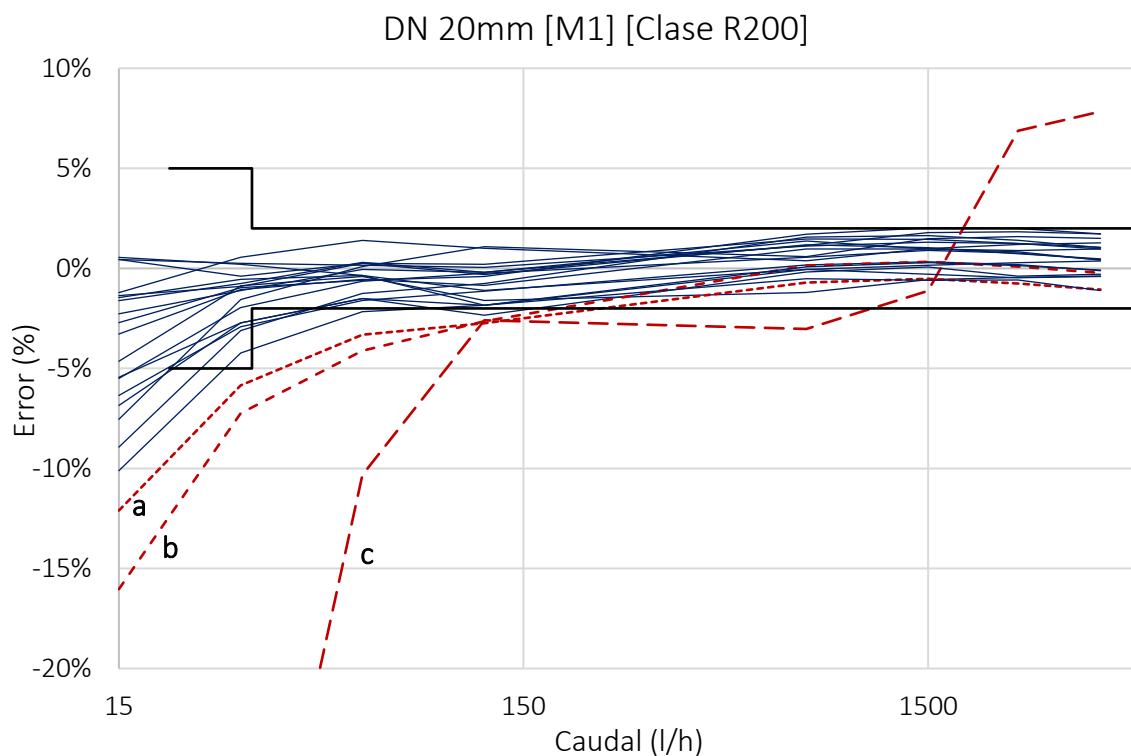
de la curva de error. La normativa de contadores de agua (ISO 4064-1:2014) establece como degradación normal a aquella en la que los errores de medición no superan el doble del rango de los errores máximos permitidos, es decir, el  $\pm 10\%$  y  $\pm 4\%$ . En caso de que la curva de error presente errores fuera de este rango, se considera que la degradación no es normal y puede estar influenciada por incidencias existentes en el medidor.

#### 5.4.1 Diagnóstico de los contadores defectuosos

A continuación, se muestran las curvas de error obtenidas tras el ensayo de los 118 contadores de mediano calibre. Las gráficas se separan según el diámetro y modelo de los contadores, y se explica el comportamiento que siguen las curvas haciendo hincapié en aquellas que presentan anomalías en la medición. Además, se justifica este comportamiento inusual analizando el estado físico que presentan los contadores y las posibles afecciones del mismo en la medición.

- **Contadores ensayados de diámetro 20 mm:**
  - a. **Modelo 1 y clase metrológica R200:**

Se han ensayado 21 contadores pertenecientes al modelo 1 (M1) con diámetro 20mm. La edad media de estos medidores es de 7,48 años y en general funcionan correctamente.



**Ilustración 44.** Curvas de error de los contadores con DN 20mm, modelo 1 y clase metrológica R200



La mayoría de las curvas de error se presentan en color azul y tienen un comportamiento normal dentro de los límites de error máximos establecidos, consiguiendo, algunas de ellas, errores próximos al 0%. Independientemente de su buen funcionamiento, se ha revisado el estado físico de estos contadores y se ha observado como algunos no presentan signos de deterioro, tales como óxido e incrustaciones en su interior, lo que justifica el buen funcionamiento de los mismos durante los ensayos. Sin embargo, la gran mayoría de los medidores tienen sus filtros completamente o parcialmente obstruidos por sedimentos (Ilustraciones 45, 46, 47 y 48). Se han identificado estos sedimentos como restos de polietileno de las tuberías que se encuentran aguas arriba de los mismos. Las tuberías, como todos los materiales se van desgastando con el paso del tiempo y, los filtros de los contadores retienen todos estos sedimentos. Se ha observado como a la salida de los contadores no hay presencia de ningún resto de material, por lo que, se considera que los filtros están realizando correctamente su función. Por otro lado, los contadores no presentan signos de incrustaciones, las cuales sí podrían afectar al comportamiento de la curva de error. Con estos resultados, se puede afirmar que este modelo de contadores no se ve gravemente afectado por la obstrucción parcial de los filtros, ya que, esta no les supone una pérdida de carga elevada a la entrada del contador que someta su medición a subcontaje fuera de los límites de error.



**Ilustración 45.** Estado del filtro del contador con ID 7



**Ilustración 46.** Estado del filtro del contador con ID 8



**Ilustración 47.** Estado del filtro del contador con ID 12



**Ilustración 48.** Estado del filtro del contador con ID 16

Por otro lado, uno de los contadores ensayados, tiene su válvula antirretorno rota (Ilustración 49). Sin embargo, esto no supone ninguna alteración en la medición, ya que, la válvula se encuentra aguas abajo del contador una vez éste realiza la lectura. Como precaución, se ha ensayado este contador ubicándolo el último aguas abajo de la línea de ensayo, para que el resto de contadores no se vean afectados si la válvula antirretorno rota forma distorsiones en el perfil de velocidades.



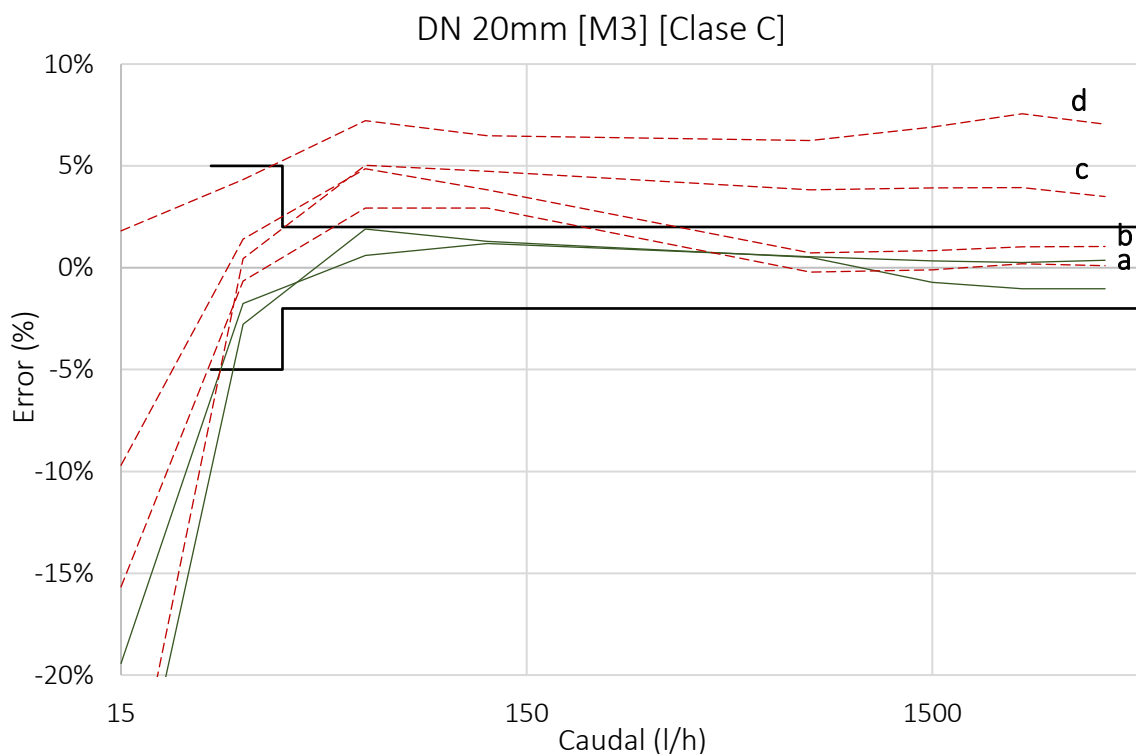
**Ilustración 49.** Estado de la válvula antirretorno del contador con ID 21

En cuanto a las curvas que aparecen en color rojo, sólo esas tres de las 21 curvas obtenidas presentan errores fuera de los rangos de error máximos permitidos. Las curvas señaladas como “a” y “b”, están fuera de los límites exigidos por la normativa, pero dentro del doble del error máximo permitido, por lo que, se considera que tienen una degradación normal. Sin

embargo, la curva “c” presenta anomalías en su comportamiento, ya que, está sujeta a grandes errores de subcontaje a caudales bajos y a sobrecontaje a caudales altos. Se ha observado el estado físico de los contadores con curvas “a, b y c” y no presentan signos de deterioro característicos. Sus filtros están limpios y no hay incrustaciones en los contadores. Esta incoherencia puede ser normal en un contador no mecánico, como es este caso, cuando en el proceso de fabricación y calibración del mismo se ha cometido algún fallo en la programación del mismo.

**b. Modelo 3 y Clase metrológica C:**

Se ensayaron un total de seis contadores pertenecientes al M3 y clase C. La edad promedio de los mismos es de 11,27 años. Sólo dos de los contadores tienen una medición adecuada dentro de los límites máximos de error que indica la normativa (curvas de color verde). En cuanto al estado físico de los mismos, se encuentran limpios y libres de sedimentos e incrustaciones.



*Ilustración 50. Curvas de error de los contadores con DN 20mm, modelo 3 y clase metrológica C*

Dentro de los cuatro contadores con peor comportamiento de la medición, las curvas “a y b” están dentro del doble del rango de errores máximos permitidos por la normativa, por lo que, se consideran que han sufrido una degradación típica de cualquier contador con edad elevada

(11 y 12 años, respectivamente). Respecto al estado físico de los mismos, el contador con ID 26 y curva de error “a” no presenta signos de deterioro físico tales como incrustaciones y su filtro se encuentra limpio. En cambio, el contador con curva de error “b” tiene algunas incrustaciones en su interior y el filtro lleno de sedimentos de tamaño considerable (Ilustración 51). Este estado físico puede ser el causante de que la curva de error presente sobrecontaje a caudales medios (1.500 y 2.500 l/h), ya que, tantos los sedimentos depositados en el filtro como las incrustaciones en su interior pueden causar distorsiones en el perfil de velocidades haciendo que el aparato mida más agua de la que realmente está pasando.

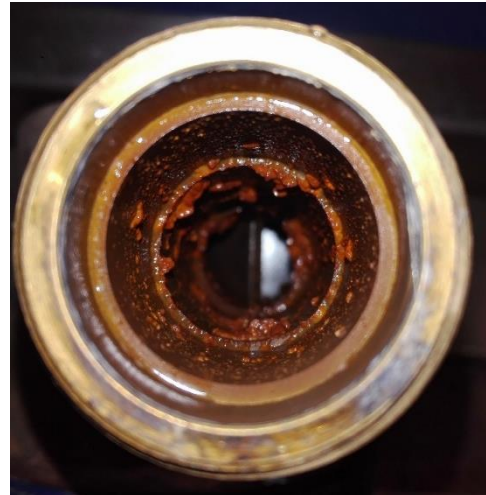


**Ilustración 51.** Estado del filtro del contador con ID 27

Las curvas “c y d” presentan sobrecontaje, siendo la “d” la curva en peor estado. El filtro de ambos contadores se encuentra completamente limpio sin ningún sedimento retenido, en cambio, el interior de los contadores se encuentra deteriorado. Ambos presentan incrustaciones, sobretodo el contador con ID 24, al que le corresponde la curva “d” en peor estado (Ilustración 52). El estado físico del interior de los contadores es el responsable de que el deterioro de las curvas de error se considere anómalo. La presencia de incrustaciones en el interior de un contador origina alteraciones en el perfil de velocidades haciendo que el agua, en ocasiones, acabe pasando a mayor velocidad e impacte con mayor fuerza en la turbina de los contadores de chorro único incrementando así, el número de vueltas de la turbina y el volumen registrado en el totalizador.



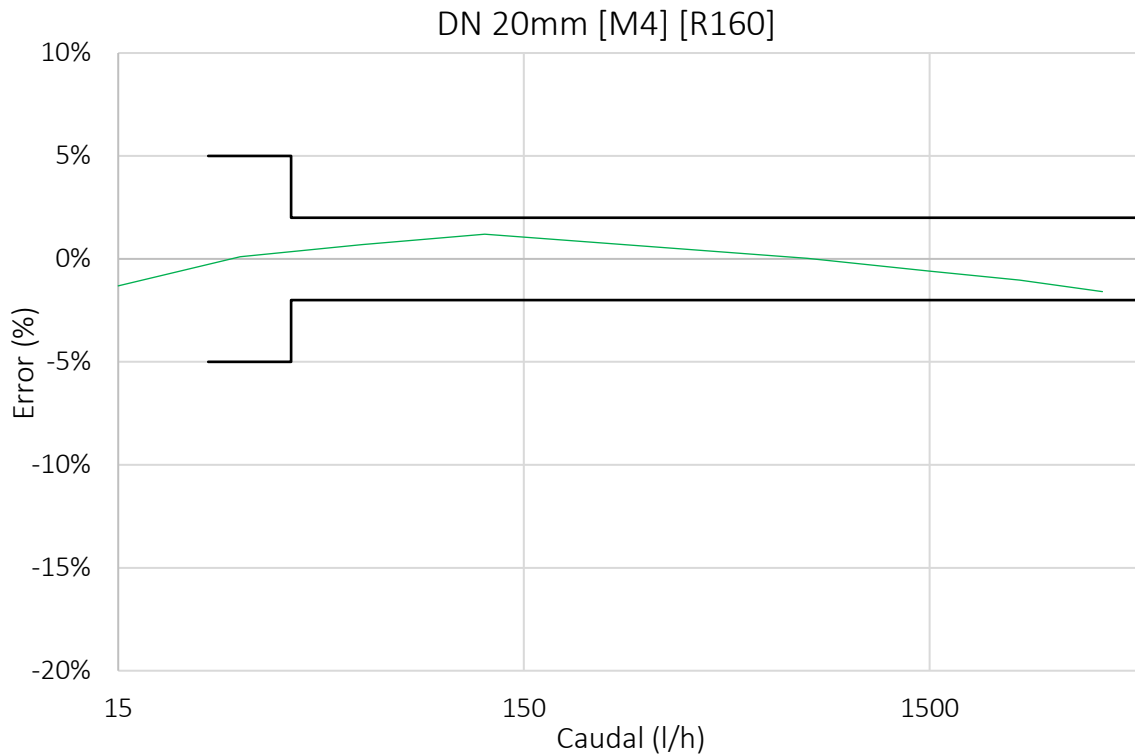
*Ilustración 52. Estado del interior del contador con ID 24*



*Ilustración 53. Estado del interior del contador con ID 25*

**c. Modelo 4 y clase metrológica R160:**

Este es el único contador de tipo volumétrico ensayado. Desde su instalación hasta la fecha de ensayo ha pasado solamente un año, por lo que, no es un contador demasiado antiguo para presentar deterioro en su curva de error. En la Ilustración 54 se puede observar como la curva respeta en todo momento los errores máximos permitidos y como la forma de la misma es igual a la curva típica de este tipo de contadores (Ilustración 43). La curva de error presenta valores próximos al 0% incluso a caudales bajos, que es donde el error de los contadores suele ser superior.



**Ilustración 54.** Curvas de error de los contadores con DN 20mm, modelo 4 y clase metrológica R160

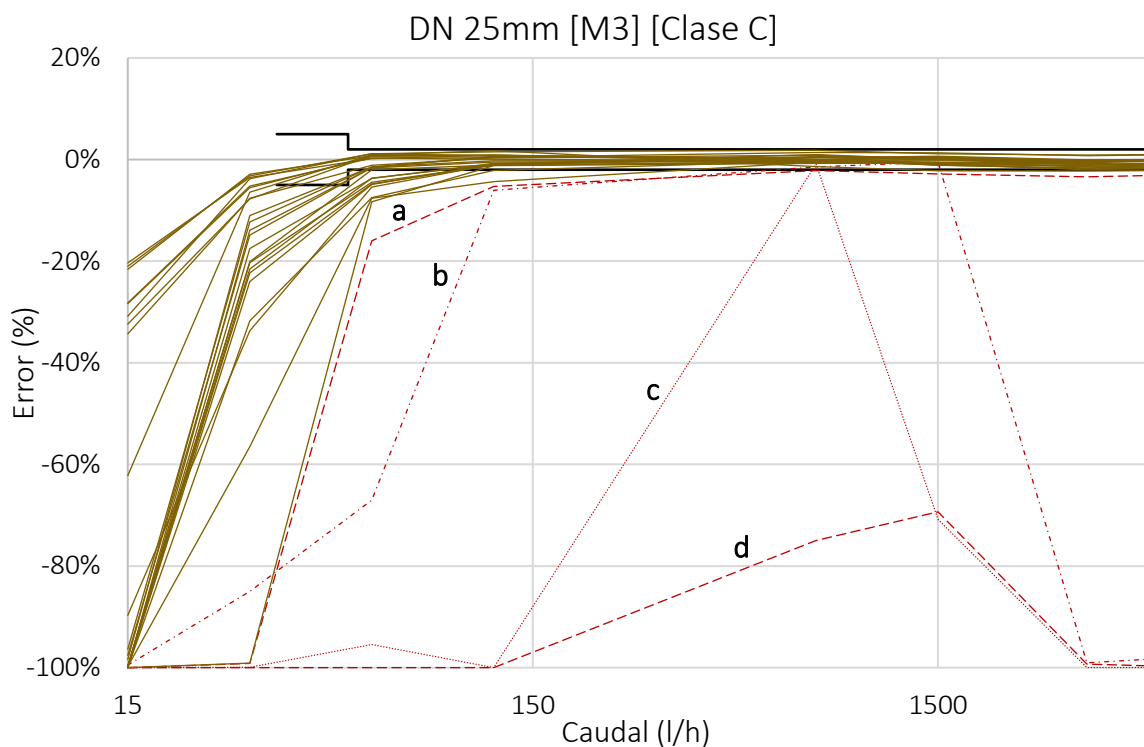
En cuanto al estado físico del contador, este no presenta ningún signo de incrustaciones u óxido en su interior. Sin embargo, el filtro se encuentra lleno de sedimentos (Ilustración 55). Es fundamental que el filtro realice correctamente su función de retener sólidos suspendidos que conduce el agua, ya que, los contadores volumétricos son especialmente sensibles a la entrada de sólidos en su interior (Arregui de la Cruz, et al., 2007).



**Ilustración 55.** Estado del interior del contador con ID 28

- **Contadores ensayados de diámetro 25 mm:**

Se han ensayado un total de 27 contadores de diámetro nominal 25mm, pertenecientes al modelo 3 y la clase metrológica C. La edad media de todos estos aparatos es de 9,63 años.

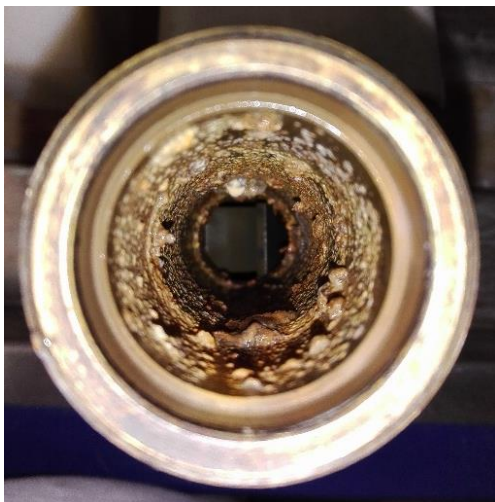


*Ilustración 56. Curvas de error de los contadores con DN 25mm, modelo 3 y clase metrológica C*

Todos los contadores ensayados a caudales bajos (15 y 30 l/h) están sometidos a grandes errores de subcontaje. Y de todos ellos, 8 contadores presentan un error superior al doble máximo permitido ( $> -10\%$ ) en el ensayo a caudal 60 l/h. A partir de este caudal, todos los contadores, a excepción de cuatro, presentan errores de medición estables dentro de los límites exigidos por la normativa, por lo que, se consideran que presentan una degradación normal. A pesar de que la degradación y el comportamiento de la curva de error se suponen como normal, algunos contadores presentan un estado físico bastante deteriorado. Entre ellos, destacan los siguientes contadores:

- Se ha localizado un contador manipulado (ID 30). En la Ilustración 57, se puede observar como el contador aparece totalmente desarmado. La tapa de protección del contador, el cristal y totalizador, aparecen sueltos. Es muy complicado desmontar un contador de esta manera, por lo que, se considera la opción de que tenga un error de fábrica o haya sido

manipulado aplicándole calor a la carcasa para poder soltarla. Además, el contador presenta muchas incrustaciones a la salida del mismo (Ilustración 58). A pesar de todo esto, el contador presenta una de las mejores curvas de error aproximándose con errores negativos, incluso a caudales medios, al 0% de error. Sin embargo, se considera que esta medición no es fiable, ya que, queda abierta la posibilidad de que haya sido manipulado con la finalidad de estropear el acoplamiento magnético y hacer que el contador mida menos caudal del que realmente pasa.



**Ilustración 58.** Estado del interior del contador con ID 30



**Ilustración 57.** Contador con ID 30 desarmado

- Por otro lado, la mayoría de los contadores presentan un alto nivel de incrustaciones a la salida de los mismos, como puede verse en las siguientes ilustraciones. En cuanto a los filtros, la gran mayoría están limpios, a excepción de algunos que han retenido restos de polietileno de las tuberías o piedras de pequeño tamaño. También aparece un filtro roto (Ilustración 61). Sin embargo, nada de esto ha afectado a las curvas de error, ya que, estas siguen el deterioro típico de cualquier contador de chorro único.

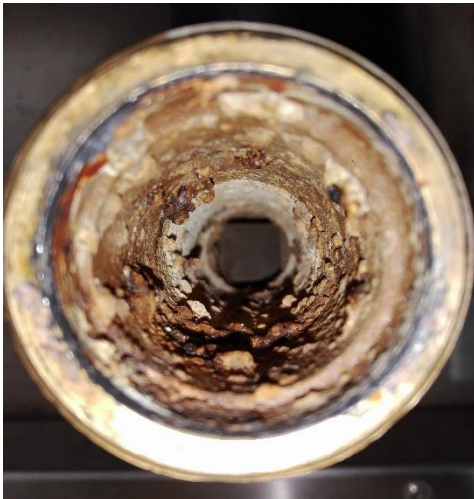




**Ilustración 60.** Estado del interior del contador con ID 32



**Ilustración 59.** Estado del interior del contador con ID 38



**Ilustración 62.** Estado del interior del contador con ID 33



**Ilustración 61.** Estado del filtro del contador con ID 33



**Ilustración 63.** Estado del interior del contador con ID 36



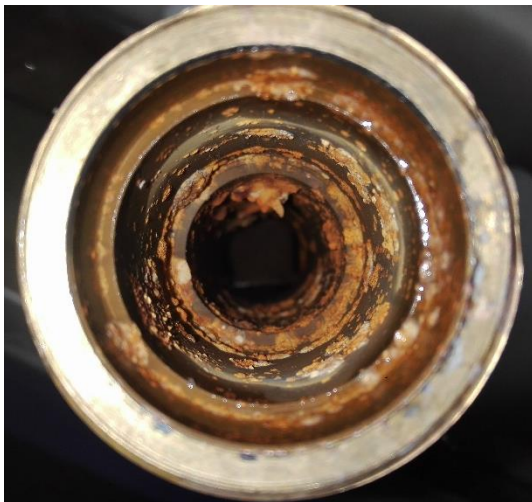
**Ilustración 64.** Estado del filtro del contador con ID 36



**Ilustración 66.** Estado del interior del contador con ID 42



**Ilustración 65.** Estado del filtro del contador con ID 42



**Ilustración 67.** Estado del interior del contador con ID 49



**Ilustración 68.** Estado del filtro del contador con ID 49

- Finalmente, se ha señalado en la Ilustración 56 con color rojo, las curvas de error de los cuatro contadores que no llegan a mejorar su comportamiento en la medición, presentando anomalías.

- a. La curva de error señalada como "a" en la Ilustración 56, está sujeta a grandes errores de medición a caudales bajos y medios (15 – 120 l/h) y, está por debajo de los límites máximos de error para el resto de caudales medios y altos (750 – 7.000 l/h). Sin embargo, a partir del caudal de ensayo de 120 l/h, la curva se encuentra dentro del doble del error máximo permitido, por lo que, podría considerarse que es una curva normal a estos caudales. Sin embargo, si uno de los consumos más frecuentes a los

que se somete este contador, es a caudales bajos o medios, la medición será siempre muy inexacta. Por lo que, se considera que el contador está deteriorado. En cuanto a su estado físico, el contador tiene un filtro sucio (Ilustración 69) y algunas incrustaciones en el interior (Ilustración 70) que no afectan a la medición.



*Ilustración 69. Estado del interior del contador con ID 55*



*Ilustración 70. Estado del filtro del contador con ID 55*

- b. El contador con ID 35 y curva de error “b”, presenta anomalías en la medición al estar sujeta a errores elevado de subcontaje durante el ensayo de caudales bajos y medios (15 – 120 l/h) y a caudales altos (3.500 – 7.000 l/h). Dado que el contador no tiene incrustaciones ni grandes sedimentos que impidan la correcta entrada del agua al mismo, se puede asociar su comportamiento a algún fallo en el acoplamiento magnético que impide la correcta contabilización a caudales altos. Normalmente, los contadores con este tipo de fallo, comienzan registrando bien a caudales medios y al llegar a caudales más altos el contador se bloquea y deja de medir por completo o realiza una medición sujeta a grandes errores de subcontaje, como es este caso.

Un fallo en el acoplamiento magnético puede ser causado por tres factores:

1. Los imanes tienen poca potencia magnética por errores en el diseño o por manipulación
  2. Existe demasiada holgura en el acoplamiento magnético por un fallo de diseño
  3. La existencia de óxido afecta al campo magnético
- c. Con el contador ID 39 y curva de error “c”, ocurre lo mismo que con el contador ID 35. El filtro se encuentra limpio y en la salida hay inicios de incrustaciones leves, sin embargo, la curva de error presenta inexactitudes elevadas en la medición a todos los

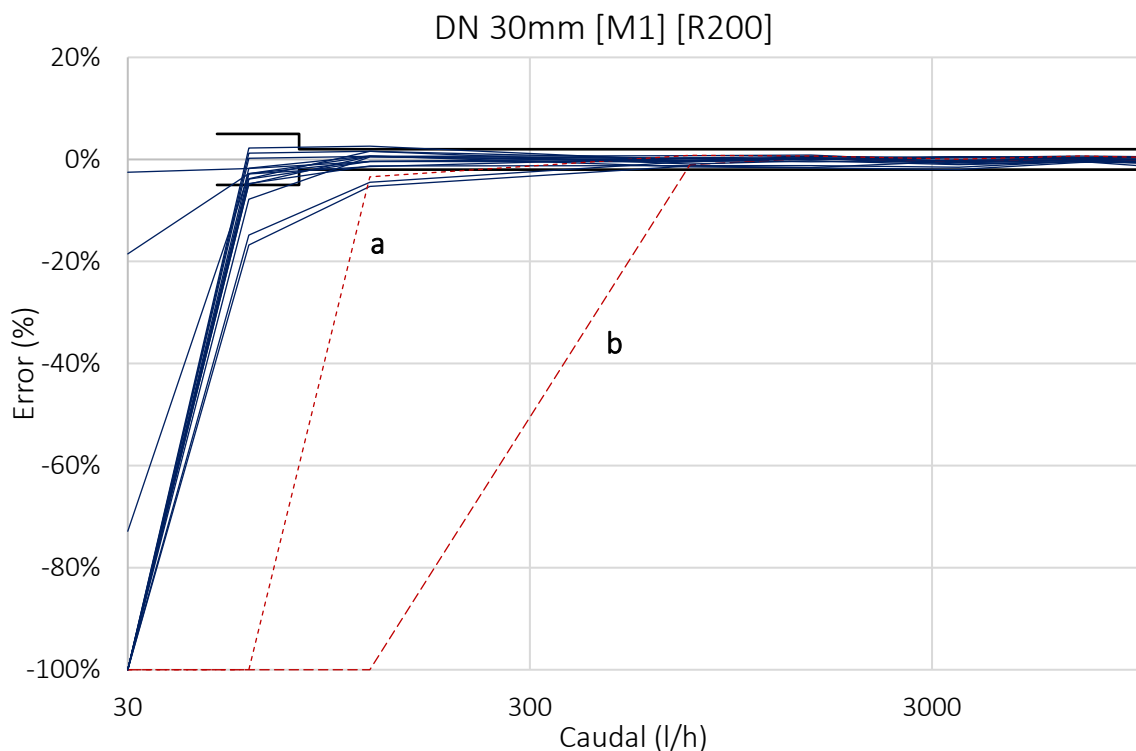
caudales, menos con el caudal de ensayo de 750 l/h. Por lo que se considera que también tiene un fallo en el acoplamiento magnético.

- d. Finalmente, el contador con ID 40 y curva de error “d”, es el que peor medición tiene, sujeto a grandes subcontaje durante todo el ensayo. Su filtro y su interior se encuentran libres de sedimentos e incrustaciones. Sin embargo, durante los ensayos se observó que el medidor de litros avanzaba y retrocedía a medida que pasaba el caudal, mientras generaba mucho ruido. Este efecto de la aguja del medidor y del ruido es un signo claro de fallo en el acoplamiento magnético del contador.

- **Contadores ensayados de diámetro 30 mm:**

- a. **Modelo 1 y clase metrológica R200:**

Se ensayan 17 contadores de este grupo con una edad media de 8,23 años.



**Ilustración 71.** Curvas de error de los contadores con DN 30mm, modelo 1 y clase metrológica R200

Todos los contadores, a excepción de dos, tienen un caudal de arranque entre 30 – 60 l/h. Y todos los contadores menos cuatro, se encuentran a partir del caudal de 30 l/h dentro de los límites de error máximos permitidos. Los contadores ID 60 y 72 se encuentran dentro de los límites a partir del caudal 60 l/h, por lo que se considera, al igual que las demás curvas, que

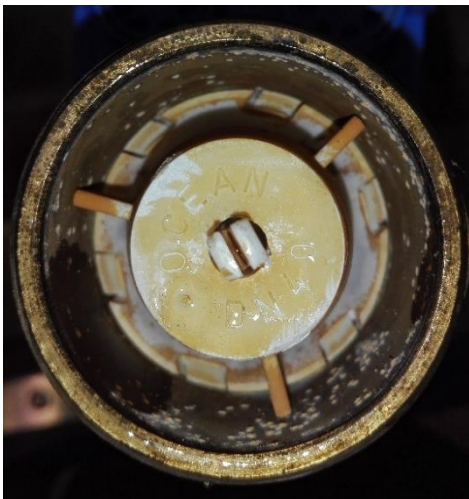
tienen un deterioro normal y una forma de la curva típica de los contadores de chorro único. A pesar de tener una medición corriente, el estado físico de algunos de ellos está deteriorado. Se puede ver en las siguientes ilustraciones como algunos contadores presentan incrustaciones y óxido tanto a la entrada como a la salida del contador y, muy probablemente, dentro del mismo. Sin embargo, estas incrustaciones no parecen afectar a la medición de este grupo de aparatos.



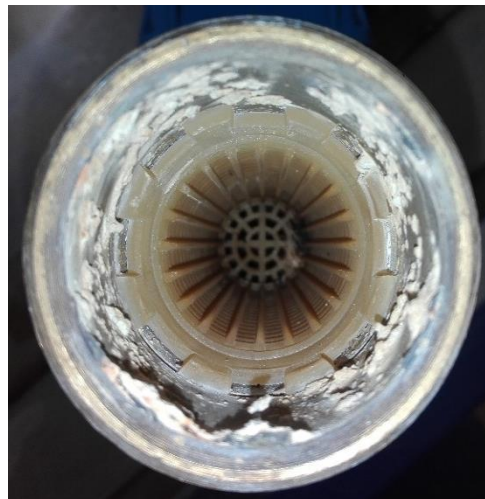
*Ilustración 73. Estado de la salida del contador con ID 62*



*Ilustración 72. Estado del filtro del contador con ID 62*

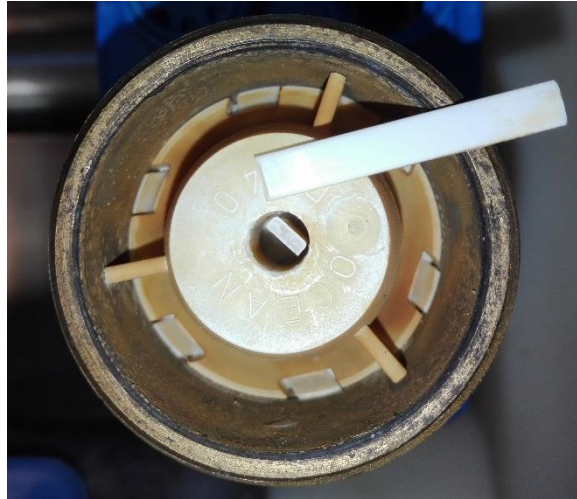


*Ilustración 74. Estado de la salida del contador con ID 68*



*Ilustración 75. Estado del filtro del contador con ID 68*

Cabe destacar que uno de los contadores ensayados en este grupo y que presenta una curva de error con un comportamiento correcto tiene, a la salida del mismo, una pieza de la válvula de retención rota, por lo que, se ha ensayado sin dicha pieza (Ilustración 76). Esto no afecta a la medición, ya que, la válvula se encuentra después de la toma de lectura del contador.



*Ilustración 76. Contador con ID 72 y una pieza de la válvula de retención rota*

De los 17 contadores ensayados en este grupo, dos (ID 70 e ID 63) presentan anomalías en sus curvas de error (“a” y “b”, respectivamente). El contador con ID 63 presenta un peor comportamiento al tener un caudal de arranque elevado, superior a 120 l/h. Y el contador ID 70 presenta un caudal de arranque superior al 60 l/h. Tras estos caudales, la curva de error se ajusta muy bien, acercándose al 0% de error. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en todos aquellos consumos a caudales bajos, generados por los usuarios de estos contadores, no se han contabilizado o han estado sujetos a grandes errores de subcontaje durante un tiempo que no se puede definir.

En cuanto al estado físico de los medidores, ambos presentan incrustaciones tanto a la salida como a la entrada del contador. Sin embargo, no se considera que esta sea la causa del deterioro anómalo, dado que los anteriores contadores descritos tienen el mismo tiempo de funcionamiento que estos y no se ven tan afectados por su estado físico. Por lo que, se asume que estos contadores han tenido un deterioro más drástico en la medición respecto a los anteriores, que podría ser causa de las condiciones en las que ambos estuvieran instalados durante su servicio y, que en este proyecto se desconocen. Como ya se ha explicado, son muchos los factores que pueden acelerar el deterioro de la medición de los contadores, como la presencia de sólidos suspendidos, el desgaste de las hélices de la turbina o la posición del contador. Por ello, se han revisado los filtros, los cuales están completamente limpios sin la presencia de sedimentos retenidos. Esto también puede llevarnos a la conclusión de que los filtros no funcionan correctamente y han dejado pasar a los sedimentos pudiendo afectar al

sistema mecánico del contador o bien que, el sistema de abastecimiento donde estaba instalado el contador no tenía presencia de sólidos suspendidos.



*Ilustración 77. Estado de la salida del contador con ID 63*

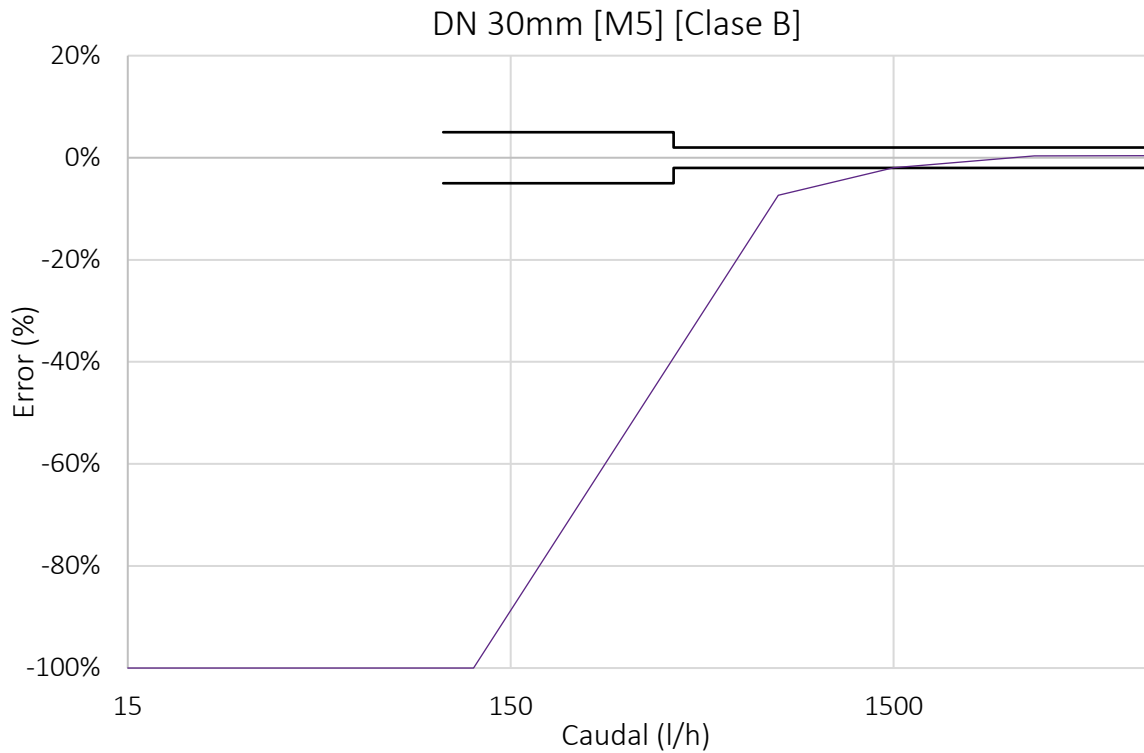


*Ilustración 78. Estado del filtro del contador con ID 63*

#### **b. Modelo 5 y clase metrológica B:**

Este es el único contador de chorro múltiple ensayado en este proyecto. El contador tiene 10 años de edad y, como se puede observar en la Ilustración 79, presenta una curva de error anómala. El caudal de arranque de los contadores de tipo chorro único suele ser alto (Arregui de la Cruz, et al., 2007). El contador ensayado con ID 73, comienza a registrar caudal a partir de los 750 l/h. Hay que tener en cuenta que la clase metrológica de este contador es inferior al resto de los contadores ensayados, por lo que, el error máximo permitido por la normativa puede darse en un mayor rango de caudales. Aun así, el error de medición está fuera de los límites máximos de error permitidos en el caudal 750 l/h y, a partir del mismo, el error es próximo al 0%.

Observando el estado físico del contador, puede verse en la Ilustración 80, como el filtro se encuentra totalmente obstruido por sedimentos de tamaño considerable. Esta puede ser la razón, por la que el contador está sometido a subcontaje, porque los sedimentos impiden el correcto paso del agua, generando una pérdida de carga que disminuye el efecto de impacto de ésta sobre la turbina del contador.



**Ilustración 79.** Curvas de error de los contadores con DN 30mm, modelo 5 y clase metrológica B



**Ilustración 80.** Estado del filtro del contador con ID 73

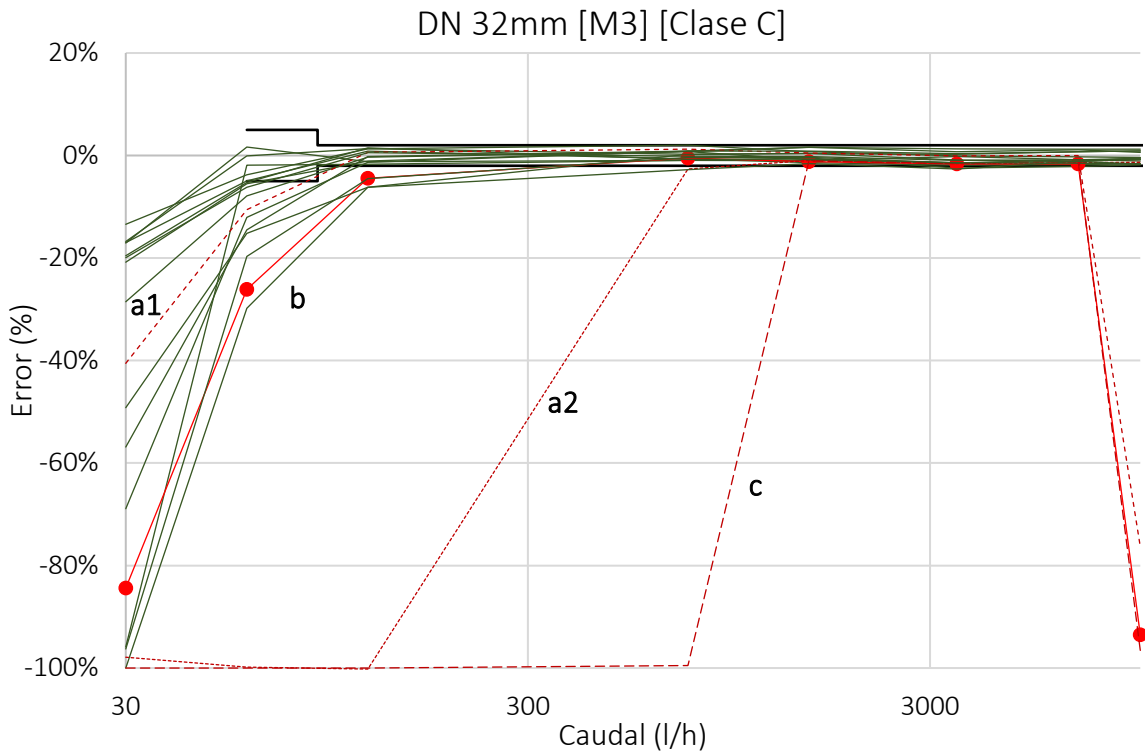


**Ilustración 81.** Estado del interior del contador con ID 73

- **Contadores ensayados de diámetro 32 mm:**

Dentro del grupo de contadores con diámetro nominal 32mm, se ensayan un total de 18 medidores con una edad media de 9,61 años.





**Ilustración 82.** Curvas de error de los contadores con DN 32mm, modelo 3 y clase metrológica C

Todos los contadores están sujetos a grandes errores de medición en el rango de caudales bajo de 30 – 60 l/h. Sin embargo, la mayoría tiene una curva estable y próxima al 0% a partir de estos caudales. A excepción de los tres contadores cuyas curvas de error se indican en rojo en la Ilustración 82.

Dentro de los contadores que funcionan dentro de los límites de error, muchos tienen el filtro parcialmente o completamente obstruido, como puede verse en la Ilustración 83. La deposición de sedimentos en el filtro, normalmente no afecta gravemente a la curva de error. Sin embargo, una presencia abundante de sedimentos puede generar grandes pérdidas de carga y generar subcontaje en la medición.



*Ilustración 83. Estado del filtro del contador con ID 74*

Los tres contadores cuyas curvas de error aparecen en rojo en la Ilustración 82, por anomalías en su comportamiento. Están sujetos a grandes errores de subcontaje e incluso, muchas veces, no realizan ninguna medición. La causa de esto es que todos tienen problemas en el acoplamiento magnético.

- a. El contador con ID 79 y curva “a” se ensayó por primera vez y no medía a caudales altos (curva “a1”) porque el bloqueo del acoplamiento magnético impedía el giro de la turbina. Tras repetir el ensayo, el contador empezó a medir a caudales altos de forma correcta (curva “a2”), seguramente porque se desbloqueó el efecto anterior. Por otro lado, en ambos ensayos los contadores tienen grandes errores de medición a caudales bajos. A pesar de que, en el segundo ensayo el contador acabara midiendo bien, hay que tener especial cuidado, pues puede volver a bloquearse la medición en cualquier momento. En cuanto al estado físico del contador, tiene algunas incrustaciones a la salida y el filtro se encuentra libre de sedimentos.
- b. El contador con ID 86 y curva “b” presenta una curva normal durante todo el ensayo hasta llegar al caudal de sobrecarga (caudal 10.000 l/h), en el cual, la curva de error cae en un gran subcontaje. Observando el estado físico del contador, se encontró que la carcasa del totalizador estaba llena de agua, lo que indica que existe una fuga interior causada por una manipulación o error en el diseño del contador.
- c. El contador con ID 87 y curva “c” no mide a caudales bajos porque no se ha podido ensayar a estos. La aguja del medidor de litros se encuentra rota y no realiza ninguna medición (Ilustración 84). Por otro lado, el contador deja de medir al máximo caudal

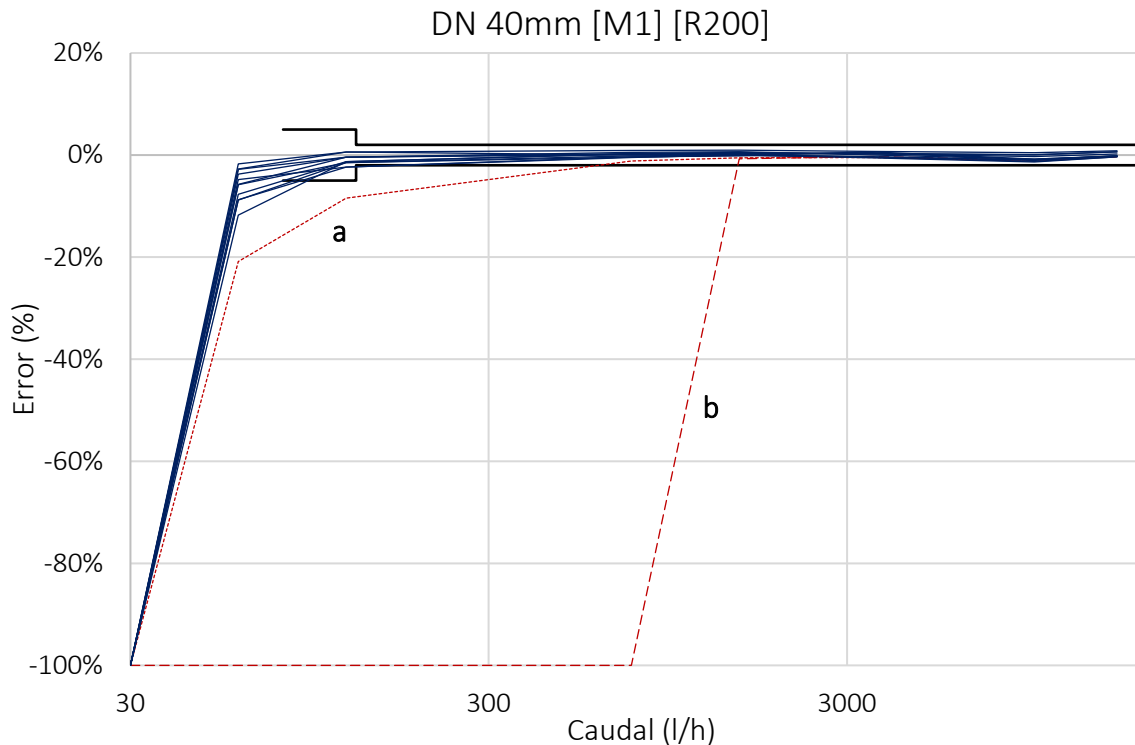
debido a un error en el acoplamiento magnético, al igual que ocurre con los anteriores contadores de este grupo.



*Ilustración 84. Aguja del medidor de litros rota del contador con ID 87*

- **Contadores ensayados de diámetro 40 mm:**
  - a. **Modelo 1 y clase metrológica R200:**

Dentro de este grupo se han ensayado 13 contadores con una edad media de 7,08 años. Todos los contadores, a excepción de uno, tienen un caudal de arranque entre 30 – 60 l/h. Y la gran mayoría presenta una curva de error dentro de los límites de error máximos permitidos. En general, los filtros de los contadores están limpios, menos algunos que presentan restos de polietileno de tuberías en mayor o menor cantidad dependiendo del contador. Pero ninguna curva de los mismos, se ve afectada por los sólidos que ha retenido el filtro. En la Ilustración 85 se puede observar como la curva “a” tiene un error de medición superior al doble del error máximo permitido a caudal 60 l/h. Sin embargo, con el ensayo de los siguientes caudales comienza a tener un comportamiento totalmente normal sin estar fuera de los límites marcados por la normativa. Además, su estado físico es bueno, sin la presencia de incrustaciones ni obstrucción del filtro. Por ello, se considera que tiene una degradación de la curva de error normal, aunque un poco más evolucionada respecto al resto.

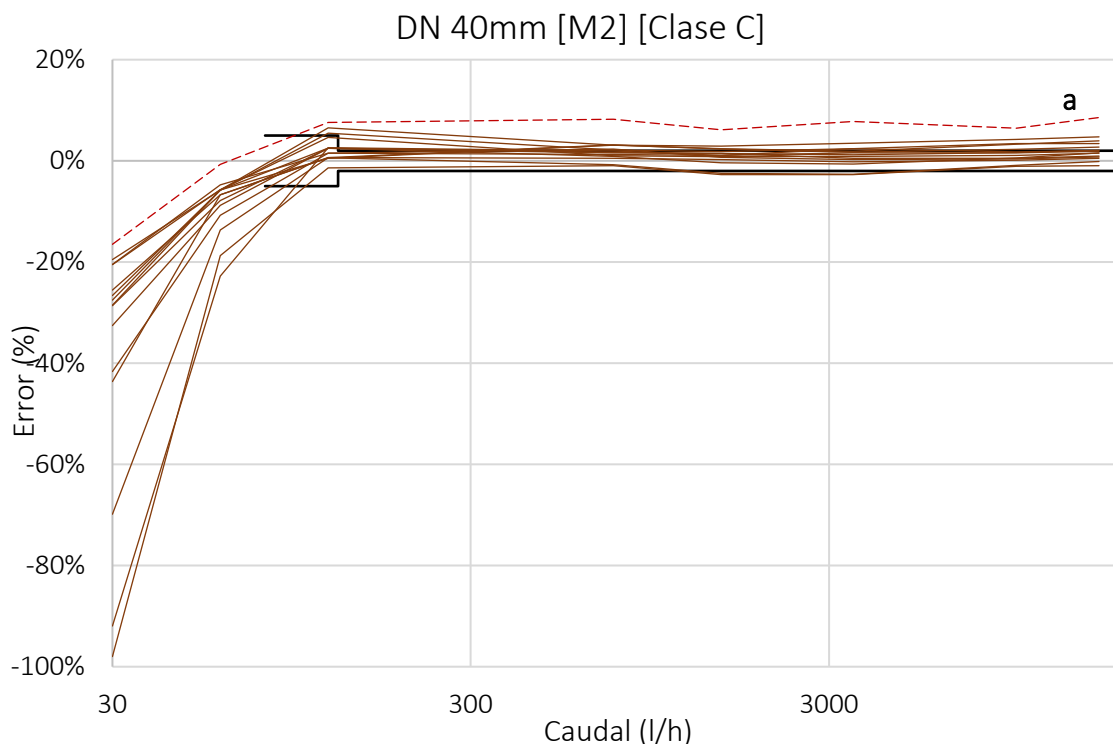


**Ilustración 85.** Curvas de error de los contadores con DN 40mm, modelo 1 y clase metrológica R200

En cuanto a la curva “b”, esta es la única que presenta anomalías dentro de este grupo. El contador tiene un caudal de arranque próximo a 1.500 l/h, lo cual es elevado y no es normal en este tipo de contadores. A partir de dicho caudal, la curva se estabiliza dentro de los errores máximos permitidos. Este comportamiento supone un problema para la empresa suministradora, ya que todos aquellos caudales que consume el usuario por debajo del caudal de arranque del contador, no serán registrados y, por lo tanto, no serán facturados y cobrados al cliente.

**b. Modelo 2 y clase metrológica C:**

Dentro de este grupo, se han ensayado 15 contadores con una edad media de 9,40 años. En general, todos los contadores tienen un comportamiento de la curva de error correcto, respetando los límites de error máximos permitidos. En cuanto al estado físico de los mismos, muchos tienen incrustaciones (Ilustración 87) y algunos sedimentos en el filtro que no suponen ninguna alteración ni importancia en la medición.



**Ilustración 86.** Curvas de error de los contadores con DN 40mm, modelo 2 y clase metrológica C

Por el contrario, el contador con ID 106 y curva de error “a”, está sujeto a errores de sobrecontaje a lo largo de todo el ensayo. Estudiando su estado físico, se ha encontrado que está totalmente cubierto por incrustaciones en su interior (Ilustración 88). Estas incrustaciones pueden ser las causantes del sobrecontaje al que se somete, ya que, su presencia puede alterar el giro de la turbina haciendo que este sea superior y el contador contabilice más agua de la que realmente está pasando.



**Ilustración 88.** Estado del interior del contador con ID 106



**Ilustración 87.** Estado del interior del contador con ID 105 retirando su filtro

En el Anexo 10.3 de la memoria se adjunta una tabla con el estado físico de cada uno de los contadores ensayados y se les asigna un número de identificación (ID + nº)

#### *5.4.2 Afecciones a la medición*

Finalmente, con el análisis realizado en el anterior apartado, se ha podido observar cómo algunos factores físicos de los contadores pueden alterar su medición.

En los casos de sobrecontaje, la mayor causa suele recaer en la presencia de grandes cantidades de incrustaciones en el interior del contador. Las cuales, alteran la entrada del caudal haciendo que impacte con mayor energía en las aspas de la turbina y haciendo que esta gire más veces de la que debería y que, por lo tanto, aumente el volumen totalizado del contador. Este problema afectaría directamente a la factura de los consumidores, aumentando el coste de la misma al facturar más agua de la que realmente están consumiendo.

Por otro lado, se ha podido observar como un filtro parcialmente obstruido o poco obstruido por sedimentos, no supone ningún problema grave en la medición. Sin embargo, un filtro completamente obstruido puede dar lugar a errores de subcontaje. En este caso, el agua al pasar por el filtro obstruido sufriría una pérdida de carga importante haciendo que el impacto con la turbina sea menor y que el contador contabilice menos agua de la que realmente está circulando. Además, parte de los sedimentos pueden entrar en el interior del contador y degradar las piezas móviles. Ambos casos afectarían a las empresas suministradoras, al inyectar al sistema más agua de la que realmente están facturando a los clientes.

Otro factor que provoca el subcontaje en la medición y que afecta a las empresas, es la manipulación de los contadores, las cuales tienen por finalidad hacer que el contador registre menos agua de la que circula para que las facturas sean más económicas. También, se ha podido ver como un fallo en el acoplamiento magnético de los contadores supone un gran inconveniente para las entidades, ya que, un fallo de este sistema supone la medición nula o casi nula incluso de caudales altos. Este tipo de problema, como ya se explicó, puede darse por un fallo de diseño del contador o por una manipulación.

Con todo esto, se ha considerado que los contadores con mayor sensibilidad a la presencia de incrustaciones y, por lo tanto, a la aparición de sobrecontaje en la curva de error, son los

contadores de mayor diámetro (DN 40mm) pertenecientes al Modelo 2. También se ha observado, que los contadores del Modelo 1 con diámetros mayores a 20mm, son los que mayores errores de subcontaje presentan a caudales bajos. Y como el resto de modelos tienen un caudal de arranque inferior al que presentan estos contadores. Por último, se observa que los contadores que más sufren fallos en el acoplamiento magnético son los contadores del Modelo 3. Y como estos mismos contadores, están más sujetos a errores de medición negativos, aunque muchos de ellos próximos al 0%.

## 5.5 Determinación del error global de los contadores

El cálculo del error global es fundamental para estimar el ritmo de deterioro de los contadores. Se define como el ratio que permite conocer la eficiencia de los contadores para un tipo de usuario determinado, dándonos información sobre el volumen de agua que un contador no llega a registrar. Y se calcula como la media ponderada de los errores de medición que presentan los contadores a diferentes caudales de ensayo considerando el porcentaje de agua que se consume a cada caudal. Por lo tanto, para su cálculo es necesario estudiar los siguientes aspectos:

- ***La curva de error de los contadores:***

La curva de error de los contadores nos permite conocer el error de medición que tienen los contadores a unos caudales determinados (Tabla 31). En el “Apartado 5.4” se exponen las curvas de error de los contadores ensayados en este trabajo y, en el Anexo 10.2 se muestran los valores de error para cada caudal de ensayo.

- ***El patrón de consumo de los usuarios:***

El patrón de consumo aporta información sobre el porcentaje de agua que se consume dentro de cada rango de caudales. Como ya se ha explicado, un mismo contador puede estar sometido a diferentes errores de medición según el tipo de usuario al que se destine y según el caudal que pasa a través del mismo. Por ello, es importante conocer la frecuencia con la que los usuarios del abastecimiento consumen los diferentes caudales a los que se ensayan los contadores y tener en cuenta este parámetro dentro del cálculo del error global de los contadores.

El proceso de adquisición de los datos del patrón de consumo puede llegar a ser complicado sino se disponen de los medios adecuados. Para el caso de contadores de pequeño calibre, existen una serie de curvas publicadas por diferentes autores para tener información típica sobre el patrón de consumo de los usuarios domésticos. Sin embargo, estas curvas no son extrapolables a patrones de consumo de grandes consumidores, ya que, estos deben estudiarse de forma individual al no seguir un comportamiento habitual entre ellos. Los grandes consumidores no se rigen por una demanda similar entre ellos, sino que cada uno, dependiendo del uso final al que destinen el agua consumida, contempla una frecuencia de consumos normalmente diferente.

En este trabajo no se tiene constancia real del patrón de consumo de los usuarios que le corresponde a cada contador ensayado, por lo que, se ha creado la Tabla 35. En ella, se le asigna a cada caudal ensayado ( $Q_n$ ) un peso establecido según el diámetro del contador. Este peso representa la frecuencia con la que cada caudal es consumido por un determinado tipo de usuario, en este caso, grandes consumidores. Se considera que, a mayor diámetro, mayor será la frecuencia de consumo a caudales altos. Por ejemplo, para contadores de diámetro 20 mm, el caudal al que más se consume es el  $Q_5=750$  (l/h). Mientras que para diámetro 40 mm, el caudal al que más se consume es el  $Q_6=3.500$  (l/h).

Además, se ha considerado que, al ser grandes consumidores, la frecuencia de consumo a caudales bajos es insignificante respecto al consumo de caudales mayores, estimando que lo más frecuente en las industrias, comercios o riego son caudales entre 750-3.500 l/h, dependiendo del diámetro del contador.

**Tabla 35.** Pesos de cada caudal de ensayo según el diámetro del contador (\*)

Diámetro (mm)	Peso $Q_1$ (%)	Peso $Q_2$ (%)	Peso $Q_3$ (%)	Peso $Q_4$ (%)	Peso $Q_5$ (%)	Peso $Q_6$ (%)	Peso $Q_7$ (%)	Peso $Q_8$ (%)
20	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
25	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
30	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
32	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
40	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%

(\*) Los caudales " $Q_n$ " que aparecen en la Tabla 35, son los caudales definidos en la Tabla 34 de esta memoria.



Finalmente, teniendo el error de medición de los contadores y la frecuencia de consumo de los usuarios a cada caudal ensayado, se calcula el error global como la suma de los productos de ambos parámetros:

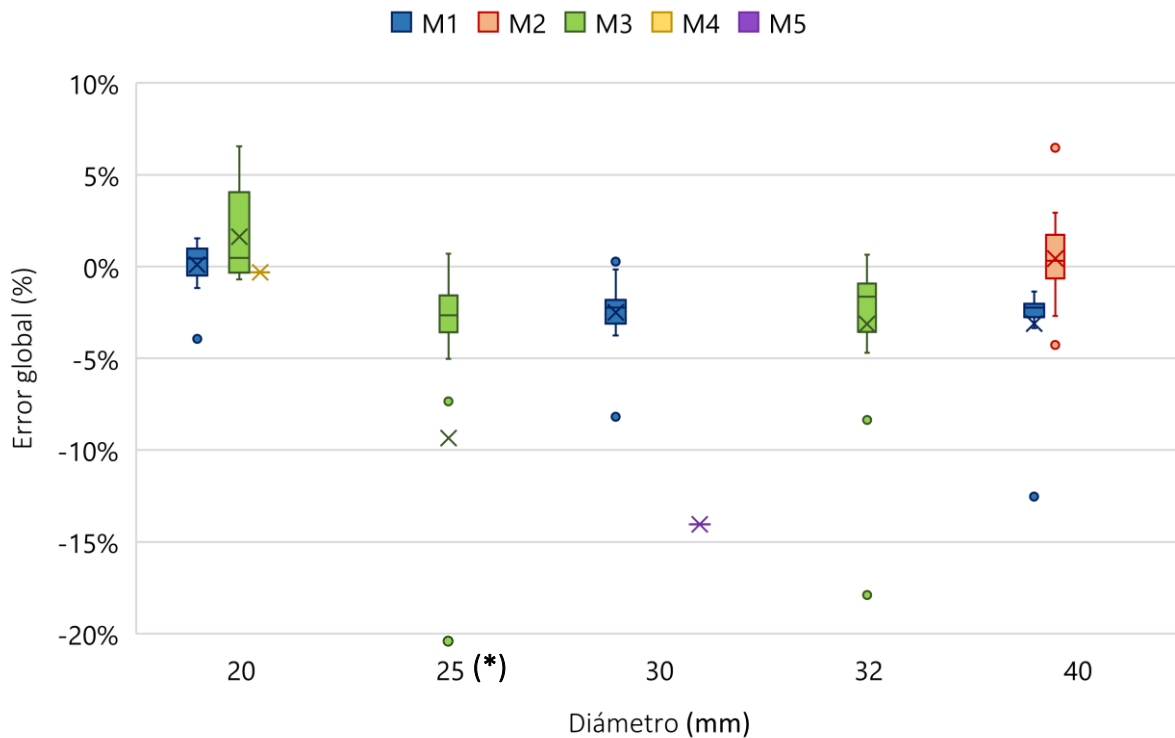
$$\varepsilon_{global} = \sum \varepsilon * Peso(Q_n) \quad (47)$$

Donde:

- $\varepsilon_{global}$ : es el error global o error medio ponderado de cada contador (%)
- $\varepsilon$ : error de medición de los contadores (%)
- $Peso(Q_n)$ : peso que tiene cada caudal en el abastecimiento según la Tabla 35 (%)

### 5.5.1 Resultados del error global de los contadores

En el Anexo 10.2 se muestra el error global obtenido de cada uno de los contadores ensayados. Y a continuación, se adjunta un diagrama de caja y bigotes con los resultados de error global de los contadores, separados por diámetro y modelo.



**Ilustración 89.** Diagrama caja y bigotes de la relación entre el error global y diámetro de cada modelo de contador

*(\*) El punto verde fuera del gráfico representa a tres contadores de diámetro 25mm y M3 cuyo error global es superior al -20%. Se han dejado fuera del rango únicamente para conseguir una mayor resolución del diagrama. En este proyecto, se ha tenido en cuenta en el gráfico y en el cálculo del ritmo del deterioro todos los resultados obtenidos sean típicos o no, ya que, todos representan una situación real que puede darse durante la vida en funcionamiento de un contador.*

En el gráfico se puede ver como los modelos M1 y M3 con DN 20mm y el modelo M2 con DN 40mm, presentan un mayor número de contadores con errores positivos, por lo que, cabe esperar que su ritmo de deterioro también sea positivo. Anteriormente, se explicó que los contadores pueden estar sujetos a subcontaje por la aparición de grandes cantidades de incrustaciones en el interior de los mismos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en el proyecto no se tiene constancia del valor del error inicial al que están sujetos los contadores y que, si este es diferente del 0%, el resultado de error global puede disminuir.

También se puede observar como de los M4 y M5 sólo se ha ensayado un contador de cada. El contador correspondiente al M4 tiene un error global muy aceptable, sujeto a subcontaje y cerca del 0%. Sin embargo, el contador del M5 está sujeto a un gran error de subcontaje reflejando un comportamiento anómalo. Además, el gráfico muestra como el M3 con DN 25mm y 32mm, son el grupo de contadores con mayor número de incidencias sujetas a subcontaje. Como ya se explicó, estas incidencias están relacionadas con fallos del acoplamiento magnético de los contadores. Por otro lado, que su error global sea negativo se debe al efecto que tiene la obstrucción del filtro en la medición de estos contadores.

En cuanto a los contadores pertenecientes al M1 con DN 30mm y 40mm, presentan una medición sujeta a errores negativos porque estos contadores no miden bien a caudales bajos. Sin embargo, la medición del resto de caudales es muy exacta, por ello, en el diagrama no se alejan demasiado del 0% del error global y no superan el -5%. A excepción de dos contadores en los que se ha identificado fallos en el acoplamiento magnético.

### 5.5.2 Ficha técnica

Para un mejor manejo y estudio de los resultados obtenidos de cada contador, se ha creado una ficha técnica que recoge todos los datos de interés de los contadores, los resultados de los ensayos y el cálculo de los errores globales para una mejor comparación de los resultados.

**Tabla 36. Ficha técnica de los contadores ensayados y sus resultados**

Nº contador	Ronda de ensayo	Id contador	Fabricante	Modelo	Tipo de contador	Año fabricación	Fecha ensayo	...
1	1º	a	F1	M1	Chorro único	2010	04/12/2017	...
2	2º	b	F2	M2	Chorro único	2011	04/12/2017	...

Edad del contador	Clase metrológica	$Q_{\text{permanente}} (Q_3/Q_n)$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{\text{mínimo}} (Q_1)$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{\text{transición}} (Q_2)$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{\text{sobrecarga}} (Q_4)$ (m <sup>3</sup> /h)	Diámetro (mm)	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
7	200	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	5.938
6	200	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	4.861

Error $Q_1$ (%)	Error $Q_2$ (%)	Error $Q_3$ (%)	Error $Q_4$ [%]	Error $Q_5$ (%)	Error $Q_6$ (%)	Error $Q_7$ (%)	Error $Q_8$ (%)	Error Medio Ponderado o Error Global (%)
-2,71%	-0,96%	-0,60%	-0,40%	1,71%	2,03%	2,00%	1,73%	1,53%
-7,54%	-1,56%	0,10%	1,09%	0,59%	1,48%	1,59%	1,50%	0,82%

$Q_1$ (l/h)	$Q_2$ (l/h)	$Q_3$ (l/h)	$Q_4$ (l/h)	$Q_5$ (l/h)	$Q_6$ (l/h)	$Q_7$ (l/h)	$Q_8$ (l/h)
15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000
15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000

...	Peso $Q_1$ (%)	Peso $Q_2$ (%)	Peso $Q_3$ (%)	Peso $Q_4$ (%)	Peso $Q_5$ (%)	Peso $Q_6$ (%)	Peso $Q_7$ (%)	Peso $Q_8$ (%)
...	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
...	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%

### 5.6 Determinación de la degradación del error global de los contadores

Una vez se tiene el error global de cada contador, se puede calcular el ritmo de deterioro o degradación de dicho error. Lo interesante es estimar un ritmo de deterioro estándar para cada modelo de contador y diámetro, de manera que, al calcular la vida útil de los contadores,

únicamente sea necesario saber estos dos datos para asignar el ritmo al que se deterioran los medidores. Por ello, en primer lugar, se ha calculado el promedio de los errores globales para cada modelo de contador y diámetro (Tabla 37). También, se ha calculado el promedio de las edades de los contadores según su modelo y diámetro (Tabla 38). Finalmente, se ha calculado el ritmo de deterioro o degradación con la fracción de estos dos valores (Ecuación 48) y, se muestran los resultados en la Tabla 39.

$$\text{Ritmo Deterioro} = \frac{\text{Promedio Error Global} \left( \frac{\%}{\text{año}} \right)}{\text{Promedio Edad}} \quad (48)$$

**Tabla 37.** Errores globales promedio según el modelo de contador y su diámetro (%)

Modelo	Diámetro nominal (mm)				
	20	25	30	32	40
M1	0,10%	-	-2,49%	-	-3,12%
M2	-	-	-	-	0,44%
M3	1,63%	-9,35%	-	-3,46%	-
M4	-0,31%	-	-	-	-
M5	-	-	-14,04%	-	-

**Tabla 38.** Edad promedio según el modelo de contador y su diámetro (año)

Modelo	Diámetro nominal (mm)				
	20	25	30	32	40
M1	7,48	-	8,24	-	7,08
M2	-	-	-	-	9,40
M3	11,17	9,63	-	9,61	-
M4	1,00	-	-	-	-
M5	-	-	10,00	-	-

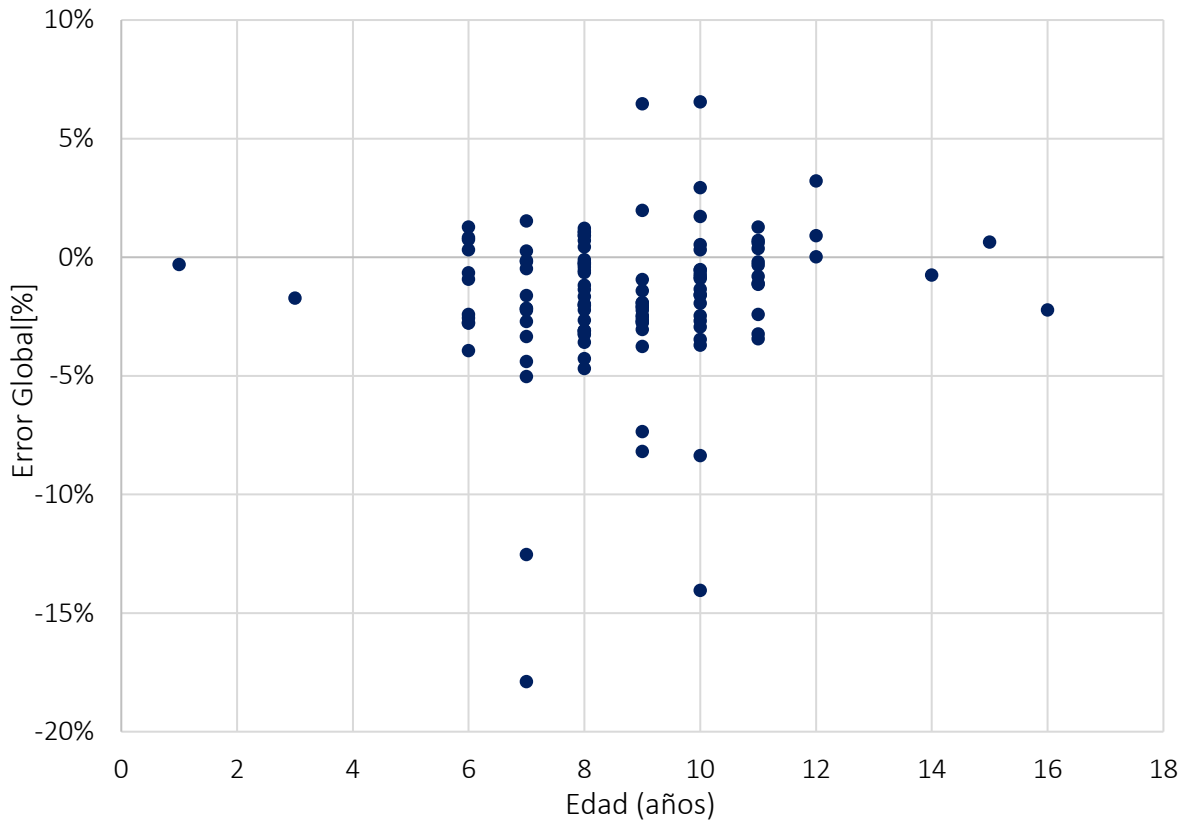
**Tabla 39.** Degradación del error o ritmo de deterioro (Error global/Edad) según el modelo de contador y su diámetro, suponiendo un error inicial del 0% (%/año)

Modelo	Diámetro nominal (mm)				
	20	25	30	32	40
M1	0,01%	-	-0,30%	-	-0,44%
M2	-	-	-	-	0,05%
M3	0,15%	-0,97%	-	-0,36%	-
M4	-0,31%	-	-	-	-
M5	-	-	-1,40%	-	-

Con los resultados de degradación mostrados en la Tabla 39 se pueden analizar diferentes situaciones como:

- Para los Modelos 4 y 5 sólo se ha ensayado un contador de cada, por lo que, no se puede tomar el resultado obtenido como ritmo de deterioro estándar. Aun así, se ha decidido no despreciar estos contadores porque, como ya se explicó, en este proyecto sólo se pretende aportar datos iniciales sobre la degradación de la medición de los contadores de mediano calibre, siendo necesario el ensayo de más contadores para todos los modelos y diámetros. En cuanto a sus resultados, el Modelo 4 de DN 20mm es el contador de tipo volumétrico y, presenta un ritmo negativo porque la curva de error de este tipo de contadores suele estar sujeta a subcontaje. En cambio, el Modelo 5 de DN 30mm perteneciente al contador de tipo chorro múltiple, tiene un ritmo negativo porque el contador durante el ensayo no media a caudales bajos y presentaba anomalías en la curva de error.
- El grupo de contadores que presenta mayor ritmo de deterioro negativo, excluyendo el resultado del Modelo 5, son los contadores pertenecientes al Modelo 3 y diámetro nominal 25mm. Esto se debe a que la mayoría de contadores tienen un comportamiento de la curva de error normal, dentro de los límites de error máximos permitidos, pero siempre por debajo del 0%. Además, algunos contadores dejaban de medir por errores del acoplamiento magnético.
- El grupo de contadores que presenta mayor ritmo de deterioro positivo, es el grupo pertenecientes al Modelo 3 de diámetro nominal igual a 20mm, ya que, muchos de ellos se vieron afectados por las incrustaciones.
- Los grupos de contadores que presentan menor ritmo de deterioro, son los grupos de los Modelos 1 y 3 con DN 20mm, ya que, tienen una muy buena medición tanto a caudales bajos como medios y altos. Y el grupo del Modelo 2 y DN 40mm, respecto al resto de modelos para este diámetro, realiza una medición a caudales bajos poco sujeta a errores elevados de medición.
- Finalmente, los contadores del Modelo 3 y DN 32mm, tienen un ritmo de deterioro negativo debido a que, son los contadores que presentaron una mayor cantidad de fallos por mal acoplamiento magnético, dando lugar a una disminución de la medición en el ensayo de muchos caudales.

En términos generales, la Ilustración 90 recoge la relación existente entre la edad de los contadores y su error global obtenido, reflejando como a mayor edad o mayor tiempo en funcionamiento el error global aumenta.



**Ilustración 90.** Relación entre el error global y la edad del contador

Cabe destacar, que los ritmos de deterioro obtenidos anteriormente, se han calculado suponiendo un error inicial igual al 0%. En la realidad, todos los contadores están sujetos a un error de medición inevitable que se calcula en la calidad de recepción de los contadores.

La empresa Aguas de Valencia/Global Omnium, ha facilitado los datos de error obtenidos en la calidad de recepción de dos de los modelos de contadores. Estos datos se muestran en las siguientes tablas:

**Tabla 40.** Error inicial de los contadores del M1 obtenido en el control de calidad realizado en el laboratorio de Aguas de Valencia/Global Omnium

Modelo	Calibre	Caudal de ensayo [l/h]				$\epsilon_i$ promedio
		80	128	16000	20000	
M1	40	-0,16%	0,18%	0,06%	0,27%	<b>0,09%</b>

**Tabla 41.** Error inicial de los contadores del M3 obtenido en el control de calidad realizado en el laboratorio de Aguas de Valencia/Global Omnium

Modelo	Calibre	Caudal de ensayo [l/h]					E <sub>i</sub> promedio
		50	80	800	5000	10000	
M3	30	-0,75%	0,62%	0,78%	0,48%	1,66%	<b>0,56%</b>

Con el promedio de estos errores iniciales, se puede calcular una aproximación de cómo varía el ritmo de deterioro teniendo en cuenta que el error no parte del 0%. Para ello, se le resta al promedio del error global de los contadores usados el promedio del error inicial (Tabla 42) y se recalcula el ritmo de deterioro teniendo en cuenta el nuevo error global promedio (Tabla 43).

**Tabla 42.** Error global promedio de los contadores del M1y3 teniendo en cuenta el error inicial diferente al 0%

Modelo	Diámetro nominal [mm]				
	20	25	30	32	40
M1	-0,01%	-	-2,58%	-	-3,20%
M3	1,07%	-9,91%	-	-4,02%	-

**Tabla 43.** Ritmo de deterioro de los contadores del M1y3 teniendo en cuenta el error inicial diferente al 0%

Modelo	Diámetro nominal [mm]				
	20	25	30	32	40
M1	-0,002%	-	-0,31%	-	-0,45%
M3	0,10%	-1,03%	-	-0,42%	-

Se puede apreciar como el ritmo de deterioro disminuye porque al tener en cuenta el error inicial distinto del 0%, el error global del contador disminuye su valor.

A continuación, se muestra como datos de interés, el promedio de los volúmenes totalizados por los contadores a lo largo de sus vidas útiles (Tabla 44), para calcular cómo se degrada la medición según el volumen que han acumulado, es decir, según el uso al que se ha sometido el contador (Tabla 45).

Se puede observar en la Tabla 45 como cuanto mayor sea el error y menor el volumen registrado por los contadores, mayor será la degradación. Esto quiere decir que un contador, aunque se utilice poco, puede estar sometidos a grandes errores de medición y, por lo tanto, deteriorarse más rápido. Por el contrario, cuanto menor sea el error y mayor el volumen, menor será el ritmo de deterioro, ya que, aunque se utilice mucho el contador está sujeto a errores bajos de medición.

**Tabla 44.** Volúmenes totalizados promedios según el modelo de contador y su diámetro (m<sup>3</sup>)

Modelo	Diámetro nominal (mm)				
	20	25	30	32	40
M1	4.506,88	-	15.427,48	-	11.573,04
M2	-	-	-	-	23.576,01
M3	5.041,90	14.023,77	-	25.076,76	-
M4	18,56	-	-	-	-
M5	-	-	23.215,91	-	-

**Tabla 45.** Degradación de la medición según el volumen que han registrado los contadores (%/1000m<sup>3</sup>) (\*)

Modelo	Diámetro nominal (mm)				
	20	25	30	32	40
M1	0,02%	-	-0,16%	-	-0,27%
M2	-	-	-	-	0,02%
M3	0,32%	-0,67%	-	-0,14%	-
M4	-16,81%	-	-	-	-
M5	-	-	-0,60%	-	-

(\*) En este cálculo sólo se ha tenido en cuenta el error global de los contadores partiendo del error inicial igual al 0%.

Finalmente, se ha estimado el consumo medio anual de los diferentes modelos de contadores ensayados, dividiendo el promedio del volumen totalizado por los mismos entre el promedio de la edad. Los resultados de consumos son de utilidad para el desarrollo del “Apartado 6”.

$$\text{Consumo anual} = \frac{\text{Promedio Volumen Totalizado}}{\text{Promedio Edad}} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) \quad (49)$$

Comparando la Tabla 46 con la Tabla 39, se puede observar como a mayor consumo, mayor es la degradación de los contadores (DN 25, 30, y 32). A excepción del Modelo 2 y DN 40mm, los cuales tienen un consumo elevado y una degradación insignificante. Esto ocurre porque este grupo de contadores ensayados tiene errores de medición muy bajos y positivos.

**Tabla 46.** Consumos medios anuales (Volumen totalizado/Edad) según el modelo de contador y su diámetro (m<sup>3</sup>/año)

Modelo	Diámetro nominal (mm)				
	20	25	30	32	40
M1	602,83	-	1.873,34	-	1.635,32
M2	-	-	-	-	2.508,09
M3	451,51	1.456,31	-	2.609,14	-
M4	18,56	-	-	-	-
M5	-	-	2.321,59	-	-



## 6 EJEMPLO DE APLICACIÓN (CONTADORES MEDIANO CALIBRE)

### 6.1 Estimación de la vida útil de los contadores de mediano calibre

El desarrollo de este apartado tiene como objetivo estimar una vida útil estándar para cada modelo y diámetro de contador ensayado. Para ello, se elige una serie de datos descritos en el siguiente apartado y, se calcula la vida útil de los mismos siguiendo el procedimiento descrito en el “Apartado 2.3”.

#### 6.1.1 Datos de partida

Para calcular la vida útil estándar de los diferentes modelos de contadores, se ha elegido una serie de datos estándar para cada tipo de contador.

En primer lugar, se han fijado los costes que influyen en el cálculo de la vida útil de los contadores: los costes iniciales y la tarifa del agua.

Por un lado, los costes iniciales (adquisición, instalación y administración) se han asignado dependiendo del diámetro del contador, a mayor diámetro mayores serán los costes (Tabla 47). Además, se ha considerado los mismos precios para los diámetros de 30mm y 32mm.

Por otro lado, el precio del metro cúbico de agua elegido es de **0,85 €/m<sup>3</sup>** para todos los modelos, independientemente del uso al que se destinen y de su diámetro.

*Tabla 47. Costes iniciales estándar según el diámetro del contador*

DN (mm)	Coste de adquisición (€)	Coste de instalación (€)	Coste de administración (€)
20	24 €	20 €	2€
25	45 €	25 €	2€
30/32	55 €	30 €	2€
40	75 €	85 €	2€

En segundo lugar, se ha elegido una serie de datos graduales sobre el consumo medio anual de los usuarios (**1.000 a 2.800 m<sup>3</sup>/año**) y el ritmo al que se deterioran los contadores (**-0,10% a -1,30%**).

Finalmente, se generan unas tablas con los resultados de vida útil correspondiente a cada dato de la serie elegida y para cada diámetro de contador. Posteriormente, se busca en las tablas la vida útil correspondiente a cada modelo y diámetro de contador. Para ello, se coge el

consumo medio anual, perteneciente al modelo de contador a buscar, de la Tabla 46. Y el ritmo de deterioro obtenido para cada modelo (Tabla 39).

Sólo se calculará la vida útil de aquellos modelos cuyo ritmo de deterioro sea negativo, ya que, son estos los que están sujetos a errores de subcontaje y los que generan un mayor número de pérdidas económicas a la empresa gestora.

### 6.1.2 Resultados obtenidos

A continuación, se exponen las tablas con los resultados de vida útil estándar para cada diámetro ensayado. Y, se señala dentro de cada una la vida útil que tienen los diferentes modelos y diámetros ensayados.

- **DN 20mm:**

**Tabla 48.** Vida útil estándar para contadores con DN 20mm

Ritmo (%/año)	Consumo (m <sup>3</sup> /año)						
	1.000	1.300	1.600	1.900	2.200	2.500	2.800
-0,10%	10,40	9,12	8,22	7,55	7,01	6,58	6,22
-0,20%	7,36	6,45	5,82	5,34	4,96	4,65	4,40
-0,30%	6,01	5,27	4,75	4,36	4,05	3,80	3,59
-0,40%	5,20	4,56	4,11	3,77	3,51	3,29	3,11
-0,50%	4,65	4,08	3,68	3,38	3,14	2,94	2,78
-0,60%	4,25	3,73	3,36	3,08	2,86	2,69	2,54
-0,70%	3,93	3,45	3,11	2,85	2,65	2,49	2,35
-0,80%	3,68	3,23	2,91	2,67	2,48	2,33	2,20
-0,90%	3,47	3,04	2,74	2,52	2,34	2,19	2,07
-1,00%	3,29	2,89	2,60	2,39	2,22	2,08	1,97
-1,10%	3,14	2,75	2,48	2,28	2,11	1,98	1,87
-1,20%	3,00	2,63	2,37	2,18	2,02	1,90	1,79
-1,30%	2,89	2,53	2,28	2,09	1,95	1,82	1,72
-1,40%	2,78	2,44	2,20	2,02	1,87	1,76	1,66

El único modelo de contador con diámetro igual a 20mm y ritmo de deterioro negativo es el M4. Sin embargo, no se puede estimar la vida útil estándar de este modelo porque sólo se ha podido ensayar un contador del mismo. Aun así, se ha calculado la Tabla 48 para aportar datos del tiempo óptimo de reemplazo de contadores de mediano calibre con DN 20mm.

- **DN 25mm:**

**Tabla 49. Vida útil estándar para contadores con DN 25mm**

Ritmo (%/año)	Consumo (m <sup>3</sup> /año)						
	1.000	1.300	1.600	1.900	2.200	2.500	2.800
-0,10%	13,02	11,42	10,29	9,44	8,78	8,23	7,78
-0,20%	9,20	8,07	7,28	6,68	6,21	5,82	5,50
-0,30%	7,51	6,59	5,94	5,45	5,07	4,75	4,49
-0,40%	6,51	5,71	5,14	4,72	4,39	4,12	3,89
-0,50%	5,82	5,11	4,60	4,22	3,92	3,68	3,48
-0,60%	5,31	4,66	4,20	3,85	3,58	3,36	3,18
-0,70%	4,92	4,31	3,89	3,57	3,32	3,11	2,94
-0,80%	4,60	4,04	3,64	3,34	3,10	2,91	2,75
-0,90%	4,34	3,81	3,43	3,15	2,93	2,74	2,59
-1,00%	4,12	3,61	<b>3,25</b>	2,99	2,77	2,60	2,46
-1,10%	3,92	3,44	3,10	2,85	2,65	2,48	2,35
-1,20%	3,76	3,30	2,97	2,73	2,53	2,38	2,25
-1,30%	3,61	3,17	2,85	2,62	2,43	2,28	2,16
-1,40%	3,48	3,05	2,75	2,52	2,35	2,20	2,08

El único modelo de contador con diámetro igual a 25mm es el M3:

**M3 y DN 25mm:** Su ritmo de deterioro es igual a -0,97 %/año (Tabla 39) y su consumo medio anual es de 1.456,31 (Tabla 46). Por lo que, su vida útil es de aproximadamente **3 años**.

- **DN 30/32mm:**

**Tabla 50. Vida útil estándar para contadores con DN 30/32mm**

Ritmo (%/año)	Consumo (m <sup>3</sup> /año)						
	1.000	1.300	1.600	1.900	2.200	2.500	2.800
-0,10%	14,31	12,55	11,31	10,38	9,65	9,05	8,55
-0,20%	10,12	8,87	8,00	7,34	6,82	6,40	6,05
-0,30%	8,26	7,24	6,53	<b>5,99</b>	5,57	5,22	4,94
-0,40%	7,15	6,27	5,66	5,19	4,82	<b>4,52</b>	4,28
-0,50%	6,40	5,61	5,06	4,64	4,31	4,05	3,82
-0,60%	5,84	5,12	4,62	4,24	3,94	3,69	3,49
-0,70%	5,41	4,74	4,28	3,92	3,65	3,42	3,23
-0,80%	5,06	4,44	4,00	3,67	3,41	3,20	3,02
-0,90%	4,77	4,18	3,77	3,46	3,22	3,02	2,85
-1,00%	4,52	3,97	3,58	3,28	3,05	2,86	2,70
-1,10%	4,31	3,78	3,41	3,13	2,91	2,73	2,58
-1,20%	4,13	3,62	3,27	3,00	2,78	2,61	2,47
-1,30%	3,97	3,48	3,14	2,88	2,68	2,51	2,37
-1,40%	3,82	3,35	3,02	2,77	2,58	2,42	2,29

Dentro de este grupo de diámetros existen tres modelos con un ritmo de deterioro negativo. No obstante, uno de ellos es el M5. Al igual que el M4, sólo se ha ensayado un contador de este modelo, por lo que, no se calcula ninguna vida útil estándar para el mismo.

**M1 y DN 30mm:** Su ritmo de deterioro es igual a -0,30 %/año (Tabla 39) y su consumo medio anual es de 1.873,34 (Tabla 46). Por lo que, su vida útil es de aproximadamente **6 años**.

**M3 y DN 32mm:** Su ritmo de deterioro es igual a -0,36 %/año (Tabla 39) y su consumo medio anual es de 2.609,14 (Tabla 46). Por lo que, su vida útil está entre **4-5 años**.

- **DN 40mm:**

*Tabla 51. Vida útil estándar para contadores con DN 40mm*

Ritmo (%/año)	Consumo (m <sup>3</sup> /año)						
	1.000	1.300	1.600	1.900	2.200	2.500	2.800
-0,10%	19,52	17,12	15,43	14,16	13,16	12,35	11,67
-0,20%	13,81	12,11	10,91	10,02	9,31	8,73	8,25
-0,30%	11,27	9,89	8,91	8,18	7,60	7,13	6,74
-0,40%	9,76	8,56	<b>7,72</b>	7,08	6,58	6,17	5,83
-0,50%	8,73	7,66	6,90	6,33	5,89	5,52	5,22
-0,60%	7,97	6,99	6,30	5,78	5,37	5,04	4,76
-0,70%	7,38	6,47	5,83	5,35	4,98	4,67	4,41
-0,80%	6,90	6,05	5,46	5,01	4,65	4,37	4,13
-0,90%	6,51	5,71	5,14	4,72	4,39	4,12	3,89
-1,00%	6,17	5,41	4,88	4,48	4,16	3,90	3,69
-1,10%	5,89	5,16	4,65	4,27	3,97	3,72	3,52
-1,20%	5,64	4,94	4,46	4,09	3,80	3,56	3,37
-1,30%	5,41	4,75	4,28	3,93	3,65	3,42	3,24
-1,40%	5,22	4,58	4,13	3,79	3,52	3,30	3,12

El único modelo con DN 40mm y ritmo de deterioro negativo es M4:

**M4 y DN 40mm:** Su ritmo de deterioro es igual a -0,44 %/año (Tabla 39) y su consumo medio anual es de 1.635,32 (Tabla 46). Por lo que, su vida útil está entre **7-8 años**.

## 6.2 Análisis de sensibilidad de los parámetros que afectan a los resultados finales

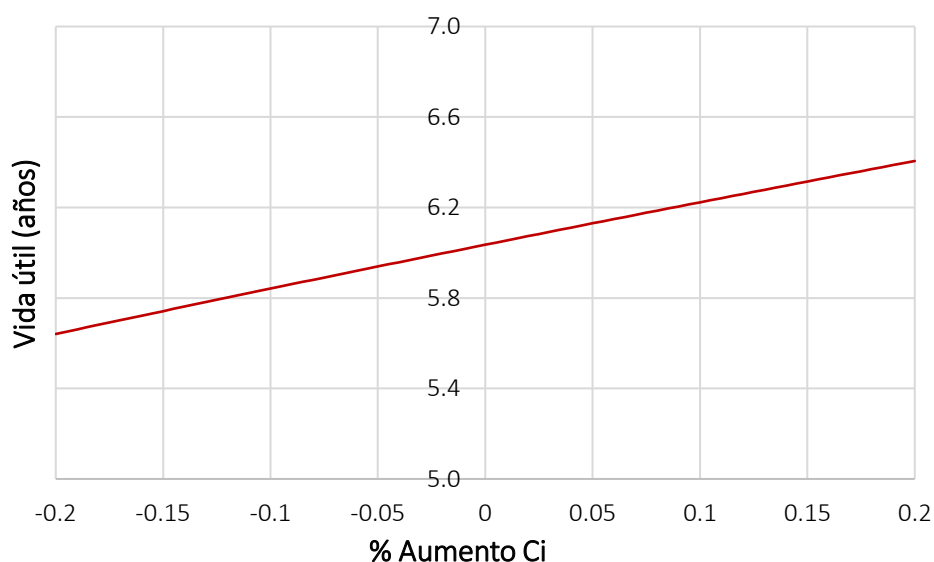
La vida útil óptima de un contador es aquella cuya medición aporta más beneficios a la empresa gestora. Debiendo reemplazarse el aparato cuando éste pase de contribuir

beneficios a generar pérdidas por estar sujeto a grandes errores de medición. Dicha medición, está condicionada por una serie de parámetros que, en mayor o menor, medida afectan de una forma u otra al tiempo que un contador puede permanecer en servicio.

Para conocer cómo afectan dichos parámetros en el cálculo de la vida útil de los contadores, se ha realizado el siguiente análisis de sensibilidad, llegando a las siguientes conclusiones.

### 6.2.1 Costes iniciales

El coste inicial de un contador afecta directamente en el cálculo de la vida útil. Como ya se explicó en el “Apartado 2.1”, cuánto más se invierta en la adquisición e instalación de un contador, mayor será tiempo de recuperación de la inversión y, por lo tanto, mayor será la vida útil.

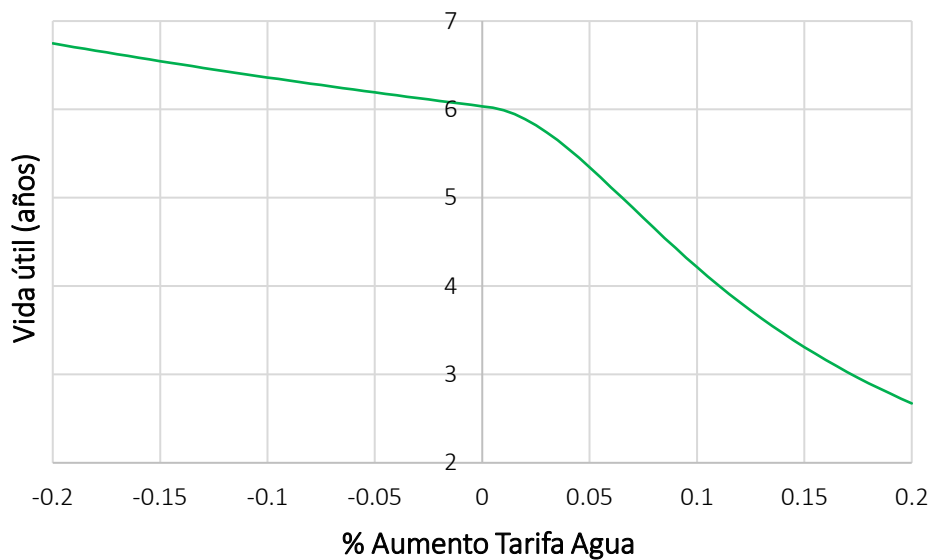


**Ilustración 91.** Análisis de sensibilidad: afección de los costes iniciales en la vida útil de un contador

### 6.2.2 Tarifa del agua

Se ha demostrado en el “Apartado 4.2”, la importancia que tiene el precio del m<sup>3</sup> de agua en el cálculo de la vida útil. Si un abastecimiento tiene instalado una serie de medidores sujetos a grandes errores de subcontaje, las pérdidas económicas que generan los contadores a la empresa por el agua no contabilizada, serán mayores cuando mayor sea el valor del agua. Es por ello, que en la Ilustración 92 se refleja como la vida útil disminuye con el aumento de la

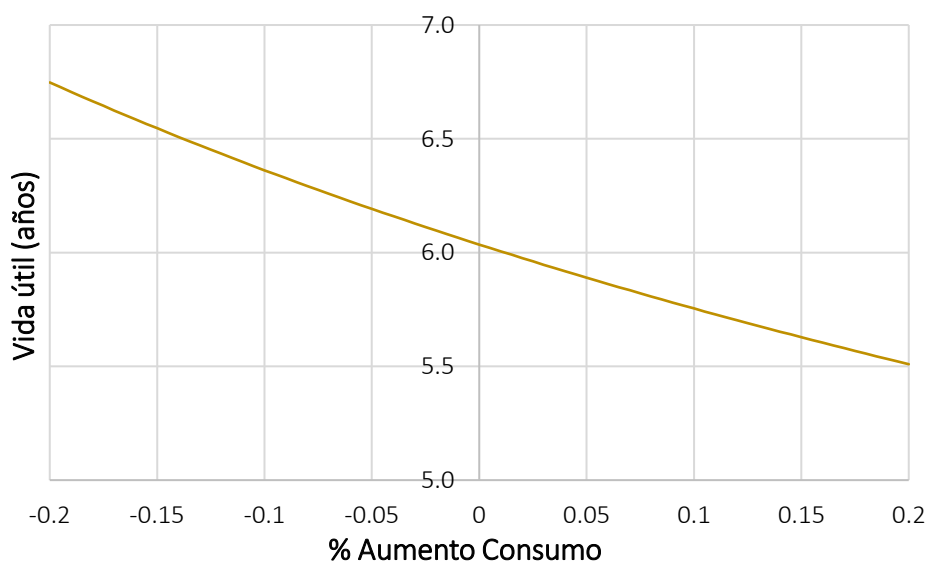
tarifa del agua. A mayor precio del agua, cobra más valor el volumen no registrado y más preciso debe ser el contador, es decir, debe sustituirse antes.



**Ilustración 92.** Análisis de sensibilidad: afección de la tarifa del agua en la vida útil de un contador

### 6.2.3 Consumo de los usuarios

El consumo de los usuarios tiene el mismo efecto que la tarifa del agua. Un abastecimiento en el que consumo de agua sea más frecuente a caudales altos, como es el caso de los grandes consumidores, está sometido a una mayor pérdida de dinero por los volúmenes de agua no registrados. Por ello, cuanto mayor sea el consumo más interesa cambiar antes el contador.

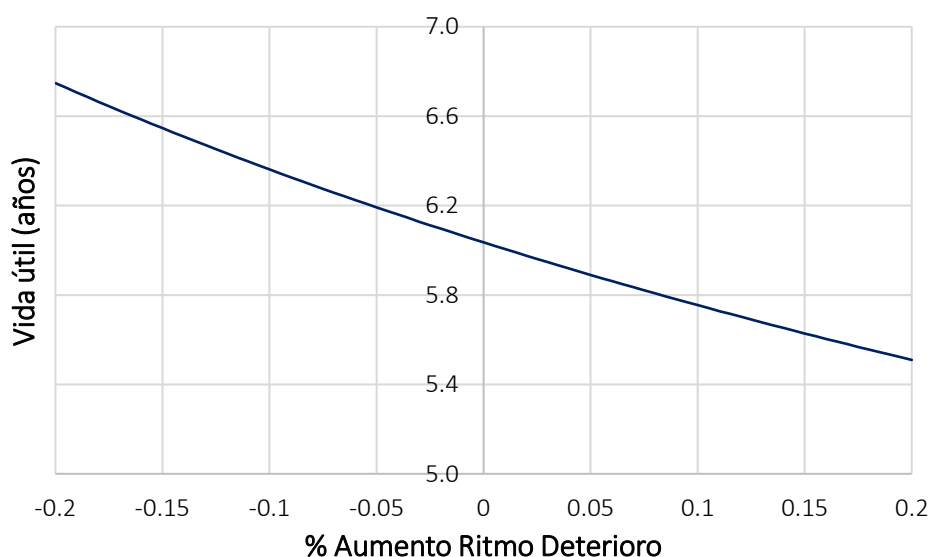


**Ilustración 93.** Análisis de sensibilidad: afección del consumo de los usuarios en la vida útil de un contador

### 6.2.4 Ritmo de deterioro

Finalmente, el ritmo de deterioro es uno de los parámetros más costosos de determinar y que más influencia tiene en el cálculo de la vida útil de un contador.

El ritmo de deterioro marca la frecuencia a la que la medición de un contador se deteriora en el tiempo. Y su valor depende de una diversidad de factores que ya se han nombrado, como el estado físico de los aparatos. Un mayor valor de ritmo de deterioro supone una degradación de la medición más evolutiva y, su efecto es un aumento del volumen no registrado en un periodo de tiempo más corto. Por ello, a mayor ritmo de deterioro del error de medición, menor es el tiempo que puede permanecer un contador en servicio, es decir, menor es la vida útil del mismo.



**Ilustración 94.** Análisis de sensibilidad: *afección del ritmo de deterioro en la vida útil de un contador*

#### 6.2.4.1 Error inicial

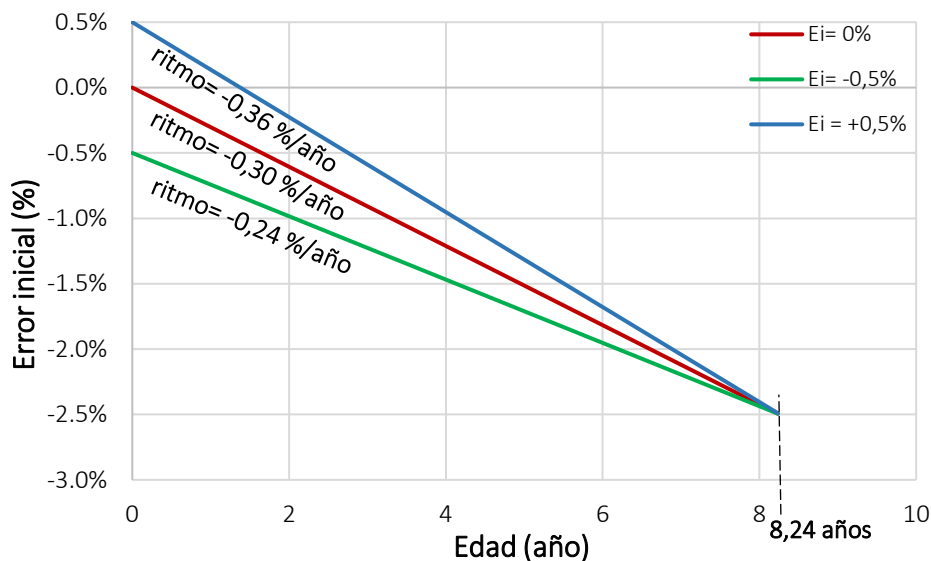
Es importante mencionar, en el análisis de sensibilidad, el efecto que tiene el error inicial en el cálculo de la vida útil. El error inicial afecta de forma indirecta al tiempo de vida útil, pero de forma directa al valor del ritmo de deterioro.

El error que tiene un contador a una determinada edad se calcula como la degradación que ha sufrido el error inicial del aparato durante su vida (Ecuación 5), teniendo en cuenta que, un contador nuevo siempre está sujeto a un error inicial inevitable y diferente al 0%.

Si tenemos en cuenta un contador que lleva instalado y en funcionamiento 8,24 años y cuyo error de medición a esa edad es del -2,49%, y calculamos el ritmo al que se ha deteriorado su medición suponiendo en un caso un error inicial del 0%, y otros dos casos con un error inicial igual al -0,5% y al +0,5% (Ecuación 50). Obtendremos como resultado lo reflejado en la Ilustración 95.

$$\text{ritmo} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{\text{edad}} \quad (50)$$

Si el contador tiene un error inicial inferior al 0%, se deteriora a un menor ritmo que si su error inicial es igual al 0%. Sin embargo, si el error es superior o positivo, el ritmo de deterioro también será mayor. Esto tiene como consecuencia que, el contador que se deteriora a mayor ritmo puede tener una vida útil menor que la de cualquier otro, ya que, el deterioro de su medición será mayor en menor tiempo.



**Ilustración 95.** Análisis de sensibilidad: afección del error inicial en el ritmo de deterioro para un contador con 8.24 años de edad

Teniendo en cuenta los anteriores errores iniciales (0%, -0,5% y +0,5%), y sus correspondientes ritmos de deterioro (-0,30%/año, -0,24%/año y -0,36%, respectivamente), si se considera que el consumo medio anual de los usuarios del abastecimiento, en el que están instalados los contadores, es igual a 1.000 m<sup>3</sup>/año y que el precio del m<sup>3</sup> de agua consumida es igual a 0,50€, se puede calcular las pérdidas económicas anuales que generaría cada ejemplo contador. Para



ello, sólo habría que calcular la evolución del error a lo largo de los años (en este caso, durante 12 años) y el volumen que registra el contador sujeto a esos errores de medición. En el caso del contador con error inicial igual al 0%, la medición en el año 0 es exacta al 100%, registrando todo el consumo de los usuarios. Por lo tanto, los ingresos en ese año serán los máximos que se pueden dar, mientras que los gastos serán nulos (Tabla 52).

En las Tablas 52, 53 y 54 se muestra la evolución del error de la medición de cada contador a lo largo de los años suponiendo los ritmos de deterioro lineales indicados anteriormente.

**Tabla 52. Pérdidas económicas anuales y totales para el contador con error inicial igual al 0%**

Edad (año)	Error (%)	Volumen registrado anual (m3/año)	Ingresos anuales (€/año)	Pérdidas económicas anuales (€/año)
0	0,00%	1.000,00	500,00	0,00
1	-0,30%	996,97	498,49	-1,51
2	-0,61%	993,96	496,98	-3,02
3	-0,91%	990,97	495,49	-4,51
4	-1,21%	988,00	494,00	-6,00
5	-1,51%	985,04	492,52	-7,48
6	-1,82%	982,10	491,05	-8,95
7	-2,12%	979,18	489,59	-10,41
8	-2,42%	976,28	488,14	-11,86
8,24	-2,49%	975,65	487,83	-12,17
9	-2,73%	973,39	486,70	-13,30
10	-3,03%	970,46	485,23	-14,77
11	-3,33%	967,58	483,79	-16,21
12	-3,63%	964,74	482,37	-17,63
<b>Total pérdidas económicas anuales (€)</b>				<b>-127,84</b>

**Tabla 53. Pérdidas económicas anuales y totales para el contador con error inicial igual al -0,5%**

Edad (año)	Error (%)	Volumen registrado anual (m3/año)	Ingresos anuales (€/año)	Pérdidas económicas anuales (€/año)
0	-0,50%	995,00	497,50	-2,50
1	-0,74%	992,62	496,31	-3,69
2	-0,98%	990,23	495,12	-4,88
3	-1,23%	987,86	493,93	-6,07
4	-1,47%	985,49	492,75	-7,25

5	-1,71%	983,14	491,57	-8,43
6	-1,95%	980,80	490,40	-9,60
7	-2,19%	978,47	489,24	-10,76
8	-2,44%	976,16	488,08	-11,92
8,24	-2,49%	975,66	487,83	-12,17
9	-2,68%	973,85	486,92	-13,08
10	-2,92%	971,50	485,75	-14,25
11	-3,16%	969,20	484,60	-15,40
12	-3,41%	966,92	483,46	-16,54
<b>Total pérdidas económicas anuales (€)</b>				<b>-136,55</b>

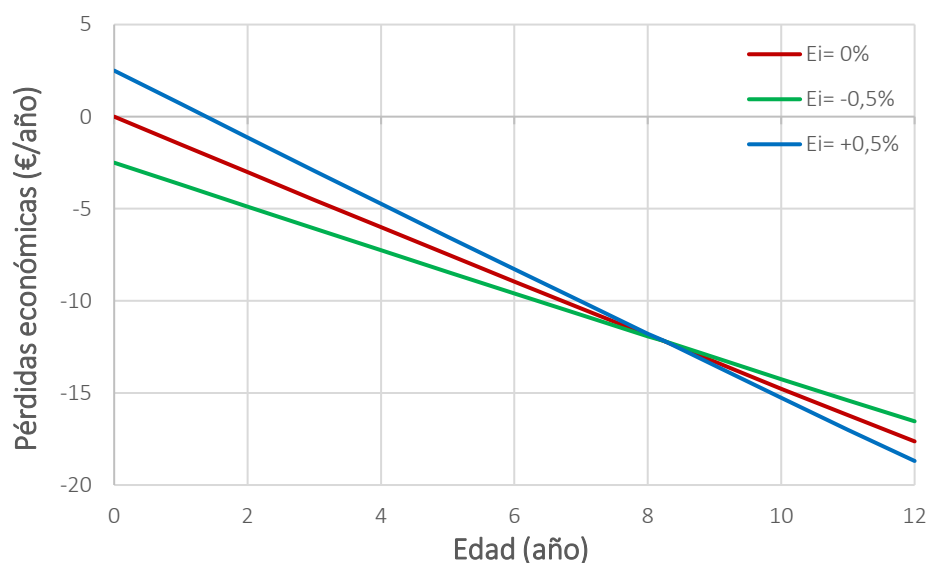
**Tabla 54.** Pérdidas económicas anuales y totales para el contador con error inicial igual al +0,5%

Edad (año)	Error (%)	Volumen registrado anual (m <sup>3</sup> /año)	Ingresos anuales (€/año)	Pérdidas económicas anuales (€/año)
0	0,50%	1005,00	502,50	2,50
1	0,14%	1001,38	500,69	0,69
2	-0,23%	997,74	498,87	-1,13
3	-0,59%	994,12	497,06	-2,94
4	-0,95%	990,53	495,27	-4,73
5	-1,32%	986,97	493,49	-6,51
6	-1,68%	983,43	491,72	-8,28
7	-2,04%	979,92	489,96	-10,04
8	-2,40%	976,44	488,22	-11,78
8,24	-2,49%	975,69	487,84	-12,16
9	-2,77%	972,98	486,49	-13,51
10	-3,13%	969,45	484,73	-15,27
11	-3,49%	966,01	483,00	-17,00
12	-3,86%	962,61	481,30	-18,70
<b>Total pérdidas económicas anuales (€)</b>				<b>-100,17</b>

Se puede observar como el contador con menor error inicial (-0,5%) y menor ritmo de deterioro (-0,24%/año) (Tabla 52) es el que más gastos genera a la empresa (-136,55€ en el año 12. Es decir, 17,68€ más respecto al contador con  $\epsilon_i$  del +0,5% y 8,71€ respecto al contador con  $\epsilon_i$  del 0%). Y como el contador con  $\epsilon_i$  igual al +0,5% (Tabla 54) es el que, en los años representados, genera menos pérdidas a pesar de tener el mayor ritmo de deterioro (-0,36%/año). Esto se debe a que en los primeros el contador tiene un error positivo y registra más agua de la que realmente están consumiendo los usuarios, lo que hace que las empresas ganen dinero en vez de perderlo. Además, la velocidad de deterioro del error es mayor

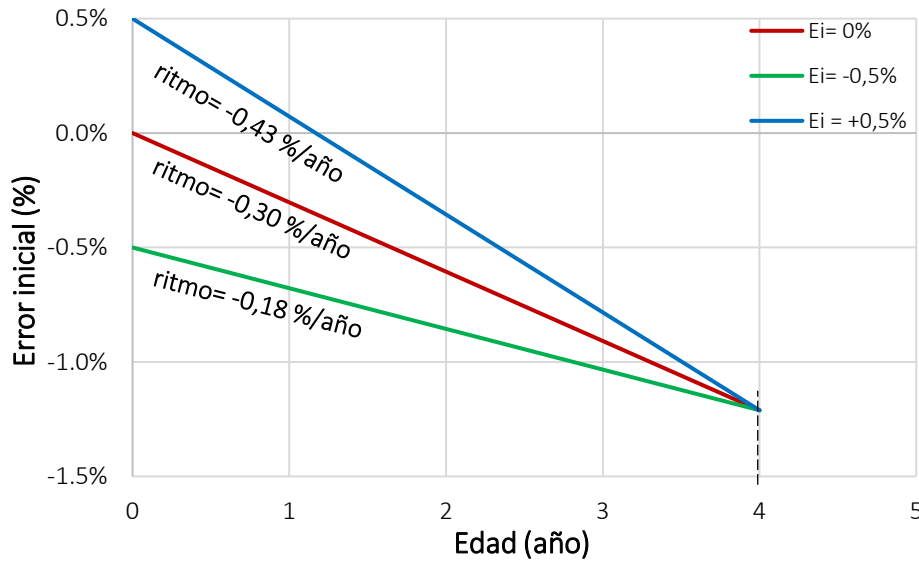
haciendo que el contador pase de tener un error a otro en un tiempo menor, respecto a lo ocurrido en el contador con error inicial negativo, cuya velocidad de degradación hace que el error se mantenga menos deteriorado en el tiempo. Sin embargo, como el error inicial en este caso es positivo, aunque la degradación sea más rápida, la medición con el paso de los años sigue siendo más exacta en comparación con el contador de  $\epsilon_i$  del -0,5% y 0%.

No obstante, se puede ver en las tablas y en la ilustración 96, como la situación cambia a largo plazo. Mientras el contador con  $\epsilon_i = -0,5\%$  mantiene su error más constante en el tiempo, el contador que tenía error inicial positivo y mayor ritmo de deterioro, llega un punto que empieza a estar sujeto a mayores errores de medición y, por lo tanto, a mayores pérdidas económicas. Si el contador sigue instalado, en un plazo de 17 años, se calcula que un contador con error inicial positivo empezará a producir más pérdidas económicas que un contador con error inicial inferior, debido a la mayor velocidad con la que se degrada su medición.



**Ilustración 96.** Evolución de las pérdidas económicas anuales de cada ejemplo de contador

Finalmente, en la Ilustración 97 se puede observar como para el mismo error dado ( $\epsilon = -2.49\%$ ) a una edad inferior (4 años), el ritmo de deterioro para los contadores con error inicial distinto del 0% aumenta considerablemente. Esto daría lugar también a un aumento de las pérdidas económicas en un menor tiempo.



**Ilustración 97.** Análisis de sensibilidad: afección del error inicial en el ritmo de deterioro para un contador con 4 años de edad

Cabe destacar en este apartado, la importancia que tiene llevar a cabo un control de calidad de los contadores de aguas que se van a instalar nuevos, ya que, se ha podido ver como un error inicial diferente al 0% tiene una repercusión mayor o menor tanto en la vida útil del contador como en las pérdidas económicas de la empresa. Si se desconoce el parámetro de error inicial, los cálculos del tiempo óptimo de reemplazo de los contadores y el análisis de beneficios de la empresa puede estar sujetos a grandes errores. Si se considera que un contador tiene un error inicial igual al 0% y en la realidad su error es inferior a este, el error real sería mayor al considerado haciendo que la empresa esté perdiendo más dinero del que realmente había calculado. Por otro lado, si el error real fuera positivo, la empresa estaría ganando dinero los primeros años, sin embargo, con el paso del tiempo estaría perdiendo dinero a mayor velocidad de lo que tenía previsto.

Actualmente existen numerosa información sobre el error inicial de los modelos de contadores destinados a uso residencial, pero existe cierta falta de datos sobre el control de calidad de los contadores de mediano y gran calibre. A pesar de que el número de este tipo de contadores es muy inferior a la cantidad de contadores domésticos instalados, es importante tener también información acerca de ellos, ya que, el consumo de estos usuarios es sumamente mayor al resto, haciendo que cualquier error en la medición suponga grandes cantidades de pérdidas económicas.

## 7 CONCLUSIONES

La realización del presente proyecto ha alcanzado los dos objetivos señalados inicialmente:

### 7.1 MODELO ECONÓMICO

En primer lugar, se ha conseguido el desarrollo de un modelo económico que se aproxime aún más a la realidad, para poder calcular la vida útil de un contador de una manera más exacta. La aplicación del nuevo modelo supone para la empresa una mejora en la gestión del parque de contadores de agua. Su implementación permite planificar y priorizar la sustitución de los medidores basándose en dos aspectos: la localización de aquellas baterías cuyos contadores estén en peor estado y de aquellas que se encuentren en una ubicación que permita reducir los costes de desplazamiento lo máximo posible. Teniendo en cuenta estos dos puntos, se consiguen las siguientes ventajas:

- **Mejorar la eficiencia del parque de contadores.** Al tener en cuenta la localización de los contadores por baterías y los desplazamientos que se realizan durante el proceso de sustitución de las mismas, se consigue reducir lo máximo posible los costes iniciales. Esto implica un aumento en el número de contadores a reemplazar. Un mayor número de contadores nuevos instalados da lugar a una mejora de la eficiencia de la medición global del parque y, a una disminución del volumen de agua no registrado por errores de los medidores. Con la aplicación del nuevo modelo, el error global del parque de contadores ha disminuido un 0,35% respecto al método empleado en la actualidad.
- **Mejorar los beneficios de la empresa.** Se sustituyen únicamente aquellos contadores que se consideren necesarios y que no supongan gastos adicionales a la empresa. Con la reducción de los costes iniciales y el incremento de la exactitud de los medidores, los beneficios de la empresa han aumentado 109.974,24€ con la sustitución de 3.529 contadores más respecto a los resultados que aporta el anterior modelo. Eso supone un aumento de los beneficios de 2,20€ por cada contador del parque. Además, la inversión realizada por la sustitución de los contadores se recupera hasta medio año antes con la aplicación del nuevo modelo.

Además, se ha demostrado la importancia que tiene el tipo de tarifa de agua en el cálculo de la vida útil de los contadores. Un precio del m<sup>3</sup> de agua mayor, supone una reducción de la vida útil de los contadores, haciendo que deba sustituirse con mayor antelación un mayor

número de contadores. Aunque esto suponga un aumento de los costes iniciales, también sigue suponiendo un aumento de los ingresos para la empresa y, por lo tanto, de los beneficios finales.

Finalmente, hay que tener en cuenta que la metodología final expuesta en esta memoria, muestra el número de contadores máximos que debería cambiarse en cada batería. Por lo que, la empresa no debería cambiar más contadores de los indicados, ya que, esto implicaría un desequilibrio entre la relación gastos e ingresos, haciendo que la entidad acabe perdiendo ganancias y que no aproveche completamente la funcionalidad de los medidores.

## 7.2 ENSAYOS DE CONTADORES DE MEDIANO CALIBRE

En segundo lugar, con la realización de ensayos se han conseguido los siguientes resultados:

- Aportar los primeros valores sobre el ritmo al que se deterioran los diferentes modelos y diámetros de contadores de mediano calibre.
- Conocer cómo afecta a la medición el deterioro físico de los diferentes modelos de contadores. Se ha llegado a la conclusión de que:
  - a. Los contadores de mayor diámetro (DN 40mm) presentan una mayor cantidad de incrustaciones, probablemente debido al tipo de abastecimiento al que se han destinado. Esto afecta a la medición del contador sometiéndola a sobrecontaje y afectando directamente a la factura de los consumidores.
  - b. Dentro del grupo de contadores de DN 30mm y 32mm, existe un mayor número de contadores cuya medición se ve afectada por fallos en el acoplamiento magnético haciendo que, a caudales medios o altos los aparatos dejen de medir.
  - c. Los contadores con diámetros más pequeños (DN 20mm y 25mm) se ven más afectados por la acumulación excesiva de sedimentos en el filtro, haciendo que la medición de los mismos se vea sujeta a errores de subcontaje.
  - d. Durante los ensayos, también se han encontrado contadores que han sido manipulados y que miden menos agua de la que realmente están consumiendo los usuarios. Estos tres últimos casos (b, c y d), perjudican de forma directa a los ingresos de la empresa gestora, y lo hacen en mayor o menor medida dependiendo del precio que tenga la tarifa del agua.

- Elaborar tablas para estimar la vida útil estándar de cualquier contador de mediano calibre según los modelos ensayados.
- Estudiar cómo afectan diferentes parámetros en el cálculo de la vida útil de los contadores de mediano calibre:
  - a. Cuanto mayores sean los costes iniciales, mayor será la vida útil de los contadores para poder amortizar la inversión realizada.
  - b. A mayor precio del m<sup>3</sup> de agua, menor será la vida útil del contador, ya que, cuando empiece a estar sujetos a errores, mayor será la cantidad de agua no registrada y las pérdidas económicas.
  - c. Un mayor consumo de los usuarios supone una mayor pérdida de agua no contabilizada cuando el aparato esté sujeto a error, por ello, disminuye la vida útil.
  - d. Un mayor ritmo de deterioro de la medición supone una vida útil más corta para los contadores. Y, para la misma edad de contador, un menor error inicial supone un ritmo de deterioro menor. Por lo que, se hace hincapié en la importancia de que la empresa realice un control de calidad de los aparatos nuevos antes de su instalación.

Finalmente, con la obtención de estos resultados, se abre la posibilidad de que la empresa elija el modelo de contador que más le conviene instalar según el tipo de abastecimiento en el que se vaya a ubicar. Además de tener una primera aproximación sobre el tiempo que deben permanecer instalados los contadores de mediano calibre en el abastecimiento.

## 8 LÍNEAS FUTURAS

En cuanto a la parte del modelo económico, en este proyecto se ha elegido el lenguaje VBA para desarrollar el modelo económico, evaluar su funcionalidad y validar sus resultados. Sin embargo, sería interesante integrar el modelo económico desarrollado en un software que permita llevar a cabo la gestión diaria del parque de contadores de agua de forma más automática. De manera que, la empresa tenga una base de datos actualizada sobre los contadores de la ciudad y pueda gestionar la eficiencia y economía que aporta el parque en todo momento.

Por otro lado, con la realización de este proyecto, se ha iniciado un nuevo estudio sobre los contadores de mediano calibre usados. Sin embargo, existe una mayor variedad de modelos de contadores que no se han podido ensayar, por lo que, sería interesante aportar datos sobre el ritmo de deterioro de los mismos. Además, se han ensayado un total de 118 contadores que, al separarlos por modelo y diámetro, ha reducido el número de datos en cada grupo. Por ello, es necesario el ensayo de más contadores de estos modelos para obtener valores de ritmo de deterioro más estándares y, que permitan aproximarnos aún más a la realidad para poder calcular la vida útil de los contadores de forma más exacta.



## 9 BIBLIOGRAFÍA

### **Artículos y libros:**

Arregui de la Cruz, F., Cabrera Rochera, E. & Cobacho Jordán, R., 2007. *Gestión integral de contadores de agua*. Valencia: Gil Industrias Gráficas, SL.

Arregui de la Cruz, F., García-Serra García, J., López Patiño, G. & Martínez Solano, J., 1998. Metodología para la evaluación del error de medición de un parque de contadores. *Ingeniería del Agua*. Vol 5. Num 4, diciembre. pp. 55-66.

Arregui de la Cruz, F., Palau Estevan, C., García-Serra García, J. & Herrero Alvaro, M., 2003. Contadores de agua para riego. Medición y recomendaciones prácticas. *Instituto Tecnológico del Agua. Organismo Público Valenciano de Investigación- Universidad Politécnica de*, pp. 1-10.

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*, pp. 143-146.

Arregui, F., Gavara, F., Soriano, J. & Cobacho, R., 2014. Analysis of domestic water meters field performance. *This paper was presented by Francisco Arregui at the Water Loss 2014 Conference in Vienna in April 2014.*, pp. 1-9.

Captio, E., s.f. *Informe Captio del Kilometraje 2016. 3ª Edición*. [En línea] Available at: <https://heraldodeoregon.files.wordpress.com/2018/01/informe-captio-del-kilometraje-2016.pdf>

Guibentif, H., Rufenacht, H. & Rüetschi, M., 2007. Acceptable Level of Water Losses in Geneva. *Proceedings of the IWA Water Loss 2007 Specialist Conference*, Septiembre. pp. 138-147.

J. Shields, D., L. Barfuss, S. & C. Johnson, M., 2012. Revenue recovery through meter replacement. *Journal - American Water Works Association*, pp. 252-259.

Lambert, A., 2003. Assessing non-revenue water and its components: a practical approach. *Water Loss*, pp. 50-51.

López, J. & Guerrero, J., 2013. Estimación de la precisión en la micromedición del sistema de abastecimiento de agua de Pereira. *Entre Ciencia e Ingeniería*, pp. 72-76.

Puleo, V. y otros, 2014. Definition of water meter substitution plans based on a composite indicator. *Elsevier*, pp. 1369-1377.

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.

Unidas, O. N., 2018. *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. [En línea] Available at: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

**Normativa:**

ISO 4064-1:2014: *“Water meters for cold potable water and hot water - Part 1: Metrological and technical requirements”*.

## 10 Anexo

En las siguientes páginas se recogen los resultados obtenidos en los ensayos de los contadores de mediano calibre que no se han podido tener en cuenta dentro de la memoria de este trabajo.

## 10.1 Características de los contadores ensayados

ID	Modelo	Edad	Tipo de contador	Clase	Q <sub>1</sub> (l/h)	Q <sub>2</sub> (l/h)	Q <sub>3</sub> (l/h)	Q <sub>4</sub> (l/h)	Q <sub>5</sub> (l/h)	Q <sub>6</sub> (l/h)	Q <sub>7</sub> (l/h)	Q <sub>8</sub> (l/h)	Peso Q <sub>1</sub> [%]	Peso Q <sub>2</sub> [%]	Peso Q <sub>3</sub> [%]	Peso Q <sub>4</sub> [%]	Peso Q <sub>5</sub> [%]	Peso Q <sub>6</sub> [%]	Peso Q <sub>7</sub> [%]	Peso Q <sub>8</sub> [%]
1	M1	7	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
2	M1	6	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
3	M1	6	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
4	M1	6	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
5	M1	6	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
6	M1	6	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
7	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
8	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
9	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
10	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
11	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
12	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
13	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
14	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
15	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
16	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
17	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
18	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
19	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
20	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
21	M1	8	Chorro único	200	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
22	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
23	M3	12	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
24	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%

25	M3	12	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
26	M3	11	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
27	M3	12	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
28	M4	1	Volumétrico	160	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	40%	35%	8%	5%
29	M3	9	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
30	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
31	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
32	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
33	M3	11	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
34	M3	14	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
35	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
36	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
37	M3	11	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
38	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
39	M3	11	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
40	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
41	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
42	M3	9	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
43	M3	6	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
44	M3	7	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
45	M3	8	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
46	M3	8	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
47	M3	8	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
48	M3	7	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	2.500	4.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
49	M3	8	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
50	M3	8	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
51	M3	16	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
52	M3	11	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
53	M3	9	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%

54	M3	10	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
55	M3	9	Chorro único	C	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
56	M1	3	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
57	M1	8	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
58	M1	7	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
59	M1	7	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
60	M1	8	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
61	M1	8	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
62	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
63	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
64	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
65	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
66	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
67	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
68	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
69	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
70	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
71	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
72	M1	9	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
73	M5	10	Chorro múltiple	B	15	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
74	M3	9	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
75	M3	11	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
76	M3	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
77	M3	15	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
78	M3	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
79	M3	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
80	M3	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
81	M3	11	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
82	M3	7	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%

83	M3	8	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
84	M3	7	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
85	M3	7	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
86	M3	8	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
87	M3	7	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
88	M3	11	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
89	M3	11	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
90	M3	11	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	7.000	10.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
91	M1	7	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
92	M1	6	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
93	M1	7	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
94	M1	6	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
95	M1	7	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
96	M1	7	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
97	M1	6	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
98	M1	8	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
99	M1	8	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
100	M1	7	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
101	M1	8	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
102	M1	8	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
103	M1	7	Chorro único	200	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
104	M2	9	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
105	M2	8	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
106	M2	9	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
107	M2	6	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
108	M2	6	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
109	M2	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
110	M2	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
111	M2	11	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%

112	M2	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
113	M2	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
114	M2	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
115	M2	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
116	M2	11	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
117	M2	10	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%
118	M2	11	Chorro único	C	30	60	120	750	1.500	3.500	10.000	17.000	2%	2%	4%	4%	20%	35%	28%	5%



## 10.2 Error de medición de los contadores a cada caudal de ensayo y su error global

ID	$Q_{\text{permanente}}$ ( $Q_3/Q_n$ ) ( $m^3/h$ )	$Q_{\text{mínimo}}$ ( $Q_1$ ) ( $m^3/h$ )	$Q_{\text{transición}}$ ( $Q_2$ ) ( $m^3/h$ )	$Q_{\text{sobrecarga}}$ ( $Q_4$ ) ( $m^3/h$ )	DN (mm)	Volumen acumulado ( $m^3$ )	Error $Q_1$ (%)	Error $Q_2$ (%)	Error $Q_3$ (%)	Error $Q_4$ (%)	Error $Q_5$ (%)	Error $Q_6$ (%)	Error $Q_7$ (%)	Error $Q_8$ (%)	$\epsilon$ global (%)
1	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	5.938	-2,71%	-0,96%	-0,60%	-0,40%	1,71%	2,03%	2,00%	1,73%	1,53%
2	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	4.861	-7,54%	-1,56%	0,10%	1,09%	0,59%	1,48%	1,59%	1,50%	0,82%
3	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	6.328	-1,21%	0,55%	1,40%	1,00%	0,38%	0,99%	1,20%	1,28%	0,74%
4	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	10.074	-1,61%	-0,75%	0,30%	-0,20%	1,15%	1,79%	1,83%	1,73%	1,28%
5	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	12.579	-4,64%	-0,86%	-0,40%	-1,60%	-1,20%	-0,57%	-0,45%	-0,38%	-0,92%
6	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	8.889	-99,90%	-38,03%	-10,33%	-2,59%	-3,02%	-1,13%	6,88%	7,84%	-3,94%
7	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	919	-5,44%	-2,72%	-1,50%	-2,34%	-0,18%	0,07%	-0,38%	-0,29%	-0,41%
8	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	2.986	-6,85%	-2,72%	-1,50%	-1,84%	-0,05%	0,16%	0,29%	0,37%	-0,25%
9	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	1.108	-12,10%	-5,84%	-3,31%	-2,74%	-0,71%	-0,52%	-0,75%	-1,06%	-1,18%
10	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	782	-6,35%	-2,92%	-1,60%	-1,14%	0,17%	0,33%	0,19%	-0,12%	-0,10%
11	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	723	-16,03%	-7,24%	-4,11%	-2,64%	0,14%	0,33%	0,09%	-0,22%	-0,57%
12	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	649	0,55%	0,21%	-0,35%	-1,10%	-0,05%	-0,29%	-0,47%	-0,41%	-0,22%
13	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	776	0,45%	-0,39%	0,25%	-0,30%	1,18%	1,03%	0,73%	0,48%	0,91%
14	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	12.828	-1,36%	-0,90%	0,25%	0,20%	1,47%	1,46%	1,25%	0,98%	1,22%
15	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	6.291	-2,27%	-1,10%	-0,05%	-0,20%	1,37%	0,98%	0,83%	0,42%	0,90%
16	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	734	-1,46%	-0,55%	-0,35%	-1,84%	-0,51%	-0,59%	-0,58%	-1,11%	-0,64%
17	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	491	-3,28%	-1,06%	-0,55%	-0,85%	0,97%	0,97%	0,89%	0,97%	0,70%
18	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	856	-5,50%	-1,96%	-0,65%	-0,25%	0,55%	0,90%	0,76%	0,43%	0,43%
19	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	5.622	0,45%	0,25%	0,15%	0,05%	1,12%	1,31%	1,24%	1,06%	1,08%
20	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	8.742	-10,11%	-4,22%	-2,16%	-1,84%	0,08%	0,29%	0,14%	-0,09%	-0,31%
21	4,0	0,020	0,0320	5,0	20	2.470	-8,93%	-3,11%	-1,25%	-0,75%	1,57%	1,64%	1,41%	1,04%	1,05%
22	2,5	0,025	0,0375	5,0	20	1.873	-30,10%	-2,77%	1,90%	1,29%	0,51%	-0,71%	-1,03%	-1,03%	-0,71%
23	2,5	0,025	0,0375	5,0	20	2.781	-19,43%	-1,76%	0,60%	1,19%	0,54%	0,34%	0,25%	0,36%	0,02%
24	2,5	0,025	0,0375	5,0	20	5.458	1,81%	4,33%	7,22%	6,48%	6,24%	6,91%	7,56%	7,04%	6,54%

25	2,5	0,025	0,0375	5,0	20	15.378	-28,77%	0,45%	5,03%	4,74%	3,83%	3,92%	3,93%	3,49%	3,22%
26	2,5	0,025	0,0375	5,0	20	2.507	-15,67%	-0,65%	2,93%	2,93%	-0,22%	-0,11%	0,20%	0,10%	-0,20%
27	2,5	0,03	0,0375	5,0	20	2.255	-9,70%	1,41%	4,86%	3,83%	0,73%	0,84%	1,03%	1,04%	0,90%
28	4,0	0,025	0,0400	5,0	20	19	-1,31%	0,10%	0,70%	1,20%	0,02%	-0,60%	-1,03%	-1,59%	-0,31%
29	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	23.529	-100,00%	-24,01%	-4,91%	-0,80%	0,59%	0,31%	-0,81%	-1,13%	-2,77%
30	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	14.894	-28,23%	-5,23%	0,30%	0,05%	-0,23%	-0,02%	-0,42%	-0,12%	-0,83%
31	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	7.984	-21,61%	-2,87%	0,75%	0,88%	-0,03%	-1,11%	-1,65%	-1,34%	-1,35%
32	3,5	0,04	0,0525	7,0	25	8.475	-32,39%	-7,75%	0,80%	0,85%	-0,31%	-1,01%	-1,22%	-1,66%	-1,58%
33	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	8.688	-21,01%	-3,21%	1,15%	1,49%	1,83%	1,16%	0,91%	1,08%	0,70%
34	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	17.875	-34,31%	-7,64%	-1,15%	0,30%	0,85%	0,06%	-0,28%	0,10%	-0,76%
35	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	4.842	-99,50%	-85,01%	-67,02%	-6,07%	-1,46%	-0,48%	-99,04%	-97,63%	-39,69%
36	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	6.945	-97,58%	-14,89%	-1,55%	0,65%	-0,14%	-0,59%	-1,31%	-0,91%	-2,93%
37	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	4.407	-28,36%	-5,53%	0,55%	0,45%	1,39%	1,32%	0,76%	0,98%	0,36%
38	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	1.295	-30,84%	-3,76%	1,17%	0,70%	-0,03%	-1,08%	-1,84%	-1,84%	-1,61%
39	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	6.105	-100,00%	-99,90%	-95,48%	-100,00%	-0,89%	-70,80%	-99,99%	-99,98%	-69,77%
40	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	20.151	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-74,99%	-69,34%	-99,28%	-99,96%	-84,06%
41	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	10.452	-99,80%	-17,51%	-3,70%	-0,75%	-0,10%	-0,80%	-1,99%	-1,54%	-3,46%
42	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	7.323	-62,20%	-6,42%	0,95%	1,74%	-1,39%	-2,20%	-2,27%	-2,10%	-3,05%
43	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	8.607	-89,72%	-33,70%	-5,42%	-0,95%	0,97%	0,04%	-0,14%	-0,06%	-2,56%
44	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	37.257	-99,80%	-56,54%	-7,62%	-4,33%	-0,50%	-0,63%	-1,44%	-1,42%	-4,40%
45	3,5	0,04	0,0525	7,0	25	9.111	-99,70%	-20,12%	-2,01%	-1,05%	0,37%	0,65%	-0,06%	0,09%	-2,23%
46	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	20.249	-100,00%	-13,94%	-1,65%	-0,52%	-0,34%	-0,27%	-0,41%	-0,18%	-2,65%
47	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	24.611	-100,00%	-31,76%	-7,47%	-2,11%	-0,30%	-0,63%	-0,92%	-0,56%	-3,58%
48	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	18.945	-100,00%	-99,09%	-8,32%	-1,19%	-0,76%	-0,70%	-0,80%	-0,82%	-5,02%
49	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	6.468	-99,80%	-20,31%	-4,46%	-1,14%	-0,38%	-0,78%	-0,34%	-0,40%	-3,09%
50	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	8.842	-100,00%	-22,32%	-4,76%	-1,05%	-0,51%	-0,79%	-0,59%	-0,12%	-3,23%
51	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	26.094	-96,37%	-12,27%	-1,45%	-0,25%	-0,16%	0,43%	-0,30%	-0,41%	-2,23%
52	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	6.069	-20,35%	-3,55%	0,18%	0,85%	-0,06%	0,49%	-0,18%	-0,04%	-0,33%
53	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	19.378	-99,70%	-21,57%	-3,63%	-0,95%	0,40%	0,12%	-0,56%	-0,11%	-2,65%

54	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	29.052	-98,39%	-11,00%	-1,43%	0,45%	0,35%	0,02%	-0,98%	-0,91%	-2,47%
55	3,5	0,035	0,0525	7,0	25	20.992	-100,00%	-99,20%	-16,01%	-5,28%	-2,17%	-2,85%	-3,37%	-2,89%	-7,36%
56	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	1.052	-72,86%	-2,76%	-0,40%	-0,23%	-0,46%	-0,25%	-0,05%	0,07%	-1,73%
57	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	50.148	-100,00%	-4,71%	-1,30%	-1,24%	-1,21%	-1,55%	-0,35%	-0,32%	-3,09%
58	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	10.504	-2,51%	-1,75%	-0,40%	0,30%	0,15%	0,55%	0,39%	0,38%	0,26%
59	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	40.090	-18,51%	-2,76%	0,60%	0,25%	-0,10%	0,45%	0,30%	0,38%	-0,15%
60	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	9.656	-100,00%	-16,75%	-5,28%	-1,29%	-1,57%	-0,35%	-0,20%	-0,56%	-3,12%
61	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	10.292	-100,00%	-1,71%	0,70%	-1,45%	-1,67%	-1,95%	-0,59%	-0,32%	-3,26%
62	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	8.069	-100,00%	-14,85%	-4,48%	-0,41%	0,26%	-0,59%	-0,17%	-0,46%	-2,72%
63	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	6.804	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-1,01%	0,20%	-0,45%	-0,10%	-0,15%	-8,19%
64	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	61.346	-100,00%	2,22%	2,60%	-0,30%	0,61%	0,35%	0,64%	0,54%	-1,41%
65	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	8.131	-100,00%	1,22%	1,60%	-0,91%	-0,30%	-1,00%	-0,44%	-0,73%	-2,52%
66	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	18.212	-100,00%	-2,83%	-1,40%	0,28%	0,61%	0,03%	0,18%	0,07%	-1,92%
67	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	286	-100,00%	-4,83%	0,59%	0,74%	0,86%	-0,43%	-0,12%	-0,32%	-2,07%
68	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	6.382	-100,00%	-3,83%	-0,41%	-0,48%	0,05%	0,48%	0,03%	-0,08%	-1,93%
69	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	754	-100,00%	-3,81%	1,59%	0,10%	0,15%	-0,87%	-0,37%	-1,26%	-2,45%
70	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	7.753	-100,00%	-100,00%	-3,39%	0,81%	0,66%	0,02%	0,66%	0,39%	-3,76%
71	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	18.567	-100,00%	0,20%	0,60%	-0,46%	0,35%	-0,62%	-0,22%	-0,73%	-2,24%
72	10,0	0,050	0,0800	12,5	30	4.223	-100,00%	-7,77%	0,48%	-0,13%	0,33%	-0,29%	0,28%	-0,02%	-2,10%
73	5,0	0,100	0,4000	10,0	30	23.216	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-7,33%	-1,99%	0,37%	0,40%	-14,04%
74	6,0	0,060	0,0900	12,0	32	26.990	-17,07%	1,65%	-1,20%	-0,97%	-1,00%	-0,18%	-0,83%	-1,06%	-0,94%
75	6,0	0,060	0,0900	12,0	32	43.148	-100,00%	-29,79%	-6,18%	0,22%	0,39%	0,26%	0,76%	0,90%	-2,41%
76	6,0	0,060	0,0900	12,0	32	36.142	-95,87%	-1,91%	-1,69%	-0,93%	-0,49%	-2,45%	-2,14%	-1,85%	-3,71%
77	6,0	0,060	0,0900	12,0	32	11.037	-20,81%	-5,52%	-1,10%	0,78%	1,59%	1,28%	1,26%	1,21%	0,64%
78	6,0	0,060	0,0900	12,0	32	7.561	-16,99%	-4,96%	0,85%	-0,65%	-1,38%	-1,88%	-1,78%	-1,59%	-1,94%
79	6,0	0,060	0,0900	12,0	32	11.264	-84,40%	-26,12%	-4,43%	-0,49%	-1,22%	-1,65%	-1,63%	-93,54%	-8,36%
80	6,0	0,060	0,0900	12,0	32	4.529	-16,78%	-0,05%	1,34%	0,24%	0,40%	-0,87%	-1,14%	-1,72%	-0,90%
81	6,0	0,060	0,0900	12,0	32	2.909	-49,20%	-15,19%	-6,22%	-2,79%	-1,56%	-2,64%	-1,12%	-0,78%	-3,24%
82	6,0	0,060	0,0900	12,0	32	87.865	-56,88%	-14,49%	-0,20%	0,86%	1,61%	0,71%	1,13%	0,61%	-0,48%

83	6,0	0,060	0,0900	12,0	32	71.344	-28,53%	-7,87%	-0,30%	0,76%	-0,81%	-1,47%	-0,81%	-0,79%	-1,65%
84	6,0	0,06	0,09	12,0	32	29.302	-19,56%	-5,29%	1,49%	-0,77%	-0,73%	-1,39%	-1,54%	-1,57%	-1,61%
85	6,0	0,06	0,09	12,0	32	11.804	-13,42%	-3,79%	1,29%	2,01%	0,71%	-0,06%	-0,29%	-0,36%	-0,19%
86	6,0	0,06	0,09	12,0	32	46.077	-40,57%	-10,60%	0,59%	1,24%	0,46%	-0,06%	-0,01%	-76,34%	-4,70%
87	6,0	0,06	0,09	12,0	32	35.706	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-99,49%	-1,06%	-1,59%	-1,13%	-96,59%	-17,89%
88	6,0	0,06	0,09	12,0	32	10.182	-19,94%	-6,17%	0,55%	-0,11%	-0,21%	-0,96%	-0,84%	-0,57%	-1,15%
89	6,0	0,06	0,09	12,0	32	2.806	-96,28%	-19,70%	-4,53%	-0,40%	-0,36%	-1,45%	-1,13%	-0,48%	-3,44%
90	6,0	0,06	0,09	12,0	32	1.450	-68,92%	-12,08%	-1,34%	0,84%	0,84%	0,36%	0,72%	0,89%	-1,10%
91	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	15.111	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-0,71%	-0,30%	-0,97%	-0,24%	-12,53%
92	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	10.266	-100,00%	-8,82%	-1,49%	-0,41%	-0,05%	-0,40%	-1,21%	-0,33%	-2,76%
93	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	10.763	-100,00%	-20,84%	-8,46%	-1,17%	-0,51%	-0,45%	-0,97%	-0,33%	-3,35%
94	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	9.157	-100,00%	-5,81%	-1,49%	-0,15%	0,00%	-0,55%	-1,36%	-0,33%	-2,77%
95	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	9.189	-100,00%	-2,81%	-0,40%	0,10%	0,05%	0,48%	-0,93%	-0,19%	-2,16%
96	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	16.020	-100,00%	-4,81%	-2,39%	-0,36%	-0,15%	0,63%	-0,78%	-0,19%	-2,24%
97	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	2.886	-100,00%	-2,76%	0,60%	0,00%	0,10%	-0,38%	-0,92%	-0,14%	-2,41%
98	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	14.303	-100,00%	-11,74%	-1,30%	0,28%	0,40%	0,30%	0,10%	0,63%	-2,03%
99	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	10.819	-100,00%	-7,72%	-1,30%	0,23%	0,35%	0,35%	0,00%	0,63%	-1,97%
100	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	5.534	-100,00%	-8,73%	-2,39%	-0,46%	0,05%	-0,35%	-1,07%	-0,24%	-2,71%
101	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	1.262	-100,00%	-1,71%	0,60%	0,91%	0,96%	0,70%	0,49%	0,86%	-1,36%
102	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	43.007	-100,00%	-5,76%	-0,40%	0,29%	0,51%	0,20%	-0,32%	0,19%	-2,03%
103	16,0	0,080	0,1280	20,0	40	2.132	-100,00%	-3,76%	-0,40%	0,50%	0,66%	0,00%	-0,80%	-0,24%	-2,18%
104	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	72.875	-26,62%	-5,81%	5,47%	2,13%	1,82%	2,38%	3,41%	3,40%	1,98%
105	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	34.702	-97,99%	-18,76%	-1,39%	-0,96%	-2,73%	-2,73%	-1,07%	-0,96%	-4,28%
106	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	31.419	-16,50%	-0,70%	7,57%	8,22%	6,12%	7,79%	6,45%	8,56%	6,47%
107	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	30.854	-28,63%	-7,82%	2,49%	0,91%	-0,40%	-0,63%	0,58%	1,58%	-0,65%
108	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	15.607	-69,85%	-13,65%	0,60%	3,15%	2,33%	1,68%	2,30%	2,69%	0,31%
109	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	19.707	-20,52%	-5,72%	4,63%	0,99%	0,81%	0,86%	1,05%	1,49%	0,53%
110	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	11.255	-25,55%	-6,72%	0,65%	0,48%	0,25%	-0,19%	0,12%	0,53%	-0,56%
111	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	17.068	-32,56%	-8,77%	2,47%	1,57%	1,45%	1,20%	1,65%	2,09%	0,61%

112	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	18.266	-28,54%	-5,76%	0,48%	3,09%	2,41%	1,90%	3,29%	3,95%	1,72%
113	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	10.515	-19,52%	-5,75%	2,52%	1,72%	1,44%	0,50%	0,49%	0,95%	0,31%
114	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	15.366	-41,65%	-10,77%	1,52%	2,33%	0,68%	0,25%	0,39%	0,76%	-0,52%
115	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	28.323	-27,53%	-5,76%	6,52%	3,12%	2,93%	3,45%	4,22%	4,72%	2,93%
116	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	3.106	-20,48%	-4,76%	1,54%	1,25%	1,06%	2,40%	1,80%	2,05%	1,27%
117	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	12.185	-43,63%	-6,74%	0,60%	-0,77%	-2,47%	-2,65%	-0,87%	-0,10%	-2,68%
118	10,0	0,100	0,1500	20,0	40	32.393	-91,95%	-22,78%	2,59%	1,97%	1,06%	1,60%	1,55%	1,91%	-0,81%

### 10.3 Análisis del estado físico de los contadores y de su curva de error

ID	Tipo de degradación	¿Subcontaje?		¿Sobrecontaje?		ESTADO FÍSICO DEL CONTADOR			
		Caudales bajos (Q <sub>1</sub> -Q <sub>4</sub> )	Caudales altos (Q <sub>5</sub> -Q <sub>8</sub> )	Caudales bajos (Q <sub>1</sub> -Q <sub>4</sub> )	Caudales altos (Q <sub>5</sub> -Q <sub>8</sub> )	ESTADO DE LA ENTRADA Y FILTRO DEL CONTADOR	ESTADO DE LA SALIDA E INTERIOR DEL CONTADOR	¿PRESENTA FALLOS EN EL ACOPLAMIENTO MAGNÉTICO?	¿PRESENTA SIGNOS DE MANIPULACIÓN?
1	Normal	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Normal	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Normal	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Normal	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Normal	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Anómala	Sí	-	-	Sí	-	-	-	-
7	Normal	-	-	-	-	Obstruido por sedimentos	-	-	-
8	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
9	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	Presencia de incrustaciones	-	-
10	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
11	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
12	Normal	-	-	-	-	Obstruido por sedimentos	-	-	-
13	Normal	-	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	-	-	-
14	Normal	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	Tiene incrustaciones	-	-
15	Normal	-	-	-	-	-	Presenta óxido	-	-

16	Normal	-	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
17	Normal	-	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	-	-	-
18	Normal	-	-	-	-	-	-	-	-
19	Normal	-	-	-	-	-	-	-	-
20	Normal	Sí	-	-	-	-	Presenta óxido	-	Sí: sale agua con óxido de la entrada para la toma de lectura
21	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	Válvula antiretorno rota	-	-
22	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
23	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
24	Anómala	-	-	Sí	Sí	Tiene sedimentos	Tiene incrustaciones	-	-
25	Normal	Sí	-	Sí	Sí	Tiene incrustaciones y óxido	Tiene incrustaciones y óxido	-	-
26	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
27	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	Tiene incrustaciones	-	-
28	Normal	-	-	-	-	Obstruido por sedimentos	-	-	-
29	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
30	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	Sí: el contador venía desarmado
31	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
32	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-

33	Normal	Sí	-	-	-	Roto	Tiene incrustaciones	-	-
34	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
35	Anómala	Sí	Sí	-	-	-	-	Sí	-
36	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	Tiene incrustaciones	-	-
37	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
38	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
39	Anómala	Sí	Sí	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	Tiene incrustaciones	Sí	-
40	Anómala	Sí	Sí	-	-	-	Tiene incrustaciones	Sí: deja de medir	-
41	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
42	Normal	Sí	Sí	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
43	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
44	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
45	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
46	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	Tiene incrustaciones y óxido	-	-
47	Normal	Sí	-	-	-	Tiene incrustaciones	Tiene incrustaciones	-	-
48	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
49	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	Tiene incrustaciones	-	-



50	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	Tiene incrustaciones	-	-
51	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
52	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
53	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	Tiene incrustaciones	-	-
54	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
55	Normal	Sí	Sí	-	-	Roto	Tiene incrustaciones	-	-
56	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
57	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
58	Normal	-	-	-	-	-	-	-	-
59	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
60	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
61	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
62	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	Tiene incrustaciones y óxido	-	-
63	Anómala	Sí	-	-	-	Tiene incrustaciones	Tiene incrustaciones	-	-
64	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	-	-	-
65	Normal	Sí	-	-	-	Sin filtro	Tiene incrustaciones	-	-
66	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-

67	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	Tiene incrustaciones	-	-
68	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
69	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	Presenta óxido	-	-
70	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
71	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
72	Normal	Sí	-	-	-	-	Válvula antiretorno rota	-	-
73	Anómala	Sí	-	-	-	Obstruido por sedimentos	-	-	-
74	Normal	Sí	-	-	-	Obstruido por sedimentos	-	-	-
75	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
76	Normal	Sí	Sí	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
77	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
78	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	Tiene incrustaciones	-	-
79	Anómala	Sí	Sí	-	-	Tiene sedimentos	Tiene incrustaciones	Sí: deja de medir	-
80	Normal	Sí	-	-	-	Sin filtro	-	-	-
81	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
82	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	Tiene incrustaciones	-	-

83	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
84	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	Tiene incrustaciones	-	-
85	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
86	Anómala	Sí	Sí	-	-	-	Tiene incrustaciones	Sí: deja de medir y hay una fuga interior porque aparece agua en el totalizador	-
87	Anómala	Sí	Sí	-	-	-	-	-	Sí: el medidor de litros está roto
88	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	Tiene incrustaciones	-	-
89	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
90	Normal	Sí	-	-	-	Sin filtro	Tiene incrustaciones	-	-
91	Anómala	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	Tiene incrustaciones	-	-
92	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
93	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	-	-	-
94	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	-	-	-
95	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-

96	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	-	-	-
97	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
98	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
99	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
100	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
101	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
102	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
103	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos	-	-	-
104	Normal	Sí	-	-	Sí	-	Tiene incrustaciones	-	-
105	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
106	Anómala	Sí	-	-	Sí	-	Tiene incrustaciones	-	-
107	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
108	Normal	Sí	-	-	Sí	-	-	-	-
109	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
110	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
111	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-
112	Normal	Sí	-	-	Sí	Sin filtro	Tiene incrustaciones	-	-
113	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-

114	Normal	Sí	-	-	-	-	Tiene incrustaciones	-	-
115	Anómala	Sí	-	-	Sí	-	Tiene incrustaciones	-	-
116	Normal	Sí	-	-	Sí	-	-	-	-
117	Normal	Sí	-	-	-	Tiene sedimentos (polietileno)	Tiene incrustaciones	-	-
118	Normal	Sí	-	-	-	-	-	-	-

