

# Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO SOBRE LA IDONEIDAD DE LOS  
CONTADORES DE AGUA VOLUMÉTRICOS PARA LA  
MEDICIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO EN UN  
ABASTECIMIENTO

Intensificación: HIDRÁULICA URBANA

Autor:

*OMAR VALERA TALAVERA*

Director:

*FRANCISCO ARREGUI DE LA CRUZ*

*SEPTIEMBRE, 2016*



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

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





### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Estudio sobre la idoneidad de los contadores de agua volumétricos para la medición del consumo doméstico en un abastecimiento

**Título del TFM en inglés:** Volumetric water meter suitability for measuring domestic consumption in a water supply.

**Título del TFM en Valenciano:** Estudi sobre la idoneïtat dels comptadors d'aigua volumètrics per al mesurament del consum domèstic en un abastiment

**Alumno:** Omar Valera Talavera

**Director:** Francisco Arregui de la Cruz

**Codirector/es:**

**Director experimental:**

**Fecha de Lectura:** Septiembre, 2016

### Resumen

Las pérdidas aparentes se presentan como una componente esencial de las pérdidas de agua. Estas son principalmente pérdidas comerciales debidas tanto a consumos ilegales como a errores de facturación o imprecisiones en la medición de los consumos de los contadores de agua. Es por ello, que la idoneidad de un contador no puede evaluarse únicamente atendiendo a sus capacidades metrológicas, habiendo de considerar otros aspectos como la facilidad de manipulación, restricciones en las condiciones de instalación, exigencias respecto a la calidad del agua, fiabilidad de los diversos componentes, etc. En cualquier caso, las imprecisiones en los contadores se presentan como una componente crítica de las pérdidas aparentes y es importante cuantificar la



magnitud de los errores de medición y su evolución en el tiempo para analizar su idoneidad. El trabajo que se propone aborda todos estos aspectos e intenta clarificar bajo qué condiciones la utilización de contadores de agua de tipo volumétrico para medir el consumo residencial es más conveniente que el uso de otras tipologías.

Los contadores volumétricos, como cualquier otro dispositivo de medida, no son instrumentos perfectos y cuando son instalados no son capaces de registrar la cantidad exacta de agua consumida por un usuario. Eso implica que una porción del agua consumida puede no ser registrada y por lo tanto, no facturada al cliente. La principal ventaja de estos dispositivos es que, en teoría, por su principio de funcionamiento, el error inicial es inferior al que se logra con otro tipo de contadores. No obstante, el error inicial, teniendo un peso considerable en el coste del medidor, no es el componente de mayor importancia en la ecuación que evalúa los costes totales del instrumento. Resulta mucho más interesante analizar la velocidad con la que se degrada, en el tiempo o con el volumen registrado, el error de dicho instrumento.

Precisamente ahí radica parte esencial del problema. La metrología de los contadores puede ser afectada por la edad y/o el volumen acumulado y/o la carga de trabajo, dando lugar a lecturas poco precisas. Este tipo de lecturas proporciona información errónea y hace que las fugas sean más difíciles de detectar generando unas pérdidas económicas a la empresa de suministro y a cualquier otra entidad cuyos ingresos dependan de los volúmenes registrados por los contadores. Las técnicas usadas para reducir dichas pérdidas incluyen desde estrategias de control de calidad, pasando por una gestión eficiente de los volúmenes facturados para detectar anomalías, un correcto mantenimiento preventivo, el aseguramiento de una correcta instalación y una renovación adecuada del parque de contadores, así como medidas para luchar contra el consumo no autorizado.

A pesar de esto, el estudio de un parque de contadores resulta algo extremadamente complejo, pues, aumentando aún más la complejidad se debe mencionar que no todos los modelos sufren la misma degradación, incluso perteneciendo a la misma clase



metroológica o tipología de medidor. Este estudio, que debería efectuarse para todos y cada uno de los contadores, con especial atención a los de edad avanzada, debería incluir tanto una inspección visual como un ensayo en un laboratorio de manera regulada y con el fin de determinar si estos son capaces de registrar de manera precisa todo el rango de caudales esperado.

En el contexto del mantenimiento y la renovación del parque de contadores y teniendo en cuenta que el 73% del agua urbana de este país se destina al uso doméstico, se enmarca el presente estudio cuya finalidad consiste en conocer la idoneidad del uso de contadores de tipo volumétrico, también conocidos como contadores de desplazamiento positivo o pistón rotativo, respecto a otras alternativas más extendidas en la actualidad.

Para ello, la primera parte de este trabajo consiste en realizar un análisis de verificación de una muestra de contadores nuevos, para así alcanzar dos objetivos. Por un lado, verificar que estos cumplen lo establecido en la normativa en lo referente a curvas de error y errores máximos permitidos y por otro, obtener una referencia inicial de la curva de error de diferentes modelos para poder establecer una relación con los resultados obtenidos posteriormente.

La segunda parte consiste en un estudio exhaustivo de la metrología de los contadores de tipo volumétrico en uso. A partir de una serie de ensayos realizados en diferentes abastecimientos de todo el mundo se han obtenido las curvas de error de contadores usados de diferentes modelos de contador, así como un parámetro indicador que permite caracterizar el rendimiento real de dichos dispositivos, el error global. A raíz de estos valores, y mediante un modelo de regresión, se ha calculado la velocidad de degradación de dicho error para cada modelo, utilizando para tal fin variables conocidas como son el volumen acumulado y la edad, considerando la fecha en la que fueron instalados.

Por último, con el objetivo de analizar la idoneidad de dicho contador, se establece una comparativa frente al contador empleado a lo largo del tiempo por muchas empresas de



abastecimiento, el contador de chorro único. Esta intercomparación incluye, no solo un análisis de las curvas de error y la velocidad de degradación del error, sino también un análisis económico y otra serie de consideraciones igual de importantes y que no pueden pasarse por alto como son el ruido que generan los medidores volumétricos, la sensibilidad a la calidad del agua, la posición de instalación o la pérdida de carga y que marcarán la elección definitiva del contador a emplear.

## Resum

Les pèrdues aparents es presenten com una component essencial de les pèrdues d'aigua. Aquestes són principalment pèrdues comercials degudes tant a consums il·legals com a errors de facturació o imprecisions en el mesurament dels consums dels comptadors d'aigua. És per açò, que la idoneïtat d'un comptador no pot avaluar-se únicament atenent a les seues capacitats metrològiques, havent de considerar altres aspectes com la facilitat de manipulació, restriccions en les condicions d'instal·lació, exigències respecte a la qualitat de l'aigua, fiabilitat dels diversos components, etc. En qualsevol cas, les imprecisions en els comptadors es presenten com una component crítica de les pèrdues aparents i és important quantificar la magnitud dels errors de mesura i la seua evolució en el temps per a analitzar la seua idoneïtat. El treball que es proposa aborda tots aquests aspectes i intenta aclarir baix quines condicions la utilització de comptadors d'aigua de tipus volumètric per a mesurar el consum residencial és més convenient que l'ús d'altres tipologies.

Els comptadors volumètrics, com qualsevol altre dispositiu de mesura, no són instruments perfectes i quan són instal·lats no són capaços de registrar la quantitat exacta d'aigua consumida per un usuari. Açò implica que una porció de l'aigua consumida pot no ser registrada i per tant, no facturada al client. El principal avantatge d'aquests dispositius és que, en teoria, pel seu principi de funcionament, l'error inicial és inferior al que s'aconsegueix amb un altre tipus de comptadors. No obstant això, l'error inicial, tenint un pes considerable en el cost del mesurador, no és el component de major importància en l'equació que avalua els costos totals de l'instrument. Resulta molt més interessant

analitzar la velocitat amb la qual es degrada, en el temps o amb el volum registrat, l'error d'aquest instrument.

Precisament ací radica una part essencial del problema. La metrologia dels comptadors pot ser afectada per l'edat i/o el volum acumulat i/o la càrrega de treball, donant lloc a lectures poc precises. Aquest tipus de lectures proporciona informació errònia i fa que les fugues siguin més difícils de detectar generant unes pèrdues econòmiques a l'empresa d'abastiment i a qualsevol altra entitat els ingressos de la qual depenguen dels volums registrats pels comptadors. Les tècniques usades per a reduir aquestes pèrdues inclouen des d'estratègies de control de qualitat, passant per una gestió eficient dels volums facturats per a detectar anomalies, un correcte manteniment preventiu, l'assegurament d'una correcta instal·lació i una renovació adequada del parc de comptadors, així com mesures per a lluitar contra el consum no autoritzat.

Malgrat això, l'estudi d'un parc de comptadors resulta extremadament complex, doncs, augmentant encara més la complexitat s'ha d'esmentar que no tots els models pateixen la mateixa degradació, fins i tot pertanyent a la mateixa classe metrological o tipologia de mesurador. Aquest estudi, que hauria d'efectuar-se para tots i cadascun dels comptadors, amb especial atenció als d'edat avançada, hauria d'incloure tant una inspecció visual com un assaig en un laboratori de manera regulada i amb la finalitat de determinar si aquests són capaços de registrar de manera precisa tot el rang de cabals esperat.

En el context del manteniment i la renovació del parc de comptadors i tenint en compte que el 73% de l'aigua urbana d'aquest país es destina a l'ús domèstic, s'emmarca el present estudi la finalitat del qual consisteix en conèixer la idoneïtat de l'ús de comptadors de tipus volumètric, també coneguts com a comptadors de desplaçament positiu o pistó rotatiu, respecte a altres alternatives més esteses en l'actualitat.

Per a açò, la primera part d'aquest treball consisteix a realitzar una anàlisi de verificació d'una mostra de comptadors nous, per a així aconseguir dos objectius. D'una banda, verificar que aquests compleixen l'establert en la normativa referent a corbes d'error i



errors màxims permesos i per un altre, obtenir una referència inicial de la corba d'error de diferents models per a poder establir una relació amb els resultats obtinguts posteriorment.

La segona part consisteix en un estudi exhaustiu de la metrologia dels comptadors de tipus volumètric en ús. A partir d'una sèrie d'assajos realitzats en diferents abastiments de tot el món s'han obtingut les corbes d'error de comptadors desgastats de diferents models de comptador, així com un paràmetre indicador que permet caracteritzar el rendiment real dels dispositius, l'error global. Arran d'aquests valors, i mitjançant un model de regressió, s'ha calculat la velocitat de degradació d'aquest error per a cada model, utilitzant per a aquest fi variables conegudes com són el volum acumulat i l'edat, considerant la data en la qual van ser instal·lats.

Finalment, amb l'objectiu d'analitzar la idoneïtat dels comptadors, s'estableix una comparativa enfront del comptador empleat al llarg del temps per moltes empreses d'abastiment, el comptador de doll únic. Aquesta intercomparació inclou, no solament una anàlisi de les corbes d'error i la velocitat de degradació de l'error, sinó també una anàlisi econòmica i una altra sèrie de consideracions igual d'importantes i que no poden passar-se per alt com són el soroll que generen els mesuradors volumètrics, la sensibilitat a la qualitat de l'aigua, la posició d'instal·lació o la pèrdua de càrrega i que marcaran l'elecció definitiva del comptador a emprar.

### Abstract

Apparent losses are presented as an essential component of water losses. These one are mainly commercial losses due to both illegal consumption and billing errors or inaccuracies in the consumption measurement of water meters. It is for this reason why the suitability of a meter cannot be assessed solely by meeting its metrological capacities, having to take into account other aspects such as ease of handling, restrictions on the installation conditions, demands on water quality, reliability of the various components, etc. In any case, inaccuracies in meters are presented as a critical component of apparent





losses and it is important to quantify the magnitude of measurement errors and their evolution over time to analyze their suitability. The proposed work addresses all these issues and attempts to clarify under what kind of conditions the use of water meters for measuring volumetric residential consumption is more convenient than the use of other types.

Volumetric water meters, like any other measuring device, are not perfect instruments and when installed are unable to log the exact amount of water consumed by a user. This implies that a portion of the water consumed cannot be logged and therefore unbilled to the customer. The main advantage of these devices is that, in theory, by its operating principle, the initial error is less than the one achieved with other meters. However, the initial error, having a considerable weight in the cost of the meter, is not the most important component in the equation that assesses the total cost of the instrument. It is much more interesting to analyze the rate with which degrades the error of that instrument, in time or the registered volume.

And therein lies an essential part of the problem. Meters metrology can be affected by age and/or the accumulated volume and/or workload, resulting in inaccurate readings. This type of readings provides misleading information and causes that leaks are more difficult to detect, generating some economic losses to the water supply and any other entity whose income depends on the volumes registered by meters. The techniques used to reduce such losses range from strategies quality control through efficient management of volumes billed to detect anomalies, correct preventive maintenance, ensuring proper installation and proper renovation of meters and measures to fight unauthorized consumption.

Despite this fact, the study of water meters is extremely complex, thus further increasing the complexity should be mentioned that not all models suffer the same degradation, even belonging to the same metrological class or type of meter. This study, which should be done for each and every one of the meters, with special attention to the eldest ones,



should include both a visual inspection test in a laboratory in a regulated manner and to determine whether they are able to accurately register the full range of expected flows.

In the context of maintenance and renewal of the meters and taking into account that 73% of urban water in this country is addressed to domestic use, the purpose of this study is to know the suitability of using volumetric water meters, also known as positive displacement meters or rotary piston, with regards to other alternatives more widespread today.

To do this, the first part of this paper is an exhaustive analysis of new meters, in order to achieve two objectives. On the one hand, verify that they fulfill with the rules and regulations in relation to error curves and MPE and secondly, to obtain an initial reference of the error curve of different models to establish a relationship with the following results.

The second part comprises an exhaustive study of worn volumetric meters metrology. From a series of tests with different supplies around the world it has been obtained the error curves of different meter models as well as an indicator to characterize the actual performance of such devices, the weighted error. With these values, and using a regression model, it has been calculated the error degradation rate for each model, using known variables as the accumulated volume and the age, considering the date on which they were installed.

Finally, in order to analyze the suitability of the meter, it sets a comparison against the meter used over time by many water supplies, the single-jet meter. This comparison includes not only an analysis of the error curves and the error degradation rate, but also an economic analysis and a number of important considerations that cannot be overlooked such as noise generated by volumetric meters, sensitivity to water quality, the installation position or the pressure loss and that they will determine the final choice.

**Palabras clave español (máximo 5):** Contador volumétrico, errores de medición, pérdidas aparentes, pistón rotativo, parque de contadores



**Palabras clave valenciano (máximo 5):** Comptador volumètric, pistó rotatiu, error de mesurament, pèrdues aparents, parc de comptadors

**Palabras clave inglés (máximo 5):** Volumetric water meter, rotary piston, apparent losses, measurement error.



# ÍNDICE

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introducción.....  | 1  |
| 1.1   | Marco de trabajo .....   | 1  |
| 1.2   | Objetivos .....  | 5  |
| 1.3   | Estructura .....   | 6  |
| 2     | Conceptos básicos sobre contadores de agua; metrología.....      | 9  |
| 2.1   | Parámetros relativos a los contadores.....                       | 9  |
| 2.1.1 | Metrológicos.....  | 9  |
| 2.1.2 | Técnicos .....   | 11 |
| 2.2   | Contadores de pistón rotativo .....                              | 14 |
| 2.3   | Normativa y legislación.....                                     | 19 |
| 2.3.1 | ISO .....  | 19 |
| 2.3.2 | OIML .....   | 27 |
| 2.3.3 | CEN .....  | 28 |
| 3     | Estudio de verificación de contadores nuevos.....                | 31 |
| 3.1   | Estudios previos .....   | 33 |
| 3.2   | Análisis de la curva de error .....                              | 35 |
| 3.2.1 | Análisis de la muestra.....                                      | 35 |
| 3.2.2 | Procedimiento de ensayo .....                                    | 36 |
| 3.2.3 | Obtención de la curva de error.....                              | 38 |
| 3.3   | Cálculo del error global .....                                   | 48 |
| 3.3.1 | Patrón de consumo .....  | 49 |
| 3.3.2 | Error global .....   | 52 |
| 3.4   | Conclusiones.....  | 59 |
| 4     | Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso..... | 63 |
| 4.1   | Descripción de la muestra.....                                   | 63 |
| 4.2   | Análisis de la curva de error .....                              | 70 |
| 4.2.1 | Contadores parados.....  | 71 |
| 4.2.2 | Curvas de error .....  | 71 |
| 4.3   | Cálculo del error ponderado.....                                 | 81 |
| 4.3.1 | Velocidad de degradación según la edad.....                      | 84 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| 4.3.2       | Velocidad de degradación según el volumen acumulado .....                                     | 94  |
| 4.3.3       | Velocidad de degradación del error global en función de la edad y del volumen acumulado ..... | 106 |
| 5           | Comparativa del contador volumétrico frente al contador de chorro único .....                 | 111 |
| 5.1         | Error de medición .....   | 111 |
| 5.2         | Velocidad de degradación .....  | 115 |
| 5.3         | Estudio económico .....   | 122 |
| 5.3.1       | Consideraciones generales .....   | 122 |
| 5.3.2       | Frecuencia de renovación fija .....   | 126 |
| 5.3.3       | Frecuencia de renovación no fija .....  | 129 |
| 5.4         | Otras consideraciones .....   | 132 |
| 5.4.1       | Ruido .....   | 132 |
| 5.4.2       | Sensibilidad a la calidad del agua .....  | 133 |
| 5.4.3       | Sensibilidad a la distorsión del flujo .....  | 134 |
| 5.4.4       | Uniformidad en la calidad de fabricación .....  | 135 |
| 5.4.5       | Posición de instalación .....   | 136 |
| 5.4.6       | Pérdida de carga y bloqueo .....  | 138 |
| 5.4.7       | Caudal circulante en bloqueo .....  | 139 |
| 5.4.8       | Normativa .....   | 139 |
| 6           | Conclusiones .....  | 141 |
| 6.1         | Conclusiones relativas a los contadores nuevos .....  | 141 |
| 6.2         | Conclusiones relativas a la idoneidad .....   | 143 |
| 6.3         | Futuras líneas de investigación .....   | 145 |
| 7           | Referencias .....   | 147 |
| 7.1         | Referencias bibliográficas .....  | 147 |
| 7.2         | Referencias legislativas .....  | 148 |
| Anexo A     | Cálculos y figuras .....  | 151 |
| Anexo A.1   | Descripción de la muestra .....   | 151 |
| Anexo A.2   | Curvas de error .....   | 159 |
| Anexo A.3   | Velocidades de degradación .....  | 167 |
| Anexo A.3.1 | Grupos de edad .....  | 167 |
| Anexo A.3.2 | Grupos de volumen acumulado .....   | 170 |
| Anexo A.4   | Regresiones .....   | 174 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1. Riesgos e impacto que tienen en la sociedad. Fuente: Global Risks Perception Survey 2015. ....   | 2  |
| Figura 1.2. Tabla de balance hídrico (fuente:IWA).....   | 4  |
| Figura 2.1. Curva de error de un contador de chorro único y de un contador volumétrico   | 10 |
| Figura 2.2 Principio de funcionamiento de un contador de pistón rotativo .....   | 14 |
| Figura 2.3. Partes de un contador de pistón rotativo (Arregui, et al., 2007) .....   | 16 |
| Figura 2.4. Engranajes de un contador volumétrico (Cortesía Itron) .....   | 16 |
| Figura 2.5. Curva de error teórica de un contador volumétrico.....   | 18 |
| Figura 2.6. Curva de error teórica para un contador volumétrico de edades diferentes.....  | 18 |
| Figura 3.1. Curvas de error de los contadores del modelo N1.....   | 39 |
| Figura 3.2. Curvas de error de los contadores del modelo N2 .....  | 40 |
| Figura 3.3. Curvas de error de los contadores del modelo N3 .....  | 41 |
| Figura 3.4. Curvas de error de los contadores del modelo N4 .....  | 43 |
| Figura 3.5. Curvas de error promedio de los diferentes modelos e intervalos de confianza .....   | 44 |
| Figura 3.6. Curva de error promedio de los modelos A1 y A2 y límites de error (Bowen, et al., 1991) (Barfus, et al., 2011) .....                       | 45 |
| Figura 3.7. Curva de error promedio de los diferentes modelos y límites de error (Arregui, et al., 2014) .....   | 46 |
| Figura 3.8. Diagrama de caja y bigotes para los diferentes modelos .....   | 47 |
| Figura 3.9. Curvas de error de los diferentes modelos analizados (1) .....   | 48 |
| Figura 3.10. Curvas de error de los diferentes modelos analizados (2) .....  | 48 |
| Figura 3.11. Patrón de consumo: Tipo I.....  | 49 |
| Figura 3.12. Patrón de consumo: Tipo II.....   | 50 |
| Figura 3.13. Patrón de consumo: AWWA.....  | 51 |
| Figura 3.14. Patrón de consumo: SEQREUS .....  | 51 |
| Figura 3.15. Error global para cada contador en función del patrón de consumo .....  | 54 |
| Figura 3.16. Error global en función de los diferentes patrones de consumo para los modelos A1 y A2 (Bowen, et al., 1991) (Barfus, et al., 2011) ..... | 56 |
| Figura 3.17. Error global para los diferentes modelos según distintos patrones de consumo (Arregui, et al., 2014).....                                 | 57 |
| Figura 3.18. Comparativa del error global para los diferentes modelos y patrones de consumo .....  | 58 |
| Figura 4.1. Imágenes de los diferentes modelos analizados.....   | 64 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.2. Edad de la muestra disgregada por abastecimientos.....   | 69 |
| Figura 4.3. Resumen del volumen acumulado de la muestra por abastecimientos .....  | 70 |
| Figura 4.4. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento A .....  | 72 |
| Figura 4.5. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento B.....   | 73 |
| Figura 4.6. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento C.....   | 74 |
| Figura 4.7. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento D (M7, M8) .....   | 75 |
| Figura 4.8. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento D (M9, M10) .....  | 75 |
| Figura 4.9. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento D (M11, M12) .....   | 76 |
| Figura 4.10. Evolución de los caudales de ensayo para los contadores del abastecimiento A, B, y C en función del volumen acumulado ..... | 77 |
| Figura 4.11. Evolución de los caudales de ensayo para los contadores del abastecimiento D en función del volumen acumulado.....          | 79 |
| Figura 4.12. Curvas de error para el caso particular del modelo M4 .....   | 81 |
| Figura 4.13. Patrón de consumo: Tipo I.....  | 82 |
| Figura 4.14. Función de densidad del error global para cada abastecimiento.....  | 84 |
| Figura 4.15. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M1 y M2.....                             | 85 |
| Figura 4.16. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M1, M2) ..   | 85 |
| Figura 4.17. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M3 y M4.....                             | 86 |
| Figura 4.18. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M3, M4) .  | 87 |
| Figura 4.19. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M5 y M6 .....                            | 88 |
| Figura 4.20. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M5, M6).   | 89 |
| Figura 4.21. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M7 y M8 .....                            | 90 |
| Figura 4.22. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M7, M8).   | 90 |
| Figura 4.23. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M9 y M10.....                            | 91 |
| Figura 4.24. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M9, M10)   | 92 |
| Figura 4.25. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M11 y M12.....                           | 93 |
| Figura 4.26. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M11, M12)  | 93 |
| Figura 4.27. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M1 y M2.....                            | 95 |
| Figura 4.28. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M1, M2)   | 95 |



|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.29. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M3 y M4.....                 | 96  |
| Figura 4.30. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M3, M4) .....                                  | 97  |
| Figura 4.31. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M5 y M6 .....                | 98  |
| Figura 4.32. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M5, M6) .....                                  | 98  |
| Figura 4.33. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M7 y M8 .....                | 99  |
| Figura 4.34. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M7, M8) .....                                  | 100 |
| Figura 4.35. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M9 y M10.....                | 101 |
| Figura 4.36. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M9, M10) .....                                 | 102 |
| Figura 4.37. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M11 y M12.....               | 103 |
| Figura 4.38. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M11, M12) .....                                | 103 |
| Figura 4.39. Valores de $R^2$ y $R^2$ ponderado en función del tamaño de la muestra para la variable edad.....                | 105 |
| Figura 4.40. Valores de $R^2$ y $R^2$ ponderado en función del tamaño de la muestra para la variable volumen acumulado.....   | 106 |
| Figura 4.41. Valores de $R^2$ función de la muestra para el modelo conjunto edad-volumen .....                                | 108 |
| Figura 5.1. Curva de error de un contador de chorro único y un contador volumétrico (Edad: 0 años, Volumen= $0m^3$ ).....     | 112 |
| Figura 5.2. Curva de error de un contador de chorro único y un contador volumétrico (Edad: 0 años, volumen: $2000m^3$ ) ..... | 113 |
| Figura 5.3. Curva de error de un contador de chorro único y un contador volumétrico (Edad: 10 años, volumen: $2000m^3$ )..... | 113 |
| Figura 5.4. Curva de error de un contador de chorro único y un contador volumétrico (Edad: 8 años).....                       | 113 |
| Figura 5.5. Evolución del error de los caudales de ensayos para diferentes volúmenes acumulados.....                          | 114 |
| Figura 5.6. Velocidad de degradación de un contador de chorro único en función de la edad .....                               | 116 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.7. Velocidad de degradación de un contador de chorro único en función del volumen .....   | 116 |
| Figura 5.8. Degradación del error global en función de la edad para contadores con un volumen de 500m <sup>3</sup> .....   | 118 |
| Figura 5.9. Degradación del error global en función de la edad para contadores con un volumen de 2000m <sup>3</sup> .....  | 119 |
| Figura 5.10. Degradación del error global en función de la edad para contadores con un volumen de 4000m <sup>3</sup> .....   | 119 |
| Figura 5.11. Degradación del error global en función de la edad para un contador con volumen de 500m <sup>3</sup> .....  | 120 |
| Figura 5.12. Degradación del error global en función de la edad para un contador con volumen de 2000m <sup>3</sup> .....   | 121 |
| Figura 5.13. Degradación del error global en función de la edad para un contador con volumen de 4000m <sup>3</sup> .....   | 121 |
| Figura 5.14. Contador volumétrico instalado en el interior de una vivienda.....  | 132 |
| Figura 5.15. Obstrucción parcial del filtro de un contador de chorro único (izquierda), filtro en un contador volumétrico (derecha) y pistón de un contador volumétrico (centro) ..... | 133 |
| Figura 5.16. Carcasa de un contador de chorro único con circuito en derivación (Arregui, et al., 2007).....  | 135 |
| Figura 5.17. Contactos entre la turbina y los apoyos (Arregui, et al., 2007) .....   | 137 |
| Figura 5.18. Contadores de chorro único instalados en posición vertical (Arregui, et al., 2007) .....  | 137 |
| Figura 5.19. Marcado de un contador de chorro único (izquierda) y un contador volumétrico (derecha).....   | 138 |
| Figura 5.20. Curva de error de un contador volumétrico obtenida del catálogo de un fabricante.....   | 139 |
| Figura 5.21. Curva de error de un contador volumétrico salido de fábrica.....  | 140 |
| Figura 6.1. VAN función del tipo de contador para una frecuencia de renovación de 10 años .....  | 144 |
| Figura 6.2. Frecuencia de renovación que maximiza el VANC en función del tipo de contador .....  | 145 |
| Figura A.1. Distribución de la muestra de contadores del modelo M1 en función de la edad .....   | 151 |
| Figura A.2. Distribución de la muestra de contadores del modelo M1 en función del volumen .....  | 151 |
| Figura A.3. Distribución de la muestra de contadores del modelo M2 en función de la edad .....   | 151 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura A.4. Distribución de la muestra de contadores del modelo M2 en función del volumen .....   | 152 |
| Figura A.5. Distribución de la muestra de contadores del modelo M3 en función de la edad .....    | 152 |
| Figura A.6. Distribución de la muestra de contadores del modelo M3 en función del volumen .....   | 152 |
| Figura A.7. Distribución de la muestra de contadores del modelo M4 en función de la edad .....    | 153 |
| Figura A.8. Distribución de la muestra de contadores del modelo M4 en función del volumen .....   | 153 |
| Figura A.9. Distribución de la muestra de contadores del modelo M5 en función de la edad .....    | 153 |
| Figura A.10. Distribución de la muestra de contadores del modelo M5 en función del volumen .....  | 154 |
| Figura A.11. Distribución de la muestra de contadores del modelo M6 en función de la edad .....   | 154 |
| Figura A.12. Distribución de la muestra de contadores del modelo M6 en función del volumen .....  | 154 |
| Figura A.13. Distribución de la muestra de contadores del modelo M7 en función de la edad .....   | 155 |
| Figura A.14. Distribución de la muestra de contadores del modelo M7 en función del volumen .....  | 155 |
| Figura A.15. Distribución de la muestra de contadores del modelo M8 en función de la edad .....   | 155 |
| Figura A.16. Distribución de la muestra de contadores del modelo M8 en función del volumen .....  | 156 |
| Figura A.17. Distribución de la muestra de contadores del modelo M9 en función de la edad .....   | 156 |
| Figura A.18. Distribución de la muestra de contadores del modelo M9 en función del volumen .....  | 156 |
| Figura A.19. Distribución de la muestra de contadores del modelo M10 en función de la edad .....  | 157 |
| Figura A.20. Distribución de la muestra de contadores del modelo M10 en función del volumen ..... | 157 |
| Figura A.21. Distribución de la muestra de contadores del modelo M11 en función de la edad .....  | 157 |
| Figura A.22. Distribución de la muestra de contadores del modelo M11 en función del volumen ..... | 158 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura A.23. Distribución de la muestra de contadores del modelo M12 en función de la edad .....      | 158 |
| Figura A.24. Distribución de la muestra de contadores del modelo M12 en función del volumen .....     | 158 |
| Figura A.25. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M1.....                     | 159 |
| Figura A.26. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M1 .....                   | 159 |
| Figura A.27. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M2 .....                    | 159 |
| Figura A.28. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M2.....                    | 160 |
| Figura A.29. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M3 .....                    | 160 |
| Figura A.30. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M3.....                    | 160 |
| Figura A.31. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M4.....                     | 161 |
| Figura A.32. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M4.....                    | 161 |
| Figura A.33. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M5 .....                    | 161 |
| Figura A.34. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M5.....                    | 162 |
| Figura A.35. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M6 .....                    | 162 |
| Figura A.36. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M6.....                    | 162 |
| Figura A.37. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M7 .....                    | 163 |
| Figura A.38. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M7.....                    | 163 |
| Figura A.39. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M8 .....                    | 163 |
| Figura A.40. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M8.....                    | 164 |
| Figura A.41. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M9.....                     | 164 |
| Figura A.42. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M9.....                    | 164 |
| Figura A.43. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M10 .....                   | 165 |
| Figura A.44. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M10.....                   | 165 |
| Figura A.45. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M11 .....                   | 165 |
| Figura A.46. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M11.....                   | 166 |
| Figura A.47. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M12 .....                   | 166 |
| Figura A.48. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M12.....                   | 166 |
| Figura A.49. Degradación lineal del error global en función de la edad para el abastecimiento A.....  | 167 |
| Figura A.50. Degradación lineal del error global en función de la edad para el abastecimiento B ..... | 167 |
| Figura A.51. Degradación lineal del error global en función de la edad para el abastecimiento C.....  | 168 |
| Figura A.52. Degradación del error global en función de la edad para el abastecimiento D .....        | 168 |
| Figura A.53. Degradación del error global en función de la edad para el abastecimiento D .....        | 169 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura A.54. Degradación del error global en función de la edad para el abastecimiento D .....            | 169 |
| Figura A.55. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento A.....  | 170 |
| Figura A.56. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento B ..... | 171 |
| Figura A.57. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento C.....  | 171 |
| Figura A.58. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento D.....  | 172 |
| Figura A.59. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento D.....  | 172 |
| Figura A.60. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento D.....  | 173 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2.1. Características metrológicas de contadores de pistón rotativo de clase C .....   | 17 |
| Tabla 2.2. Valores admisibles para caudal permanente .....  | 22 |
| Tabla 2.3. Valores admisibles para el ratio $Q_3/Q_1$ .....   | 22 |
| Tabla 2.4. Clases de contador según la presión máxima de trabajo (izquierda) y según la pérdida de presión máxima (derecha).....    | 23 |
| Tabla 2.5. Clases de contador según la temperatura de trabajo .....   | 24 |
| Tabla 2.6. Clases de contador según la sensibilidad a distorsiones producidas aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha)..... | 24 |
| Tabla 2.7. Rangos mínimos de lectura para el dispositivo indicador .....  | 25 |
| Tabla 2.8. Clases de precisión.....   | 26 |
| Tabla 3.1. Error promedio de los modelos A1 y A2 (Bowen et Barfuss).....  | 33 |
| Tabla 3.2. Características metrológicas de los modelos Na y Nb (Arregui F.J. et al.) .....  | 34 |
| Tabla 3.3. Características metrológicas de los modelos Nc y Nd.....   | 34 |
| Tabla 3.4. Error promedio para cada modelo.....   | 34 |
| Tabla 3.5. Características metrológicas de los modelos N1 y N2 .....  | 35 |
| Tabla 3.6. Características metrológicas de los modelos N3 y N4 .....  | 36 |
| Tabla 3.7. Caudales de ensayo y orden en el que se han llevado a cabo.....  | 37 |
| Tabla 3.8. Error de ensayo de los diferentes contadores para el modelo N1.....  | 39 |
| Tabla 3.9. Error de ensayo de los diferentes contadores para el modelo N2 .....   | 40 |
| Tabla 3.10. Error de ensayo de los diferentes contadores para el modelo N3.....   | 41 |
| Tabla 3.11. Error de ensayo de los diferentes contadores para el modelo N4 .....  | 42 |
| Tabla 3.12. Desviación, error estándar e intervalos de confianza para caudal de 7.5l/h .....  | 44 |
| Tabla 3.13. Datos básicos sobre los estudios de los patrones de consumo de agua.....  | 52 |
| Tabla 3.14. Ejemplo de cálculo del error global de un contador.....   | 53 |
| Tabla 3.15. Error global de cada contador del modelo N1 en función del patrón de consumo .....                                      | 55 |
| Tabla 3.16. Error global de cada contador del modelo N2 en función del patrón de consumo .....                                      | 55 |
| Tabla 3.17. Error global de cada contador del modelo N3 en función del patrón de consumo .....                                      | 55 |
| Tabla 3.18. Error global de cada contador del modelo N4 en función del patrón de consumo .....                                      | 56 |
| Tabla 3.19. Error global promedio por modelo y patrón de consumo.....   | 60 |
| Tabla 4.1. Características metrológicas y número de contadores ensayados en función del abastecimiento y del modelo.....            | 65 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 4.2. Distribución de modelos por grupos de edad.....  | 66  |
| Tabla 4.3. Distribución de modelos por grupos de volumen.....   | 66  |
| Tabla 4.4. Caudales de ensayo para los contadores de los abastecimientos A, B, C y D ...  | 70  |
| Tabla 4.5. Contadores parados según los distintos modelos.....  | 71  |
| Tabla 4.6. Error global promedio en función de la edad y del modelo de contador.....  | 82  |
| Tabla 4.7. Error global promedio en función del volumen acumulado y del modelo de contador .....                                  | 83  |
| Tabla 4.8. Parámetros estadísticos de la regresión (M1, M2).....  | 86  |
| Tabla 4.9. Parámetros estadísticos de la regresión (M3, M4).....  | 87  |
| Tabla 4.10. Parámetros estadísticos de la regresión (M5, M6) .....  | 89  |
| Tabla 4.11. Parámetros estadísticos de la regresión (M7, M8).....   | 91  |
| Tabla 4.12. Parámetros estadísticos de la regresión (M9, M10).....  | 92  |
| Tabla 4.13. Parámetros estadísticos de la regresión (M11, M12).....   | 94  |
| Tabla 4.14. Parámetros estadísticos de la regresión (M1, M2).....   | 96  |
| Tabla 4.15. Parámetros estadísticos de la regresión (M3, M4) .....  | 97  |
| Tabla 4.16. Parámetros estadísticos de la regresión (M5, M6) .....  | 99  |
| Tabla 4.17. Parámetros estadísticos de la regresión (M7, M8) .....  | 100 |
| Tabla 4.18. Parámetros estadísticos de la regresión (M9, M10).....  | 102 |
| Tabla 4.19. Valores de $R^2$ y $R^2$ ponderado en función del modelo de contador para la variable edad .....                      | 104 |
| Tabla 4.20. Valores de $R^2$ y $R^2$ ponderado en función del modelo de contador para la variable volumen .....                   | 105 |
| Tabla 4.21. Combinaciones efectuadas para obtener la velocidad de degradación.....  | 107 |
| Tabla 4.22. Parámetros de regresión conjunta edad-volumen acumulado para cada modelo de contador .....                            | 107 |
| Tabla 4.23. Valores de $R^2$ para los diferentes modelos de regresión en función de las variables del modelo .....                | 108 |
| Tabla 4.24. Ecuación de degradación del error global para cada modelo de contador....   | 109 |
| Tabla 5.1. Parámetros estadísticos de la regresión simple .....   | 117 |
| Tabla 5.2. Parámetros estadísticos de la regresión múltiple.....  | 117 |
| Tabla 5.3. Parámetros para definir el modelo económico de un abastecimiento.....  | 125 |
| Tabla 5.4. Opciones para los diferentes modelos de contador.....  | 126 |
| Tabla 5.5. Valor Actual Neto y error global para diferentes modelos de contador.....  | 126 |
| Tabla 5.6. Valor Actual Neto y error global para diferentes modelos de contador y un precio del agua de 0.3€/m <sup>3</sup> ..... | 127 |
| Tabla 5.7. Frecuencia de renovación según el tipo de contador acorde al RD 244/2016..   | 128 |
| Tabla 5.7. VANC y Frecuencia Óptima de Renovación para los diferentes modelos de contador .....                                   | 130 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 5.8.VANC y Frecuencia Óptima de Renovación para los diferentes modelos de contador .....               | 131 |
| Tabla 6.1. Error global para diferentes modelos y patrones de consumo .....                                  | 142 |
| Tabla 6.2. Comparación de variables entre un contador de pistón rotativo y un contador de chorro único ..... | 143 |
| Tabla A.1. Parámetros estadísticos de la regresión (M1, M2).....   | 167 |
| Tabla A.2. Parámetros estadísticos de la regresión (M3, M4) .....  | 168 |
| Tabla A.3. Parámetros estadísticos de la regresión (M5, M6) .....  | 168 |
| Tabla A.4. Parámetros estadísticos de la regresión (M7, M8) .....  | 169 |
| Tabla A.5. Parámetros estadísticos de la regresión (M9, M10).....  | 169 |
| Tabla A.6. Parámetros estadísticos de la regresión (M11, M12).....   | 170 |
| Tabla A.7. Parámetros estadísticos de la regresión (M1, M2) .....  | 170 |
| Tabla A.8. Parámetros estadísticos de la regresión (M3, M4) .....  | 171 |
| Tabla A.9. Parámetros estadísticos de la regresión (M5, M6) .....  | 171 |
| Tabla A.10. Parámetros estadísticos de la regresión (M7, M8).....  | 172 |
| Tabla A.11. Parámetros estadísticos de la regresión (M9, M10).....   | 172 |
| Tabla A.12. Parámetros estadísticos de la regresión (M11, M12) .....   | 173 |







# 1 Introducción

## 1.1 Marco de trabajo

A lo largo de la historia, la humanidad ha estado muy ligada a la disponibilidad de agua en el planeta. Por todo el mundo es conocido, y así ha sido estudiado, que las grandes civilizaciones han crecido y se han desarrollado en emplazamientos cercanos a fuentes de agua con el fin de garantizar su supervivencia. Muchas ciudades vivieron tanto su esplendor como su decadencia debido a fenómenos climáticos producidos en ese momento, ya que tenían una total dependencia del agua y muchas ciudades llegaron a su colapso por la falta de esta.

En la actualidad, en las grandes ciudades se pueden encontrar ciertas semejanzas frente a las antiguas civilizaciones. Si bien el tamaño de la población a día de hoy no es comparable, sí continúan teniendo problemas similares como es la dependencia del agua.

Con el paso del tiempo, el debate sobre la cantidad de recursos hídricos, tanto en España como en Europa, está cada vez más presente, sobre todo, teniendo en cuenta la escasez de lluvias que acontece al país en la última década. La tendencia descendente de las precipitaciones a lo largo de los años ha dado lugar a los climas más secos en la historia de muchas provincias.

Asimismo, el aumento del número de habitantes, indiscutiblemente ligado a una demanda de agua creciente, ha supuesto una sobreexplotación de los recursos hídricos, con el consiguiente deterioro del medio ambiente.

Según el "Global Risk Report" de 2016 (Figura 1.1), que corresponde con un informe que publica el Foro Económico Mundial todos los años, la crisis del agua es el problema con mayor impacto a nivel social y el tercer problema a nivel global. Además, hay que ser consciente de que la lucha contra uno de los mayores retos de la humanidad continúa, el cambio climático.

## 1. Introducción

Tanto el cambio climático como la disponibilidad de agua dulce, problemas ambientales a nivel global, hace necesario llevar a cabo una serie de herramientas de medición para tratar de abarcar esta situación, comenzando por conocer su tendencia y evaluar cómo evoluciona. Una vez conocida esta tendencia, se debe tratar de actuar en consecuencia.

Con todo esto, la Directiva Marco del Agua (DMA) es la encargada de establecer una serie de actuaciones para asegurar la protección de las aguas y promover el uso sostenible que garantice la disponibilidad del recurso hídrico. Para alcanzar ese objetivo, la DMA promueve modelos de gestión eficientes. Modelos, que no podrían llevarse a cabo sin un control adecuado y una medición precisa de los volúmenes inyectados en las redes de distribución.

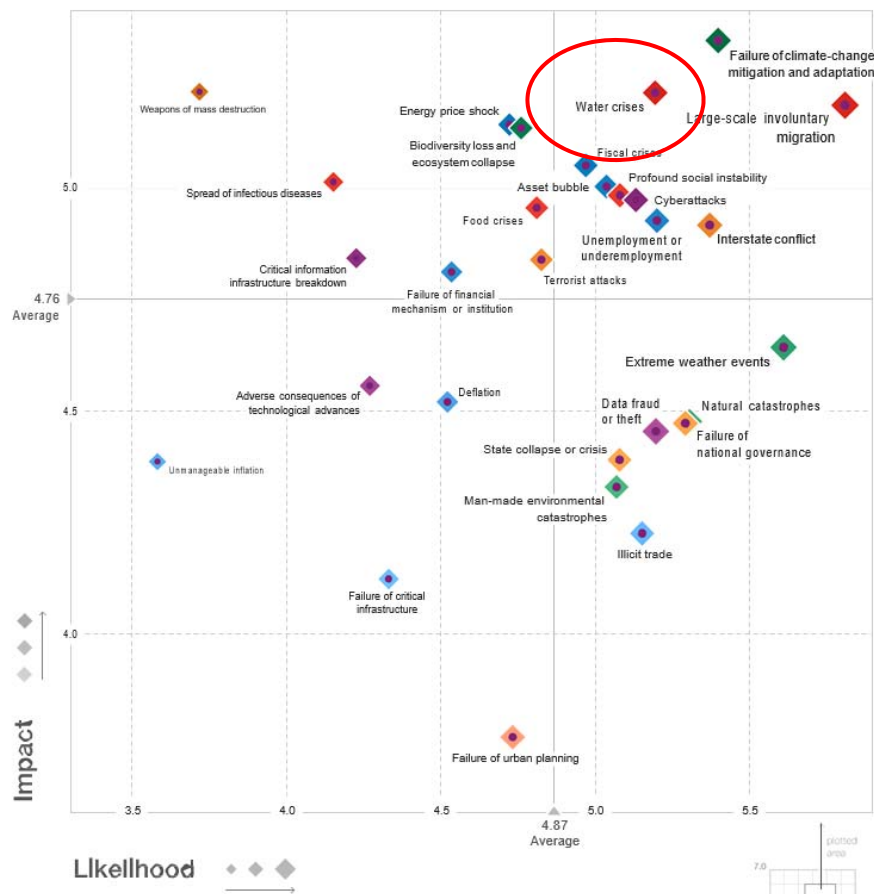


Figura 1.1. Riesgos e impacto que tienen en la sociedad. Fuente: Global Risks Perception Survey 2015.

La iniciativa que promueve la DMA solo se puede llevar a cabo a través de contadores de agua, instrumentos capaces tanto de evaluar como de verificar dicha labor. Estos dispositivos destacan tanto por su precisión como por su seguridad y permiten definir una serie de parámetros para conseguir tanto la recuperación de costes del sistema como

establecer una serie de políticas tarifarias para incentivar el uso adecuado de este recurso tan valioso.

La utilización de medidores es fundamental en todos los ciclos de uso del agua, comenzando por la captación, pasando por el tratamiento y distribución y acabando por el suministro de agua, así como para su retorno al cauce natural.

Con todo esto, los contadores domésticos proporcionan información para conocer el rendimiento de las redes de agua urbanas. Es por eso que disponer de un parque de contadores actualizado y en un estado óptimo es la base para una gestión integral ya que permite llevar a cabo políticas para la recuperación de costes y promover hábitos de uso sostenible.

Por otro lado, el mantenimiento y la renovación del parque de contadores se ve afectado por una serie de variables técnicas y económicas que cuando no se llevan a cabo de manera efectiva da lugar a un aumento del precio del agua por metro cúbico y que conlleva inevitablemente una repercusión sobre el consumidor final.

Por consiguiente, la fecha de renovación del contador en un abastecimiento, pese a que es importante conocerla, no es sencilla de determinar, y mucho menos recomendable es establecer un periodo fijo para todos los abastecimientos independientemente del tipo de contador. No solo porque estos no sean función del tiempo que lleven instalados y proporcionando un servicio sino porque también deben considerarse otro tipo de factores como el volumen acumulado por dichos contadores, la calidad del agua, el tipo de medidor, el patrón de consumo, el precio del agua, la política tarifaria y por último y no menos importante, la calidad del contador.

Es por esto que la utilización de equipos de medición adecuados y políticas que incentiven el mantenimiento y la renovación correcta de contadores es fundamental para garantizar el cumplimiento de los parámetros que la normativa especifica. Por ello, la renovación de un parque de contadores no debería basarse únicamente en los años que llevan instalados sino en una serie de criterios que abarquen un mayor número de variables.

En el año 2000, la IWA (International Water Association), con el objetivo de realizar un control y una gestión del agua adecuada, publicó un balance para poder clasificar el volumen de agua entrante en el sistema y así gestionar adecuadamente cada uno de los bloques a los cuales hace referencia.

| Entrada de agua al sistema   |                       |                                 |                       |                       |                     |   |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---|
| Consumo autorizado           |                       |                                 |                       | Pérdidas de agua      |                     |   |
| Consumo autorizado facturado |                       | Consumo autorizado no facturado |                       | Pérdidas aparentes    |                     | Pérdidas reales   |
| Consumo registrado           | Consumo no registrado | Consumo registrado              | Consumo no registrado | Consumo no autorizado | Errores de medición | Fugas en conducciones, desbordes en tanques de almacenamiento y conexiones del servicio |
| Volumen facturado            |                       | Volumen no facturado            |                       |                       |                     |   |

Figura 1.2. Tabla de balance hídrico (fuente:IWA)

Como se ha indicado anteriormente, para lograr una equidad en la distribución de los costes derivados del abastecimiento de agua a los usuarios, los hogares están dotados con equipos de medida para poder repartir así los costes en función del uso del recurso que cada hogar realiza.

Esta, entre otras, es una de las razones por las que la instalación de contadores es una herramienta fundamental para mejorar la gestión técnica de abastecimiento de agua y poder reducir así las pérdidas en la red.

Sin embargo, como se observa en el balance hídrico de la IWA (Figura 1.2), el error de medición, que engloba tanto los errores en la medición de contadores como en el tratamiento de datos, representa una parte importante en la componente de pérdidas aparentes.

El problema clave que atañe a los contadores proviene de su incapacidad de registrar el consumo de agua con la misma exactitud para cualquier caudal circulante a través de estos. Esto implica que el error de un medidor no es constante en todo el rango de medición y mientras que a caudales medios y altos los errores suelen ser mínimos, a caudales bajos este error varía de manera notable y por tanto su curva de error evoluciona bruscamente desde el caudal de arranque hasta un nivel estable cercano al caudal mínimo.

## 1.2 Objetivos

A raíz tanto de la iniciativa que promueve la DMA como del balance hídrico propuesto por la IWA con el fin de acotar los errores que se producen en cada bloque, y consciente de la problemática que puede provocar un error elevado en un contador instalado en una vivienda, este trabajo va a basar su estudio en los contadores de desplazamiento positivo, también conocidos como contadores volumétricos, con el siguiente fin.

Contadores volumétricos nuevos:

- Determinación del error de un contador volumétrico salido de fábrica para así conocer cuál es el volumen de agua inicial que no son capaces de registrar una vez sean instalados.
- Análisis de sensibilidad entre diferentes patrones de consumo para ver cómo afecta al cálculo del error global distintos hábitos de consumo.

Contadores volumétricos en uso:

- Determinación de la velocidad de degradación de una muestra de contadores volumétricos.
- Análisis de la idoneidad del contador volumétrico frente al contador de chorro único estableciendo una comparativa entre ambos modelos no solo a partir de las curvas de error o la velocidad de degradación de ambos, sino también a partir de la

frecuencia óptima de renovación, la sensibilidad a la calidad del agua, la orientación y otros parámetros que marcarán la elección definitiva del contador a emplear.

### 1.3 Estructura

El presente documento se estructura en siete capítulos, presentándose en el último capítulo en forma de listado las referencias utilizadas y consultadas tanto bibliográficas como legislativas.

El Capítulo 1 recoge la introducción. En este se presentan los antecedentes relacionados con el proyecto así como una síntesis hasta la actualidad y los objetivos que se persiguen en este Trabajo Final de Máster.

El Capítulo 2 expone una visión global en lo referente a la metrología propia de los contadores de agua. Se detallan tanto los parámetros metrológicos como técnicos así como una breve explicación del funcionamiento de los contadores de desplazamiento positivo. Por último, se presenta una revisión general sobre la normativa referente a los contadores de agua haciendo hincapié en la Norma ISO 4064 y sus diferentes versiones.

En el Capítulo 3 se lleva a cabo una recopilación de estudios anteriores sobre contadores volumétricos nuevos de desplazamiento positivo. Posteriormente, se realiza un análisis de verificación de contadores volumétricos nuevos y se establece una comparativa con los anteriores. A partir de una serie de medidores de diferentes modelos se lleva a cabo un estudio de la curva de error y de su error global. Además, los resultados se comparan con diferentes patrones de consumo obtenidos de diferentes estudios y se comprueba si la curva de error de dichos contadores cumple con la Normativa actual.

El Capítulo 4 presenta un estudio detallado de 12 modelos de contador volumétrico de diferentes abastecimientos y con diferente número de muestra. Tanto la curva de error como el error global se obtienen para cada contador y para cada modelo a partir de las dos variables que más afectan a un contador como son la edad y el volumen acumulado.



A partir de estos valores y mediante una serie de regresiones, se obtiene la velocidad de degradación del error global para cada modelo.

En el Capítulo 5 y a partir de los resultados del capítulo anterior, se establece una comparativa entre el contador volumétrico y el contador de chorro único, considerando para este último, datos de otros estudios. La relación se establece no solo con sus curvas de error o su tasa de degradación sino con otras consideraciones como pueden ser el ruido, la sensibilidad a la calidad del agua o la posición de instalación. Además, se calcula el Valor Actual Neto de las diferentes inversiones y se propone un periodo óptimo de renovación para los diferentes modelos.

En el Capítulo 6 se recopilan las principales conclusiones que se desprenden del presente Trabajo Final de Máster así como las futuras líneas de investigación de este.

Por último, los Anexos recogen tanto cálculos, tablas y figuras no incluidas en la memoria del trabajo.



## 2 Conceptos básicos sobre contadores de agua; metrología

El objetivo de este capítulo pretende por un lado definir los parámetros básicos de los contadores, tanto metrológicos como técnicos y por otro, dar una visión global de la normativa actualmente en vigor relativa a los contadores de agua, destacando sus aspectos más interesantes y estableciendo algunas comparaciones de marcada relevancia.

### 2.1 Parámetros relativos a los contadores

#### 2.1.1 Metrológicos

Se puede definir como parámetro metrológico aquel tipo de parámetro que está relacionado de manera directa con el funcionamiento del contador. Esto implica, como es de esperar, una medición adecuada del volumen de agua que atraviesa dicho contador. Los parámetros a destacar son los siguientes:

- Volumen real: corresponde con el volumen de agua que circula por el contador en un periodo de tiempo determinado. A raíz de este parámetro se define el concepto de caudal real como la relación entre el volumen real y ese periodo de tiempo.
- Volumen medido: corresponde con la lectura mostrada por el contador asociada a un determinado volumen real. De la misma manera, el caudal medido se define como la relación entre el volumen medido y el tiempo transcurrido durante dicha medición.
- Error de medición absoluto: es la diferencia entre el volumen real y el volumen medido. Esta diferencia tiene unidades de volumen y puede ser tanto positiva (sobrecontaje) como negativa (subcontaje).

- Error de medición relativo: es el cociente entre el error de medición absoluto y el volumen real. Se trata de un parámetro adimensional y suele expresarse en tanto por cien.
- Curva de error del contador: debido a que el error de medición relativo de un contador no es constante en todo el rango de caudales, la curva de error se puede definir como la representación gráfica entre el error de medición y el caudal circulante.

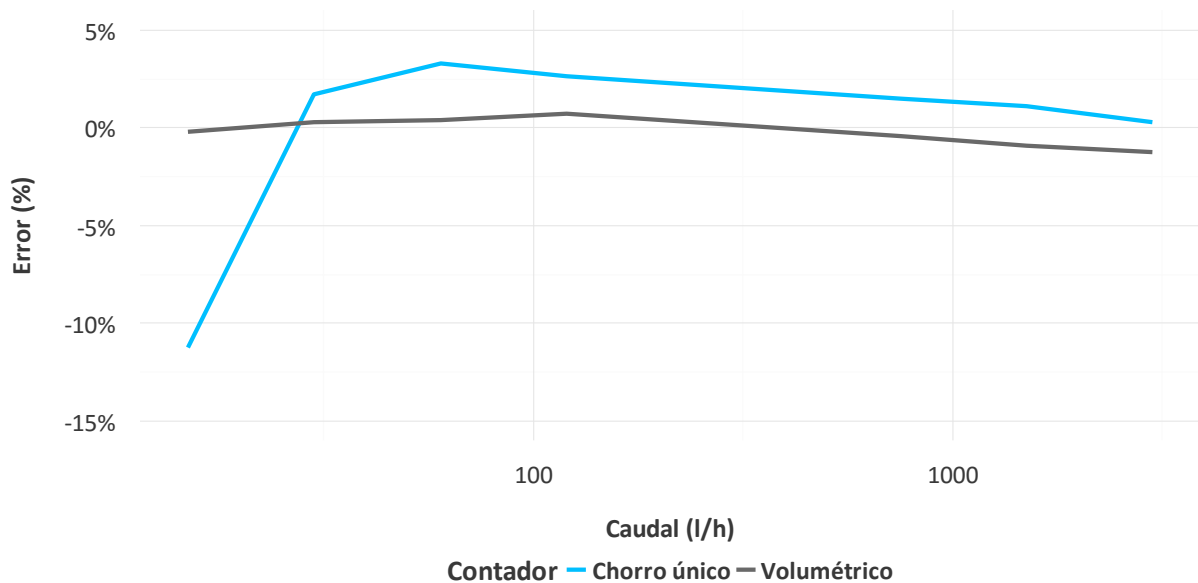


Figura 2.1. Curva de error de un contador de chorro único y de un contador volumétrico

Debido a que la calidad metrológica de un contador está directamente relacionada con su curva de error, las diferentes normativas definen esta calidad por medio de unos caudales característicos. Esto es, un modelo de contador será más exigente cuando el caudal que tenga que cumplir sea menor. Los caudales marcados por la normativa son los siguientes:

- $Q_1$  - (Caudal mínimo): es el valor mínimo de caudal para el cual el contador debe funcionar dentro del error máximo permitido.
- $Q_2$  - (Caudal de transición): valor situado entre el caudal nominal o permanente y el caudal mínimo. Divide el rango de caudales de funcionamiento en dos zonas.
- $Q_3$  - (Caudal permanente): valor situado entre el caudal de transición y el caudal de sobrecarga, corresponde al valor de caudal máximo para las condiciones nominales de funcionamiento. Este parámetro es conocido también como caudal nominal.

- $Q_4$  – (Caudal de sobrecarga): es el valor de caudal para el cual el contador puede funcionar de manera excepcional durante cortos periodos de tiempo, manteniendo el error dentro de los valores que marca la normativa y recuperando su funcionalidad cuando retorne a las condiciones normales de operación. Este parámetro también es conocido como caudal máximo.

Mención especial debe hacerse al Caudal de arranque ( $Q_a$ ). Este parámetro no se encuentra definido en ninguna normativa relativa a contadores de agua y se define en (Arregui, et al., 2007). El caudal de arranque se entiende como el caudal mínimo para el cual el contador comienza a moverse. Es importante destacar que el caudal de arranque se utiliza para determinar el porcentaje de agua registrada por un contador puesto que es el valor a partir del cual el error de medición del contador deja de ser del -100%.

### 2.1.2 Técnicos

Estos parámetros están referidos tanto a aspectos técnicos del contador diferentes de los metrológicos, como a las condiciones en que tiene lugar su funcionamiento y operación. Los más significativos son:

#### *Presión*

- Presión de trabajo: presión recomendada para el funcionamiento normal del contador. Sus valores límite, que el contador debe poder soportar permanentemente, sin deterioro de sus cualidades metrológicas, se denominan presión máxima de trabajo admisible y presión mínima de trabajo admisible.
- Presión límite superior: máxima presión a la cual el contador puede funcionar durante un periodo corto de tiempo sin sufrir deterioro.

#### *Temperatura de trabajo*

Temperatura promedio del agua entre la entrada y la salida del contador. Sus valores límite, que el contador debe poder soportar permanentemente, sin deterioro de las cualidades

metrológicas se denominan temperatura máxima de trabajo admisible y temperatura mínima de trabajo admisible.

### *Pérdida de presión*

Es la pérdida de presión que provoca el contador entre la entrada y la salida. Durante el funcionamiento normal, esta magnitud debe ser inferior a un valor límite denominado pérdida de presión máxima admisible.

### *Condiciones de funcionamiento*

Es usual en la normativa que los rangos de presión y temperatura aparezcan agrupados bajo lo que podrían denominarse condiciones de funcionamiento de un contador. De este modo y según el nivel de exigencia que dichas condiciones supongan, se clasifican en tres niveles:

- Condiciones nominales de funcionamiento: conjunto de valores para los cuales los distintos errores del contador deben ser inferiores a los errores máximos permitidos.
- Condiciones de referencia: conjunto de valores especificados para la realización de los ensayos de un contador, o para la comparación de resultados de distintas medidas.
- Condiciones límite: conjunto de valores, considerados extremos, que debe poder soportar temporalmente un contador sin sufrir ningún daño residual, ni deterioro en el error de medición cuando posteriormente vuelve a operar en condiciones nominales.

### *Sentido de circulación del flujo*

- Sentido directo: sentido de circulación del agua a través del contador para el cual este ha sido diseñado.
- Sentido inverso: sentido de circulación del agua contrario al directo, normal o de diseño del contador. El comportamiento que debe tener el contador ante el flujo inverso puede variar en función de la norma considerada. Un contador ante un flujo inverso puede:

- Mantener inalterada la lectura correspondiente a la medida en sentido directo, sin contabilizar la del sentido inverso.
- Contabilizar el agua que ha circulado en sentido inverso de modo independiente a la de sentido directo.
- Restar la lectura del volumen circulado en sentido inverso a la del volumen circulado en sentido directo.

### *Dispositivo indicador*

Elemento del contador en el que se muestra el resultado de la medición. Sus características principales, recogidas en la normativa, son las siguientes:

- Unidad de medida en la que debe expresarse el volumen totalizado. Normalmente, dicho volumen se expresa en múltiplos y submúltiplos de metros cúbicos.
- Capacidad de lectura máxima: máxima cifra que el dispositivo indicador es capaz de mostrar. Esta cifra debe ser lo suficientemente alta como para que el instrumento pueda totalizar el volumen circulado tras estar funcionando a su caudal nominal durante un número determinado de horas.
- Código de colores para los múltiplos y submúltiplos de la unidad de medida. Por lo general, negro y rojo, respectivamente.
- Resolución de lectura: mínimo volumen que es posible apreciar en el dispositivo indicador. La resolución de lectura es un parámetro especialmente importante durante el ensayo, en laboratorio o en campo, de los contadores de agua.

### *Designación, dimensiones y diseño*

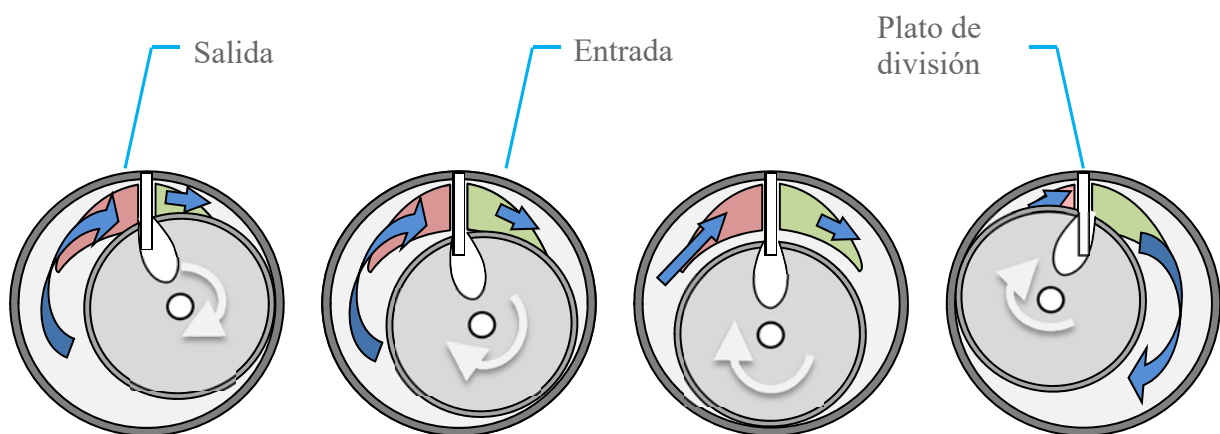
Estos tres aspectos que recoge la normativa resultan de gran importancia en la gestión y selección de contadores de agua. La designación del contador debe aparecer definida de forma inequívoca, siendo habitual que esté basada en su diámetro o en su caudal permanente. En cuanto a las dimensiones y el diseño (longitud, diámetro de las conexiones, tipo de rosca, carcasa, materiales, protección frente a heladas, etc.), las especificaciones que

aparecen en las distintas normativas son muy variadas. Los detalles correspondientes a cada norma se facilitan en el apartado correspondiente.

## 2.2 Contadores de pistón rotativo

Los contadores de pistón rotativo son, según su principio de funcionamiento, contadores volumétricos o de desplazamiento positivo. Su uso habitual suele ser en consumos domésticos.

El funcionamiento de este tipo de contador es sencillo, se basa en registrar el consumo a través de computar el número de llenados y vaciados de una cámara de la cual se conoce su volumen. Posee un elemento móvil como es un pistón que gira excéntricamente alrededor del eje de la cámara de medición.



*Figura 2.2 Principio de funcionamiento de un contador de pistón rotativo*

En la Figura 2.2 se observa la secuencia de llenado y vaciados de los dos compartimentos en que se divide la cámara de medición. El orificio de entrada se encuentra a un lado del plato de división mientras que el de salida se encuentra al otro lado. El pistón gira de manera excéntrica debido a la mayor presión aguas arriba y dirigido por el rodillo guía y orientado por la presencia del plato de división. El pistón posee una abertura por la que puede penetrar el plato de división y llevar a cabo las diferentes etapas de giro.



El procedimiento es el siguiente, a medida que el compartimento de la derecha se va llenando, el de la izquierda. El volumen de agua que atraviesa la cámara de medición en cada rotación del pistón es siempre el mismo (sin considerar fugas).

El contador pistón rotativo está formado por los siguientes elementos:

- Conjunto de medición: que a su vez está formado por la cámara de medición, el pistón y el plato de división. Puede estar fabricado o con materiales plásticos o metálicos, siendo la primera opción la opción más usual.
- Cuerpo del contador: fabricado a lo largo del tiempo en latón o bronce, últimamente los fabricantes empiezan a optar por materiales tipo composite (plástico) debido a su bajo coste y evitar el hurto de contadores debido al uso del latón.
- Filtro: es uno de los elementos más importantes puesto que impide que las partículas que lleva el agua entren en la cámara de medición y bloqueen el pistón o cualquier otra pieza móvil. A menudo se instalan dos filtros, un primer filtro plano en la entrada del conjunto de medición y un segundo filtro cilíndrico a la entrada del contador.

La precisión de los contadores volumétricos de pistón rotativo radica en el ajuste entre la cámara de medición y el pistón ya que los errores de medición son debidos a las fugas existentes entre ambos elementos. Si se produce un desgaste excesivo entre ambas, dará lugar a mayores holguras y con ello errores de subcontaje. Por otro lado, si debido a las deposiciones que transporta el agua, la cámara de medición se llena de incrustaciones, pueden impedir el giro del pistón y por tanto del contador.

Se da el caso de fabricantes que para evitar el bloqueo del pistón y con ello el corte del suministro, producen una perforación en el pistón para comunicar la entrada y la salida de la cámara de medición. Con ello, se aseguran un caudal mínimo de suministro aunque en cualquier caso, para restaurar el servicio sería necesario reparar o reemplazar el contador. Además, esta solución aumenta el subcontaje del contador, especialmente a bajos caudales.

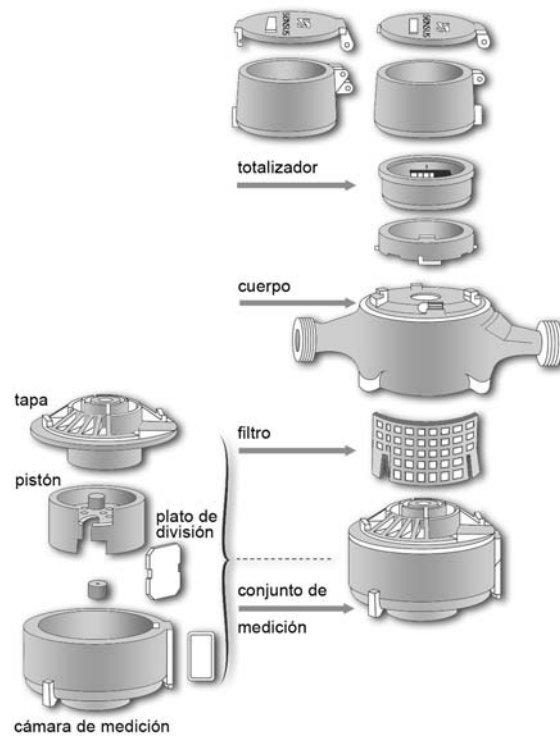


Figura 2.3. Partes de un contador de pistón rotativo (Arregui, et al., 2007)

La transmisión del movimiento entre el pistón y el totalizador se puede realizar de dos formas diferentes. Por un lado, mediante transmisión mecánica, y por otro mediante acoplamiento magnético (siendo esta última opción la más común de las dos).

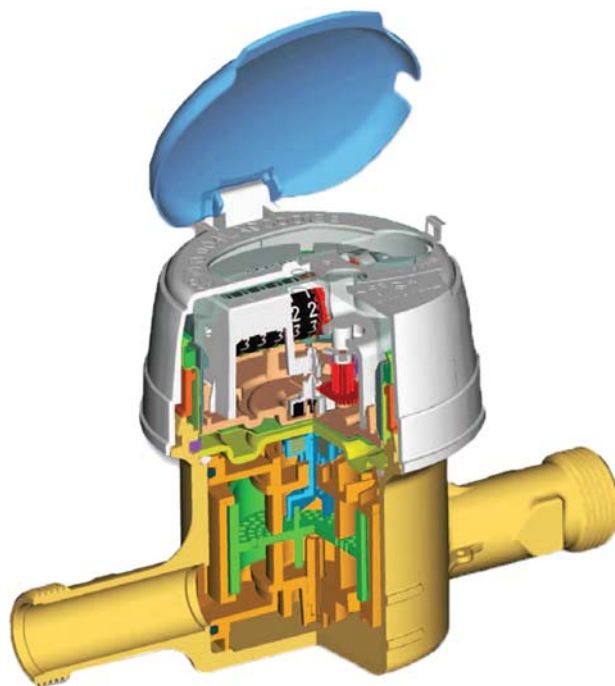


Figura 2.4. Engranajes de un contador volumétrico (Cortesía Itron)

Los contadores volumétricos se fabrican en general para uso doméstico y pequeño calibre. La Tabla 2.1 muestra las principales características metrológicas obtenidas directamente de catálogos de fabricantes.

Es importante hacer hincapié en la gran sensibilidad de los contadores de pistón rotativo a caudales bajos, ya que muestran valores de caudal de arranque muy inferiores al resto de tecnologías.

*Tabla 2.1. Características metrológicas de contadores de pistón rotativo de clase C*

| Diámetro<br>(mm) | $Q_n$<br>( $m^3/h$ ) | $Q_{max}$<br>( $m^3/h$ ) | $Q_t$<br>( $l/h$ ) | $Q_{min}$<br>( $l/h$ ) | $Q_{arr}$<br>( $l/h$ ) | Pérdida de carga a<br>$Q_{max}$ (bar) |
|------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 15               | 1                    | 2                        | 15                 | 10                     | 1                      | 1                                     |
| 15               | 1.5                  | 3                        | 22.5               | 15                     | 1                      | 1                                     |
| 20               | 1.5                  | 3                        | 22.5               | 15                     | 2                      | 1                                     |
| 20               | 2.5                  | 5                        | 37.5               | 25                     | 2                      | 1                                     |
| 25               | 3.5                  | 7                        | 52.5               | 35                     | 6                      | 1                                     |
| 30               | 5                    | 10                       | 75                 | 50                     | 11                     | 1                                     |
| 40               | 10                   | 20                       | 150                | 100                    | 18                     | 1                                     |
| 65               | 20                   | 40                       | 300                | 120                    | 30                     | 1                                     |

Para contadores con un caudal nominal de  $1.5m^3/h$ , el caudal de arranque (dependiendo del modelo y del fabricante) puede situarse en valores de entre 1 a  $5l/h$ . Es por esto que la principal ventaja metrológica que aporta el contador volumétrico se base en su bajo caudal de arranque, lo que les permite detectar cualquier fuga en cualquier instalación interior.

La curva de error teórica de un contador volumétrico es la que se muestra en la Figura 2.5. En general, el error aumenta más a caudales bajos y altos.

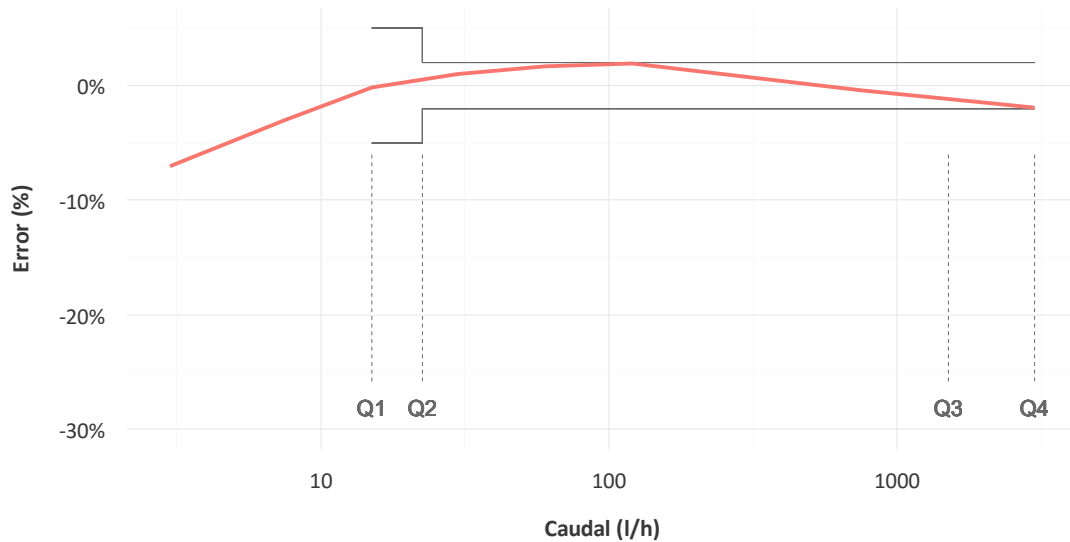


Figura 2.5. Curva de error teórica de un contador volumétrico

Una muestra de cómo evoluciona la curva de error de un contador volumétrico se muestra en la Figura 2.6. La curva de error de un contador volumétrico tiende siempre hacia valores negativos siendo la curva de un contador nuevo la de mayor error positivo.

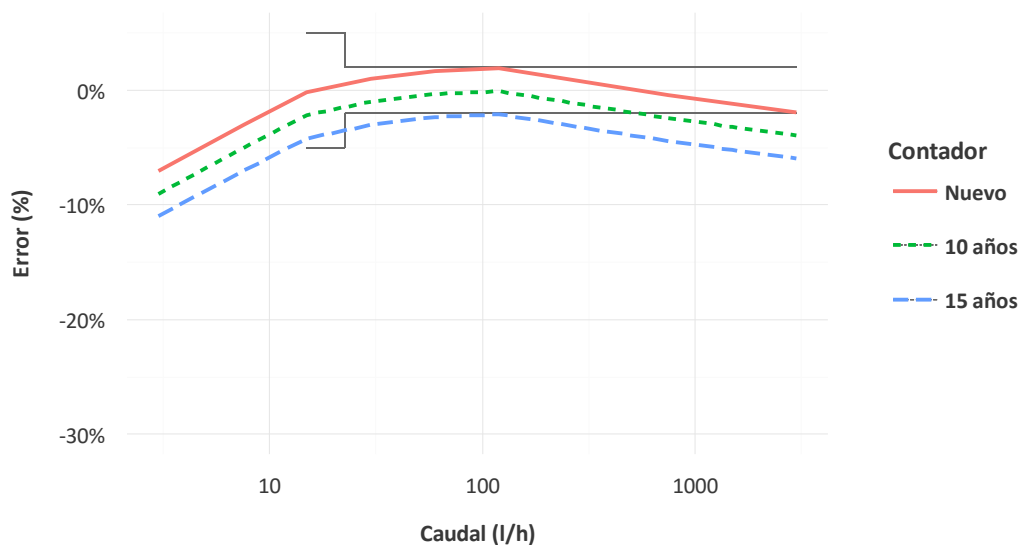


Figura 2.6. Curva de error teórica para un contador volumétrico de edades diferentes

La curva de error de un contador volumétrico es prácticamente la misma independientemente del sentido de circulación del agua. Esto se debe a que en ambos casos los compartimentos se llenan y vacían completamente y lo único que podría modificar la curva de error sería un incremento del caudal de fuga entre la cámara y el pistón.

## 2.3 Normativa y legislación

### 2.3.1 ISO

En 2015 se aprobó la última versión de la norma ISO 4064:2014 "Water meters for cold potable water and hot water" elaborada por el Comité Técnico "Medida del caudal de los fluidos en conductos cerrados" en colaboración con el Comité Técnico CEN/TC 92 "Contadores de agua". La diferencia con su predecesora (ISO 4064:2005) no es excesivamente significativa. A pesar de esto, la versión más importante corresponde con la ISO 4064:1993, ya que sienta las bases de los contadores de agua fría y caliente y es por ello que va a tratar de darse una visión global de ella y de sus versiones posteriores puesto que aún se da la situación de contadores en los que se aplica esta norma.

#### *ISO 4064:1993*

Esta norma es de aplicación para contadores de agua fría (temperatura hasta 30°C), con valores de caudal permanente entre 0.6m<sup>3</sup>/h y 4000m<sup>3</sup>/h, y presiones de trabajo máximas admisibles iguales o superiores a 10bar. Se compone de tres partes diferenciadas:

- Especificaciones.
- Condiciones de instalación.
- Métodos y materiales de ensayo.

Los aspectos clave recogidos en el contenido de esta norma:

- La versión de 1993 es solo aplicable a aparatos de medida integradores que determinan de manera continua el volumen de agua que pasará por ellos, excluyendo cualquier otro líquido. El elemento sensor debe ser mecánico y puede estar constituido por cámaras volumétricas de paredes móviles (como un contador de pistón rotativo) o por algún elemento móvil cuya reacción dependa de la velocidad del agua circulante (como un contador de chorro único).

- La designación del contador queda determinada por el valor del caudal permanente  $Q_p$ , expresado en metros cúbicos por hora y precedido por la letra "N". Dicho valor, para cada tipo de contador, debe restringirse a alguno de los siguientes:
  - Contadores con conexión roscada: 0.6, 1, 1.5, 2.5, 3.5, 6, 10.
  - Contadores con conexión bridada (volumétricos, chorro único y múltiple): 15, 20, 30, 50.
  - Contadores con conexión bridada (Woltmann): 15, 25, 40, 60, 100, 150, 250, 400, 600, 1000, 1500, 2500, 4000.
- Se especifican cuatro clases metrológicas: A, B, C y D. En función del caudal permanente y de dicha clase metrológica los caudales mínimo, de transición y de sobrecarga varían.
- El valor del caudal de sobrecarga  $Q_s$  se define para todas las clases metrológicas como el doble del caudal permanente  $Q_p$ .
- El error máximo permitido para cada rango de caudal queda establecido en  $\pm 5\%$  ( $\epsilon_1$ ) y  $\pm 2\%$  ( $\epsilon_2$ ). El carácter más restrictivo de una clase metrológica superior se refiere únicamente a los valores de caudal a partir de los cuales se exige que el error sea inferior al error máximo permitido. En ningún caso varían las tolerancias de error de una clase metrológica a otra.
- La presión de trabajo mínima admisible para un contador queda fijada en 10 bar para todos los contadores, independientemente de su tipo, diámetro y clase metrológica. En caso de que la presión de trabajo admisible sea superior a los 10 bares, el valor real deberá marcarse de manera visible en el exterior del contador.
- La temperatura de trabajo máxima admisible queda fijada en 30°C para todos los contadores.
- La pérdida de presión máxima en el contador, expresada en bar, debe restringirse a alguno de los siguientes valores: 0.1, 0.3, 0.6 y 1 bar.

*ISO 4064:2005*

Esta normativa es de aplicación para contadores de agua fría y caliente, con presiones de trabajo máximas admisibles iguales o superiores a 1MPa o 0.6 Mpa para contadores de diámetro igual o mayor a 500 mm y temperaturas máximas de 30°C para agua fría y 180°C para agua caliente, dependiendo de la clase. Al igual que su predecesora, se compone de tres partes:

- Especificaciones.
- Condiciones de instalación.
- Métodos y materiales de ensayo.

Los principales aspectos recogidos en esta norma son:

- A diferencia de la versión anterior, esta nueva norma es de aplicación a los contadores de agua basados en cualquier principio eléctrico o electrónico, y a contadores de agua mecánicos con algún componente electrónico. La norma es de aplicación a cualquier instrumento de medida que determine de manera continua el volumen de agua circulado a través del mismo.
- Los contadores de agua quedan caracterizados por el diámetro nominal de las conexiones o de las bridas. Para cada diámetro se definen una serie de valores (dándose uno como preferido) como diferentes alternativas a las dimensiones del contador: longitud, altura y anchura.
- Los caudales que definen la metrología del contador se denominan de la siguiente forma:
  - Caudal mínimo:  $Q_1$
  - Caudal de transición:  $Q_2$
  - Caudal permanente:  $Q_3$
  - Caudal de sobrecarga:  $Q_4$
- La designación del contador queda determinada mediante el valor del caudal permanente  $Q_3$ , expresado en metros cúbicos por hora, y el ratio  $Q_3/Q_1$ .

- El caudal permanente  $Q_3$ , en metros cúbicos por hora, debe restringirse a alguno de los valores mostrados en la Tabla 2.2, así como a otros múltiplos y submúltiplos de 10.

*Tabla 2.2. Valores admisibles para caudal permanente*

| $Q_3$ ( $m^3/h$ ) |      |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|------|
| 1                 | 1.6  | 2.5  | 4    | 6.3  |
| 10                | 16   | 25   | 40   | 63   |
| 100               | 160  | 250  | 400  | 630  |
| 1000              | 1600 | 2500 | 4000 | 6300 |

Durante un periodo transitorio de 5 años desde su publicación se admitirán los valores: 1.5, 3.5, 6, 15 y 20  $m^3/h$ .

- El caudal mínimo  $Q_1$  y en consecuencia, la calidad metrológica del contador, quedan definidos a partir del ratio  $Q_3/Q_1$ . Los valores que dicho ratio puede adoptar se muestran en la Tabla 2.3. También se admiten otros múltiplos y submúltiplos de 10.

*Tabla 2.3. Valores admisibles para el ratio  $Q_3/Q_1$*

| $Q_3/Q_1$ |      |     |     |     |      |     |     |     |     |
|-----------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 10        | 12.5 | 16  | 20  | 25  | 31.5 | 40  | 50  | 63  | 80  |
| 100       | 125  | 160 | 200 | 250 | 315  | 400 | 500 | 630 | 800 |

Durante un periodo de transitorio de 5 años se admitirán los valores: 15, 35, 60 y 212.

- El valor del ratio  $Q_3/Q_1$  podrá ir precedido en la marcación del contador con la letra R. De este modo, un contador con un valor de este ratio igual a 200 será denominado como R200. Las clases metrológicas no se definen explícitamente en esta nueva norma, sino que surgen como resultado de los distintos valores que puede adoptar el ratio R ( $Q_3/Q_1$ ), ya que  $Q_2$  y  $Q_4$  quedan inequívocamente definidos a partir de  $Q_1$  y  $Q_3$ , respectivamente.
- El caudal de transición  $Q_2$  se establece a partir del ratio  $Q_2/Q_1$ , para el que se define un único valor de 1.6. Sin embargo, durante un periodo de transición de 5 años se admitirán los valores: 1.5, 2.5, 4 y 6.3.
- El error máximo permitido para los dos rangos de caudales, delimitados por el caudal de transición, queda fijado en los siguientes valores:



- $\varepsilon_1 = \pm 5\%$
- $\varepsilon_2 = \pm 2\%$  para  $T \leq 30^\circ\text{C}$
- $\varepsilon_2 = \pm 3\%$  para  $T > 30^\circ\text{C}$
- La presión de trabajo mínima admisible es fija e igual a 0.3 bar para todos los contadores. Por el contrario, según la presión máxima de trabajo, los contadores se clasifican en las clases mostradas en la Tabla 2.4 (izquierda).

*Tabla 2.4. Clases de contador según la presión máxima de trabajo (izquierda) y según la pérdida de presión máxima (derecha)*

| <i>Clase</i> | <i>Presión máxima de trabajo (bar)</i> | <i>Clase</i>  | <i>Pérdida de presión máxima (bar)</i> |
|--------------|--|---------------|--|
| MAP 6        | 6                                      | $\Delta P$ 63 | 0.63                                   |
| MAP 10       | 10                                     | $\Delta P$ 40 | 0.40                                   |
| MAP 16       | 16                                     | $\Delta P$ 25 | 0.25                                   |
| MAP 25       | 25                                     | $\Delta P$ 16 | 0.16                                   |
| MAP 40       | 40                                     | $\Delta P$ 10 | 0.1                                    |

- Las temperaturas de trabajo máxima y mínima admisibles clasifican los contadores en las clases mostradas en la Tabla 2.5.
- La máxima pérdida de presión que el contador puede provocar en condiciones normales de operación a caudal permanente  $Q_3$ , es de 0.63 bar. Por debajo de esta cifra, los contadores se clasifican en las clases mostradas en la Tabla 2.4 (derecha).
- Como una de las principales novedades, la norma ISO 4064:2005 clasifica los instrumentos en función de la influencia que una posible perturbación en el perfil de velocidades entrante pudiese ejercer sobre el error de medición del contador. Dicha sensibilidad respecto a irregularidades en el perfil de velocidades queda establecida en las clases mostradas en la
- Tabla 2.6 (izquierda) para las perturbaciones aguas arriba del contador, y la
- Tabla 2.6 (derecha), para las perturbaciones aguas abajo. Cada una de las clases indica la longitud de tubería recta que el contador necesita en cada extremo, expresada en múltiplos de su diámetro nominal, y la posible exigencia adicional de

## 2. Conceptos básicos sobre contadores de agua; metrología

un estabilizador de flujo para garantizar que el error de medición se mantenga dentro de los límites requeridos  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$ .

Tabla 2.5. Clases de contador según la temperatura de trabajo

| Clase   | Temperatura de trabajo (°C) |        |
|---------|-----------------------------|--------|
|         | Mínima                      | Máxima |
| T30     | 0.1                         | 30     |
| T50     | 0.1                         | 50     |
| T70     | 0.1                         | 70     |
| T90     | 0.1                         | 90     |
| T130    | 0.1                         | 130    |
| T180    | 0.1                         | 180    |
| T30/70  | 30                          | 70     |
| T30/90  | 30                          | 90     |
| T30/130 | 30                          | 130    |
| T30/180 | 30                          | 180    |

Tabla 2.6. Clases de contador según la sensibilidad a distorsiones producidas aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha)

| Clase | Longitud de Tubería Necesaria (xDN) | Necesidad De estabilizador | Clase | Longitud de Tubería Necesaria (xDN) | Necesidad De estabilizador |
|-------|-------------------------------------|----------------------------|-------|-------------------------------------|----------------------------|
| U0    | 0                                   | No                         | D0    | 0                                   | No                         |
| U3    | 3                                   | No                         | D3    | 3                                   | No                         |
| U5    | 5                                   | No                         | D5    | 5                                   | No                         |
| U10   | 10                                  | No                         | D0S   | 0                                   | Sí                         |
| U15   | 15                                  | No                         | D3S   | 3                                   | Sí                         |
| U0S   | 0                                   | Sí                         |       |                                     |                            |
| U3S   | 3                                   | Sí                         |       |                                     |                            |
| U5S   | 5                                   | Sí                         |       |                                     |                            |
| U10S  | 10                                  | Sí                         |       |                                     |                            |

- Las condiciones climáticas y mecánicas presentes en el entorno de operación del contador se toman en consideración definiendo tres clases al respecto:
  - Clase B: Contadores fijos instalados en interior.
  - Clase C: Contadores fijos instalados en exterior.

- Clase I: Contadores móviles.

Para cada una de estas clases, se define un nivel concreto de severidad en cuanto a calor seco, calor húmedo, frío, vibraciones y golpes, que deberá considerarse en los correspondientes ensayos en laboratorio.

- Las condiciones electromagnéticas presentes en el entorno de operación del contador se clasifican en dos clases:
  - Clase E1: Entorno doméstico, comercial y de industria ligera.
  - Clase E2: Entorno de industria pesada.

Para cada una de estas clases, se define un nivel concreto de severidad en cuanto a descargas electrostáticas, campos de emisión de radiofrecuencias, sobrecargas y transitorios/averías eléctricas, que deberá considerarse en los correspondientes ensayos en laboratorio.

- El dispositivo indicador de cada contador dispondrá de un rango mínimo de lectura, en metros cúbicos, que queda fijado en función del valor de  $Q_3$ , tal y como muestra la Tabla 2.7.

*Tabla 2.7. Rangos mínimos de lectura para el dispositivo indicador*

| $Q_3$ (m <sup>3</sup> /h) | Rango mínimo de lectura (m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------|---|
| $Q_3 \leq 6.3$            | 9999                                      |
| $6.3 \leq Q_3 \leq 63$    | 99999                                     |
| $63 \leq Q_3 \leq 630$    | 999999                                    |
| $630 \leq Q_3 \leq 6300$  | 9999999                                   |

#### ISO 4064:2014

A diferencia de la ISO 4064:2005 esta actualización de la normativa no incluye cambios tan sustanciales como sus predecesoras. Una de las diferencias corresponde a que esta se encuentra dividida en cinco partes

- Requisitos metrológicos y técnicos.
- Métodos de ensayo.
- Formato de informe de ensayo.
- Requisitos no metrológicos no cubiertos por la Norma ISO 4064-1.

- Requisitos de instalación.

Esta cuarta edición de la Norma ISO 4064 anula y sustituye a la tercera edición. Es importante destacar que esta norma es idéntica a la edición correspondiente de OIML R 49-1 que se ha publicado recientemente. Las principales diferencias de esta norma son:

- El valor del ratio  $Q_3/Q_1$  queda acotado en valores inferiores a 40 mientras que el rango superior queda acotado a 1000 pese a que puede extenderse a valores más altos.

| Q <sub>3</sub> /Q <sub>1</sub> |     |     |     |      |
|--------------------------------|-----|-----|-----|------|
| 40                             | 50  | 63  | 80  | 100  |
| 125                            | 160 | 200 | 250 | 315  |
| 400                            | 500 | 630 | 800 | 1000 |

- El fabricante del contador debe indicar la clase de precisión del contador. El contador de agua debe designarse o bien con clase de precisión 1 o con clase de precisión 2 de acuerdo a los requisitos de la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Clases de precisión

|             |                           | $Q_1 \leq Q \leq Q_2$ | $Q_2 \leq Q \leq Q_4$ |
|-------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Precisión 1 | $T \leq 30^\circ\text{C}$ | ±3%                   | ±1%                   |
|             | $T > 30^\circ\text{C}$    | ±3%                   | ±2%                   |
| Precisión 2 | $T \leq 30^\circ\text{C}$ | ±5%                   | ±2%                   |
|             | $T > 30^\circ\text{C}$    | ±5%                   | ±3%                   |

- La pérdida de presión, incluyendo el filtro que pudiese incorporar el contador, no debe exceder de 0.1 MPa (1 bar) entre  $Q_1$  y  $Q_4$ . En esta recomendación no se definen clases de contadores según su pérdida de presión.
- Las inscripciones que deben figurar en la carcasa del contador son:
  - Unidad de medida ( $\text{m}^3$ )
  - Clase metrológica en caso de ser diferente a la 2.
  - Valor numérico de  $Q_3$
  - Valor numérico del ratio  $Q_3/Q_1$ , precedido por la letra "R"
  - Valor numérico del ratio  $Q_2/Q_1$ , si es distinto de 1.6.

- Símbolo de aprobación del modelo de acuerdo con la regulación del país.
  - Nombre o identificativo del fabricante.
  - Año de fabricación (2 últimos dígitos) y número de serie.
  - Sentido directo de circulación del caudal.
  - Presión de trabajo máxima si es superior a 1 MPa (10 bar).
  - Letra "V" o "H" si el contador debe situarse en posición horizontal o vertical, respectivamente.
  - Máxima temperatura del agua admisible si es mayor que 30 °C.
  - El fabricante puede especificar la pérdida de presión máxima.
- Para contadores con dispositivos electrónicos se deben incluir las siguientes inscripciones:
    - Para la alimentación externa: voltaje y frecuencia
    - Si se utilizan pilas reemplazables la fecha de sustitución de las mismas.
    - Si se utilizan pilas no reemplazables la fecha de sustitución del contador.

### 2.3.2 OIML

La Organización Internacional de Metrología Legal es un ente que se encarga de proponer recomendaciones que deben cumplir los contadores de acuerdo con los requerimientos de los servicios de metrología legal en los países en los que estos instrumentos estén sometidos a control metrológico por parte del Estado.

La última versión de esta norma es la OIML R 49:2013 que va dirigida a contadores de agua tanto fría como caliente en conductos a presión con dispositivo integrado de volumen. El elemento sensor puede ser mecánico, eléctrico o electrónico. Como estas recomendaciones están incluidas en las diferentes versiones de la norma ISO que se han desarrollado previamente, no se repetirán los conceptos ya explicados.

### 2.3.3 CEN

Actualmente, se encuentran aprobadas dos normas europeas preparadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN). Una referente a contadores de agua limpia potable (EN 14154:2005) y otra para contadores de riego (EN 14268:2005).

La norma EN 14154 en su conjunto se compone de tres partes diferentes:

1. Requerimientos generales.
2. Instalación y condiciones de uso.
3. Equipamiento y métodos de ensayo.

En los aspectos básicos, esta norma coincide prácticamente en su totalidad con la norma ISO 4064:2005, por lo que todo lo presentado en el apartado correspondiente a dicha norma es perfectamente aplicable a la norma europea.

La norma EN 14286 es relevante para algunas aplicaciones en la industria del agua en las cuales el agua no esté limpia, o se utilice para propósitos fuera del ámbito de aplicación de la Directiva europea 2004/22/CE y de la norma EN 14154.

Para el caso de España, se ha tomado la Norma UNE-EN ISO 4064:2014 y la Norma UNE-EN 14154-1:2005+A2 como la adopción nacional de la norma europea y de la norma internacional.

Es conveniente destacar que la normativa definida hasta este punto abarca los conceptos más amplios y generales sobre los contadores de agua. A pesar de esto, existe más normativa al respecto sobre contadores de agua de la cual no se va a proceder a su desarrollo. Mención especial a la Directiva 2014/32/UE que deroga la antigua Directiva 2004/22/CE pese a que esta es válida hasta el año 2016. Esta define los requisitos y el carácter general que debe cumplir cualquier instrumento de medida y los requisitos específicos para cada tipo de instrumento.

Por último, el RD 889/2006, por el que se regula el control metrológico del Estado sobre instrumentos de medida se ha visto derogado por el RD 244/2016 por el que se desarrolla

la Ley 32/2014, de 22 de diciembre, de Metrología. Esta consiste en “el establecimiento y la aplicación del Sistema Legal de Unidades de Medida, así como la fijación de los principios y de las normas generales a las que debe ajustarse la organización y el régimen jurídico de la actividad metrológica en España”. Este real decreto además, desarrolla los capítulos II, III y V de la Ley 32/2014, mencionada anteriormente.





## 3 Estudio de verificación de contadores nuevos

Una manera que posee la empresa de abastecimiento de conocer cómo se comporta un contador en campo es a través de la verificación primitiva que llevan a cabo los fabricantes. Dicho estudio consiste en una serie de ensayos que realiza el fabricante y según los cuales el producto debe cumplir con toda la legislación vigente que le afecta para garantizar la calidad y precisión de la medición y limitar errores, pérdida de carga, etc. Esta verificación es obligatoria realizarla y los contadores han de ir marcados para que se pueda identificar visiblemente que las han superado.

Según la Asociación No lucrativa de Fabricantes de contadores de Agua (ANFAGUA), "en materia de verificación periódica hay países europeos como Alemania que poseen regulaciones al respecto, con normas que establecen la verificación obligatoria tras cada reparación y unos intervalos máximos de verificación periódica, con una verificación obligatoria cada 6 años. Sin embargo, en España no se cuenta con una legislación que armonice estas verificaciones. Tan solo Andalucía y Baleares poseen legislación parcial al respecto". Además, dicha asociación afirma que "La Directiva 2004/22/CE, cuya trasposición al derecho español encontramos en el RD 889/2006, establece que los instrumentos de medida en servicio deberán ser sometidos a verificación periódica, verificación después de reparación o modificación y vigilancia e inspección, pero dichos apartados todavía no han tenido el desarrollo normativo necesario para su implantación".

Hallar contadores parados o defectuosos en una muestra de contadores nueva no debe ser un hecho inesperado cuando se realizan de manera continua ensayos en laboratorio. De hecho, (M.A., et al., 2011) encontró un número no despreciable de contadores nuevos que no cumplían las especificaciones fijadas por la American Water Works Association (AWWA). En la muestra ensayada por Neilsen, para caudales bajos, los contadores que no cumplían la normativa variaban desde un 0 a un 25%, significando en este último caso que de 100

contadores solo 75 cumplían correctamente con lo marcado en la normativa para caudales bajos.

Además, la variabilidad del error en los ensayos se puede tomar como un parámetro que permite establecer una medida del control que el fabricante tiene sobre su producción. Una variabilidad del error alta en la muestra ensayada puede indicar que cada contador es producido de una manera diferente al anterior y, por lo general, se podría decir que es síntoma de una calidad de producción baja. Los modelos de contador que poseen una mayor variabilidad del error de ensayo requieren controles de calidad más estrictos que aquellos que poseen una variabilidad mínima a lo largo de su producción.

Con todo ello, la elección en el número de modelos a emplear en un abastecimiento es una decisión fundamental, pues debe buscarse una solución de compromiso entre los beneficios que conlleva la fabricación de contadores a gran escala y el riesgo debido al fallo de un modelo. No es raro encontrar fabricantes que son conscientes de un problema de diseño del contador una vez que estos ya han sido instalados en campo.

Con el fin de reducir dicho riesgo, las empresas optan por elegir de entre dos a cuatro modelos de contador diferente, en función del número de usuarios a suministrar y el rango de volúmenes consumido por estos. De esta manera, si se da la situación de un modelo defectuoso, este no afectará por completo al parque de contadores y el impacto económico que se producirá en él será inferior.

En este apartado se va a proceder, por un lado, a realizar una recopilación de todos los estudios previos realizados y asociados a contadores volumétricos de desplazamiento positivo y por otro lado, a la verificación de cuatro modelos diferentes de contador completamente nuevos y recién salidos de fábrica. Esta comprobación se plantea con el fin de añadir información a los estudios previamente realizados y con dos objetivos principales, por un lado, verificar y confirmar que estos cumplen los límites establecidos en la normativa en lo referente a curvas de error y errores máximos permitidos y por otro, obtener una referencia inicial de la curva de error de diferentes modelos para poder establecer una relación con los resultados obtenidos posteriormente.

### 3.1 Estudios previos

En estudio anteriores llevados a cabo tanto en (Bowen, et al., 1991) como en (Barfus, et al., 2011) ya se analizó el rendimiento de contadores volumétricos de pistón rotativo nuevos. Por lo que respecta al primero, el análisis se basó en una muestra de 20 contadores de 10 modelos diferentes mientras que el segundo correspondía a 48 contadores de ocho modelos distintos. Los resultados de los errores promedio tanto del modelo A1 como del modelo A2 se muestran en la Tabla 3.1:

*Tabla 3.1. Error promedio de los modelos A1 y A2 (Bowen, et al., 1991), (Barfus, et al., 2011)*

| <i>Caudal ensayo<br/>(gpm)</i> | <i>Caudal ensayo<br/>(l/h)</i> | <i>A1</i> | <i>A2</i> |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------|-----------|
| 1/64                           | 3.5                            | -99.97%   | -         |
| 1/32                           | 7.1                            | -97.17%   | -         |
| 1/16                           | 14                             | -59.98%   | -32.10%   |
| 1/8                            | 28                             | -14.03%   | -9.20%    |
| 1/4                            | 57                             | -2.90%    | -2.10%    |
| 1/2                            | 114                            | -0.26%    | -0.30%    |
| 1                              | 227                            | 0.64%     | 0.60%     |
| 2                              | 454                            | 0.71%     | 1.00%     |
| 15                             | 3407                           | -0.03%    | -0.10%    |
| 20                             | 4543                           | -0.18%    | -1.00%    |

Siendo el modelo A1 el estudiado en (Barfus, et al., 2011) y el modelo A2 el analizado en (Bowen, et al., 1991). Ambos estudios no pueden ser analizados por modelo de contador puesto que los resultados fueron presentados por tipo de tecnología de manera que el modelo no podía ser identificado.

Por otro lado, en el artículo publicado por (Arregui, et al., 2014) con el nombre de "Quantifying measuring errors of new residential water meters considering different customer consumption patterns" se abarca también el aspecto de contadores volumétricos nuevos de desplazamiento positivo. Para ello, se lleva a cabo un análisis de cuatro modelos diferentes de contador volumétrico, con un total de 30 contadores para cada modelo. La Tabla 3.2 y Tabla 3.3 muestra las características de los cuatro modelos.

### 3. Estudio de verificación de contadores nuevos

Tabla 3.2. Características metroológicas de los modelos Na y Nb (Arregui F.J. et al.)

| Modelo Na            |      | Modelo Nb            |      |
|----------------------|------|----------------------|------|
| Q <sub>1</sub> (l/h) | 12.5 | Q <sub>1</sub> (l/h) | 15   |
| Q <sub>2</sub> (l/h) | 20   | Q <sub>2</sub> (l/h) | 22.5 |
| Q <sub>3</sub> (l/h) | 2500 | Q <sub>3</sub> (l/h) | 1500 |
| Q <sub>4</sub> (l/h) | 5000 | Q <sub>4</sub> (l/h) | 3000 |
| R                    | 200  | Clase metroológica   | C    |

Tabla 3.3. Características metroológicas de los modelos Nc y Nd

| Modelo Nc            |      | Modelo Nd            |      |
|----------------------|------|----------------------|------|
| Q <sub>1</sub> (l/h) | 8    | Q <sub>1</sub> (l/h) | 5    |
| Q <sub>2</sub> (l/h) | 13   | Q <sub>2</sub> (l/h) | 8    |
| Q <sub>3</sub> (l/h) | 2500 | Q <sub>3</sub> (l/h) | 1600 |
| Q <sub>4</sub> (l/h) | 5000 | Q <sub>4</sub> (l/h) | 3200 |
| R                    | 315  | R                    | 315  |

Los datos de estos estudios se han utilizado para analizar las características metroológicas de los contadores volumétricos y así poder comparar posteriormente con los datos de este proyecto.

Los resultados de error promedio de cada modelo, la desviación típica, así como los caudales para los cuales se ha llevado a cabo el ensayo se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Error promedio para cada modelo

|    |                 |        |        |        |        |       |       |        |        |        |        |
|----|-----------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
|    | Caudal (l/h)    | 6      | 12.5   | 20     | 60     | 120   | 600   | 1500   | 2500   | 3000   |        |
| Na | Error prom. (%) | -4.50% | -1.39% | -0.25% | 1.19%  | 1.79% | 0.94% | 0.12%  | -0.54% | -1.56% |        |
|    | Desv. Est. (%)  | 1.31%  | 0.32%  | 0.19%  | 0.24%  | 0.37% | 0.26% | 0.16%  | 0.19%  | 2.27%  |        |
|    | Caudal (l/h)    | 6      | 10     | 15     | 30     | 60    | 120   | 600    | 1500   | 2500   | 3000   |
| Nb | Error prom. (%) | -3.00% | -1.48% | -0.22% | 0.65%  | 1.45% | 1.51% | 0.83%  | 0.10%  | -0.34% | -0.39% |
|    | Desv. Est. (%)  | 1.01%  | 0.64%  | 0.37%  | 0.22%  | 0.18% | 0.19% | 0.14%  | 0.13%  | 0.15%  | 0.16%  |
|    | Caudal (l/h)    | 5      | 13     | 25     | 60     | 120   | 600   | 1500   | 2500   | 3000   |        |
| Nc | Error prom. (%) | -2.32% | -0.05% | 1.03%  | 1.58%  | 1.45% | 0.36% | -0.53% | -1.16% | -1.29% |        |
|    | Desv. Est. (%)  | 24.79% | 1.55%  | 0.47%  | 0.34%  | 0.20% | 0.16% | 0.15%  | 0.18%  | 0.18%  |        |
|    | Caudal (l/h)    | 5      | 8      | 15     | 30     | 60    | 120   | 600    | 1600   | 2000   |        |
| Nd | Error prom. (%) | -2.95% | -1.03% | 0.40%  | 1.20%  | 1.60% | 1.47% | 0.74%  | -0.21% | -0.55% |        |
|    | Desv. Est. (%)  | 24.60% | 18.08% | 18.34% | 18.30% | 0.25% | 0.20% | 0.29%  | 0.31%  | 0.39%  |        |

Con el fin de establecer las limitaciones de contadores nuevos trabajando de manera normal, los valores tanto de la tabla como de la curva de error que se muestra en el

siguiente apartado no muestran los contadores que han resultado defectuosos ya que esto produciría cierta influencia en la muestra actual que modificaría los resultados. En cualquier caso, estos contadores defectuosos han resultado ser dos, correspondientes al modelo Nd, y que se encontraban parados para un caudal de 12.5l/h.

## 3.2 Análisis de la curva de error

### 3.2.1 Análisis de la muestra

Una vez conocidos los estudios previos que se han llevado a cabo y hecho un análisis de estos, se procede a una verificación de cuatro modelos diferentes de contador con el fin de aportar información sobre un mayor número de modelos de contador.

Para el estudio de verificación se parte de cuatro modelos de contador volumétrico de diferente marca comercial, los cuales serán denominados como N1, N2, N3, N4. De cada modelo se han facilitado un total de cinco contadores. Las características metrológicas de cada modelo se muestran en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6. Los nombres de los modelos se han omitido en aras de mantener la confidencialidad de los datos.

Una característica principal de los contadores y que muestra dichas tablas es el caudal de transición ( $Q_3$ ). Este caudal es importante, no solo para conocer su ritmo de trabajo nominal sino también porque los límites máximos de error permitidos por la norma están definidos por este caudal. Para ser más exactos, los límites de error de un contador serán más exigentes cuanto mayor sea su clase metrológica o su R.

*Tabla 3.5. Características metrológicas de los modelos N1 y N2*

| <i>Modelo N1</i>          |           | <i>Modelo N2</i>          |           |
|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| $Q_1$ (l/h)               | 15        | $Q_1$ (l/h)               | 5         |
| $Q_2$ (l/h)               | 22.5      | $Q_2$ (l/h)               | 8         |
| $Q_3$ (l/h)               | 1500      | $Q_3$ (l/h)               | 2500      |
| $Q_4$ (l/h)               | 3000      | $Q_4$ (l/h)               | 3125      |
| <i>Clase metrológica</i>  | C         | R                         | 500       |
| <i>Material</i>           | Composite | <i>Material</i>           | Composite |
| <i>Año de fabricación</i> | 2014      | <i>Año de fabricación</i> | 2014      |
| <i>Edad (años)</i>        | 2         | <i>Edad (años)</i>        | 2         |

Tabla 3.6. Características metrológicas de los modelos N3 y N4

| Modelo N3          |                 | Modelo N4          |           |
|--------------------|-----------------|--------------------|-----------|
| $Q_1$ (l/h)        | 12.5            | $Q_1$ (l/h)        | 15.625    |
| $Q_2$ (l/h)        | 20              | $Q_2$ (l/h)        | 25        |
| $Q_3$ (l/h)        | 2500            | $Q_3$ (l/h)        | 2500      |
| $Q_4$ (l/h)        | 3125            | $Q_4$ (l/h)        | 3125      |
| R                  | 200             | R                  | 160       |
| Material           | Latón/Composite | Material           | Composite |
| Año de fabricación | 2015            | Año de fabricación | 2016      |
| Edad (años)        | 1               | Edad (años)        | 0         |

Es importante destacar que la clase metrológica de un contador viene marcada por el denominado ratio R. Este se establece como la relación entre el caudal de transición ( $Q_3$ ) y el caudal mínimo ( $Q_1$ ). Dicha nomenclatura surgió a raíz de la ISO 4064-1:2006 y es por ello que se permitió a los fabricantes un margen de diez años para mantener la nomenclatura anterior. De ahí que algunos contadores aún vengan definidos por su clase metrológica en lugar de por su ratio R, como es el caso del modelo N1. En cualquier caso, la metrología de los contadores del modelo N1 es equivalente a la del modelo N4.

### 3.2.2 Procedimiento de ensayo

Los contadores se han ensayado en el laboratorio del ITA, de la Universidad Politécnica de Valencia, en un banco de ensayo volumétrico usando dos probetas calibradas de 10 y de 200 litros respectivamente. Dicho banco está diseñado para ensayar contadores con diámetros de entre 15 a 40mm. En particular, el banco es apto para el ensayo de cinco contadores de manera simultánea con un rango de caudales desde 15l/h hasta 3000l/h.

Los ensayos se han llevado a cabo tomando lectura inicial de los contadores en reposo. El depósito calibrado de 10l se ha utilizado para ensayar caudales desde 15l/h hasta 120l/h. Por lo que respecta al depósito de 200l, este se ha empleado para ensayar caudales desde 750l/h hasta 3000l/h. La división de la escala de los depósitos es de 0.01l y 0.2l respectivamente.

Los caudales de los ensayos se han regulado a través de válvulas de alta precisión y caudalímetros electromagnéticos con el fin de proporcionar información precisa sobre el flujo de caudal que atraviesa los contadores.

Para caudales inferiores a 120l/h el agua que llega al banco de ensayo parte de un tanque a presión que proporciona una presión hidráulica de entre 4 a 6bar. Para caudales superiores a 120l/h el suministro llega por medio de una bomba sumergible. En este caso, las pulsaciones generadas por la bomba y que podrían afectar en cierta manera al comportamiento de los contadores se han reducido por medio de un depósito a presión situado entre la bomba y el banco de ensayo.

Previo al inicio de los ensayos, se han tenido en cuenta ciertas consideraciones:

- Instalación de contadores en posición horizontal. A pesar de que este tipo de contador se ve mínimamente afectado por la posición de instalación, a diferencia del contador de chorro único, se ha procedido a este tipo de instalación con el fin de reducir cualquier efecto causado por la orientación de estos.
- Purga de aire del banco de ensayo por medio de una bomba de vacío.
- Para la eliminación definitiva del aire en la conducción y previo al inicio de los ensayos, se ha hecho pasar un caudal de entre 400 a 600l/h durante diez minutos. A través de este paso, se busca garantizar que todas las partes del contador mantengan contacto con el agua antes de los ensayos. La elección de este caudal es debido a que corresponde con el caudal medio utilizado por un usuario doméstico.
- El orden de ensayo de los caudales es el que se muestra en la Tabla 3.7.
- El caudal de arranque de los contadores se determinó al finalizar los ensayos.

*Tabla 3.7. Caudales de ensayo y orden en el que se han llevado a cabo*

|                     |     |     |    |    |    |     |      |      |
|---------------------|-----|-----|----|----|----|-----|------|------|
| <i>Ensayo</i>       | 1   | 2   | 3  | 4  | 5  | 6   | 7    | 8    |
| <i>Caudal (l/h)</i> | 750 | 120 | 60 | 30 | 15 | 7.5 | 1500 | 3000 |

Todas las lecturas de los contadores fueron comprobadas dos veces antes de empezar un ensayo nuevo con el fin de evitar errores por lectura de los contadores. La fórmula

empleada para calcular el error de cada contador a cada caudal es la definida por la normativa ISO 4064-3:1993 y que se muestra en la ecuación (3.1):

$$\varepsilon_c = \frac{V_i - V_a}{V_a} \quad (3.1)$$

Donde  $V_i$  es el volumen registrado por el contador en un ensayo y  $V_a$  el volumen realmente medido por el depósito calibrado. El volumen acumulado del contador debería poderse leer con una resolución suficiente para reducir así la componente asociada a la incertidumbre del ensayo a un valor de 0.25%.

La determinación de la curva de error a bajos caudales, donde se producen mayores variaciones del error, se ha llevado a cabo con especial cuidado para poder obtener una representación realmente precisa del rendimiento de los contadores en campo. Por ello, los contadores se han ensayado a tres caudales más por debajo de 120l/h.

#### 3.2.3 Obtención de la curva de error

Para el análisis de la curva de error se han realizado ensayos de los diferentes modelos a diferentes caudales con el fin de adquirir un conocimiento más amplio sobre la variabilidad del error de los modelos y conseguir una curva de error más detallada que la que proporcionan los fabricantes y con la que se pueda establecer de manera precisa el comportamiento de la muestra de contadores.

##### Modelo N1

En la Tabla 3.8 se puede observar el error de ensayo de cada contador según el caudal ensayado. Pese a que a menor caudal, el error es más negativo, este cumple con los máximos establecidos por normativa. Esto es,  $\pm 5\%$  para caudales entre 15l/h y 22.5 l/h y  $\pm 2\%$  para caudales superiores a 22.5l/h.



Tabla 3.8. Error de ensayo de los diferentes contadores para el modelo N1

| $E(7.5 \text{ l/h})$ | $E(15 \text{ l/h})$ | $E(30 \text{ l/h})$ | $E(60 \text{ l/h})$ | $E(120 \text{ l/h})$ | $E(750 \text{ l/h})$ | $E(1500 \text{ l/h})$ | $E(3000 \text{ l/h})$ |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| -0.7%                | 1.3%                | 1.6%                | 1.7%                | 1.6%                 | -0.3%                | -0.1%                 | -0.2%                 |
| -2.7%                | 0.8%                | 1.5%                | 1.8%                | 1.6%                 | 0.2%                 | 0.1%                  | 0.0%                  |
| -1.7%                | 0.8%                | 1.5%                | 1.8%                | 1.6%                 | 0.1%                 | 0.1%                  | 0.0%                  |
| -3.2%                | 0.5%                | 1.6%                | 1.7%                | 1.4%                 | 0.5%                 | 0.2%                  | 0.0%                  |
| -3.2%                | 0.8%                | 1.8%                | 1.7%                | 1.4%                 | 0.1%                 | 0.0%                  | 0.0%                  |

En la Figura 3.1 se muestran las curvas de error de los cinco contadores del modelo N1 así como los límites de error marcados por la normativa en función de sus diferentes caudales. Se puede observar que pese a que existe un punto crítico para un caudal de entre 30 y 100l/h, la curva de error se encuentra dentro de los límites establecidos.

Por lo que respecta al caudal de arranque, el pistón de este modelo comienza a girar a partir de 1.5l/h. Esto implica que este tipo de contadores cumplirían perfectamente con su cometido, ya que la posibilidad de registrar volúmenes a caudales bajos es una de las características por las cuales las empresas de abastecimiento optan por estos modelos.

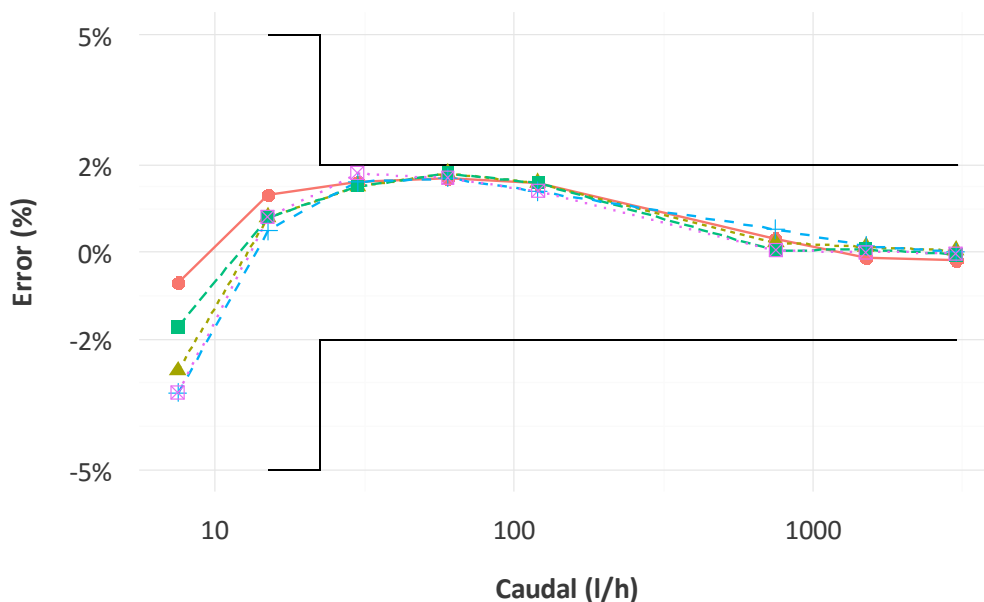


Figura 3.1. Curvas de error de los contadores del modelo N1

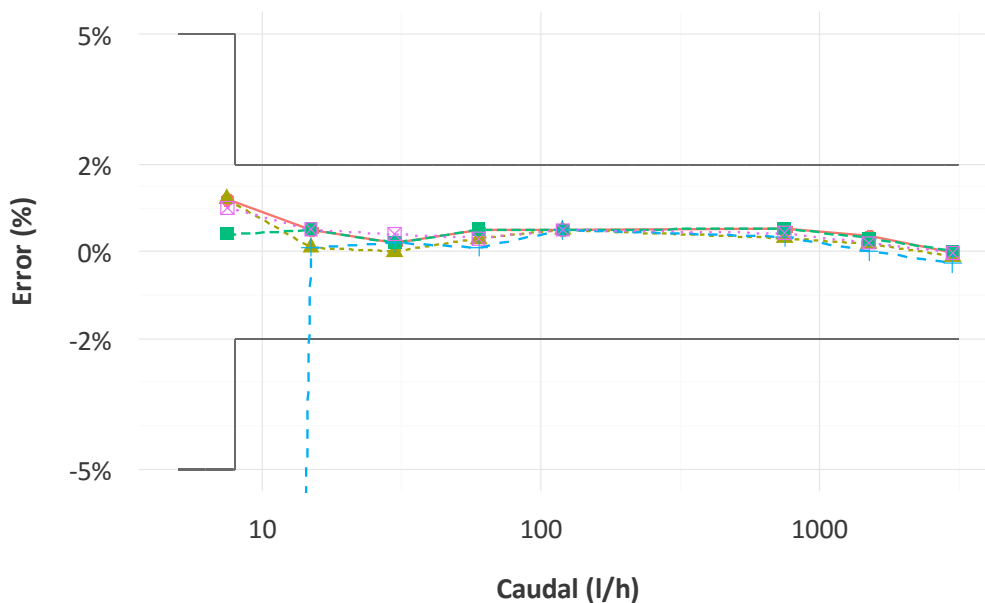
Modelo N2

El modelo N2 es, a priori y según las características de la Tabla 3.5 anterior, el más exigente en cuanto a especificaciones puesto que su clase metrológica es R500, es decir, sus límites de error son más restrictivos.

*Tabla 3.9. Error de ensayo de los diferentes contadores para el modelo N2*

| <i>E(7.5 l/h)</i> | <i>E(15 l/h)</i> | <i>E(30 l/h)</i> | <i>E(60 l/h)</i> | <i>E(120 l/h)</i> | <i>E(750 l/h)</i> | <i>E(1500 l/h)</i> | <i>E(3000 l/h)</i> |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 1.2%              | 0.5%             | 0.2%             | 0.5%             | 0.5%              | 0.5%              | 0.4%               | 0.0%               |
| 1.2%              | 0.1%             | 0.0%             | 0.3%             | 0.5%              | 0.3%              | 0.2%               | -0.1%              |
| 0.4%              | 0.5%             | 0.2%             | 0.5%             | 0.5%              | 0.5%              | 0.3%               | 0.0%               |
| -99.0%            | 0.1%             | 0.2%             | 0.1%             | 0.5%              | 0.3%              | 0.0%               | -0.3%              |
| 1.0%              | 0.5%             | 0.4%             | 0.3%             | 0.5%              | 0.4%              | 0.2%               | 0.0%               |

Sin embargo, se puede constatar en la Tabla 3.9 que existe un valor a 7.5l/h que no cumple con lo establecido. Los límites de error para este modelo de contador se encuentran en un  $\pm 5\%$  para caudales entre 5l/h y 8l/h y  $\pm 2\%$  para caudales superiores a 8l/h.



*Figura 3.2. Curvas de error de los contadores del modelo N2*

En la Figura 3.2 se puede observar gráficamente que al menos un contador de este modelo no cumple los límites de error para un caudal inferior a 15l/h situándose el caudal de 7.5l/h de dicho contador como el caudal de arranque.

Por lo que respecta al resto de contadores, el caudal de arranque se sitúa entre valores de 1.5l/h y 3l/h.

Modelo N3

Los valores de error del modelo N3 se muestran en la Tabla 3.10. Directamente se percibe que más de un valor no cumple con los errores máximos permitidos. De nuevo, el punto crítico situado entre 60l/h y 120l/h vuelve a ser el punto destacado, que, de la misma manera que el modelo N1, se encuentra ajustado a los límites de error llegando a superarlos para uno de los contadores.

Tabla 3.10. Error de ensayo de los diferentes contadores para el modelo N3

| <i>E(7.5 l/h)</i> | <i>E(15 l/h)</i> | <i>E(30 l/h)</i> | <i>E(60 l/h)</i> | <i>E(120 l/h)</i> | <i>E(750 l/h)</i> | <i>E(1500 l/h)</i> | <i>E(3000 l/h)</i> |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 1.2%              | 1.7%             | 1.7%             | 1.8%             | 2.1%              | 1.1%              | 0.5%               | -0.1%              |
| -99.4%            | 1.3%             | 1.7%             | 1.8%             | 1.9%              | 0.7%              | -0.1%              | -0.5%              |
| 1.4%              | 1.9%             | 1.9%             | 1.8%             | 1.7%              | 0.6%              | -0.3%              | -0.7%              |
| -99.2%            | 0.7%             | 1.3%             | 1.8%             | 1.7%              | 0.5%              | -0.3%              | -0.7%              |
| -99.6%            | 0.5%             | 1.1%             | 1.8%             | 1.7%              | 0.6%              | -0.1%              | -0.4%              |

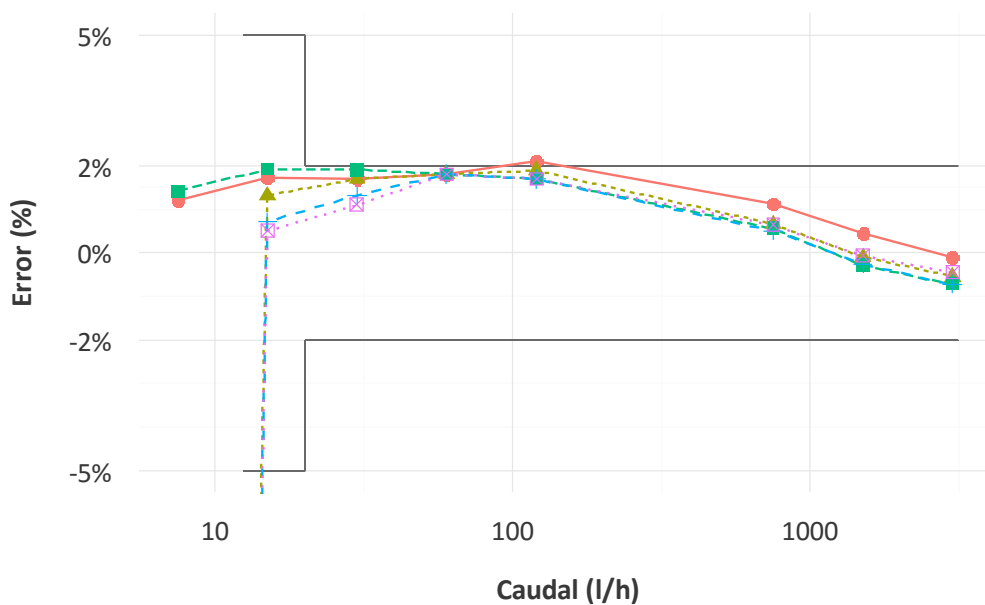


Figura 3.3. Curvas de error de los contadores del modelo N3

### 3. Estudio de verificación de contadores nuevos

---

Merece la pena destacar que los tres contadores que se encuentran prácticamente parados a caudal de 7.5l/h están compuestos por una carcasa de material composite (plástico) mientras que los otros dos contadores que responden mejor a caudal bajo poseen una carcasa de latón.

El error máximo permitido para este tipo de contadores se halla en un  $\pm 5\%$  para caudales entre 12.5l/h y 20l/h y  $\pm 2\%$  para caudales superiores a 20l/h.

#### Modelo N4

El modelo N4 es, en principio, uno de los modelos menos exigentes ya que su clase metrológica (R160) es la menos exigente, luego los límites de error no son tan ajustados como el resto de modelos.

A pesar de esto, tal y como muestra la Tabla 3.11 todos los valores cumplen con la normativa sobradamente y no se da la existencia de un punto crítico, pese a que vuelve a ser la zona de caudales de entre 60l/h a 100l/h donde el error es más desfavorable.

*Tabla 3.11. Error de ensayo de los diferentes contadores para el modelo N4*

| <i>E(7.5 l/h)</i> | <i>E(15 l/h)</i> | <i>E(30 l/h)</i> | <i>E(60 l/h)</i> | <i>E(120 l/h)</i> | <i>E(750 l/h)</i> | <i>E(1500 l/h)</i> | <i>E(3000 l/h)</i> |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| -1.2%             | -0.2%            | 0.4%             | 1.0%             | 0.9%              | -0.3%             | -0.8%              | -1.3%              |
| 0.0%              | 0.3%             | 0.8%             | 1.1%             | 0.7%              | -0.3%             | -0.8%              | -1.3%              |
| -2.1%             | -0.2%            | 0.3%             | 0.4%             | 0.7%              | -0.4%             | -0.9%              | -1.2%              |
| -1.8%             | -0.2%            | 0.6%             | 1.0%             | 0.6%              | -0.4%             | -0.9%              | -1.3%              |
| -1.7%             | -0.2%            | 0.1%             | 0.6%             | 0.7%              | -0.3%             | -0.9%              | -1.3%              |

Por lo que respecta a los errores máximos permitidos, estos corresponden con un  $\pm 5\%$  para caudales entre 15l/h y 25l/h y  $\pm 2\%$  para caudales superiores a 25l/h. La Figura 3.4 representa los valores mostrados en la tabla anterior.

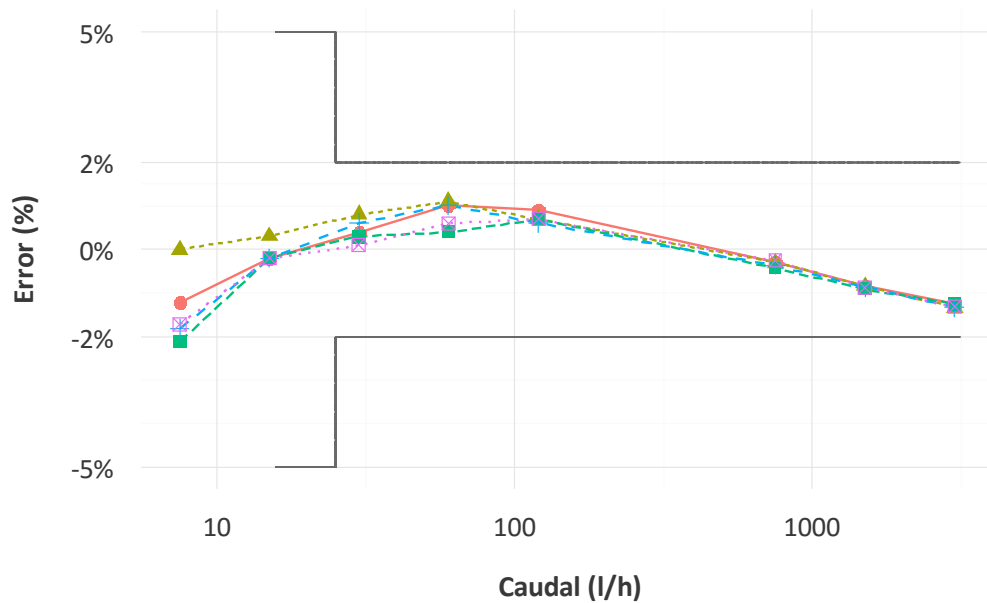


Figura 3.4. Curvas de error de los contadores del modelo N4

Por último, en la Figura 3.5 se muestra el valor promedio de las curvas de error para cada modelo así como los intervalos de confianza obtenidos. Las barras de error de los modelos N2 y N3 no se han dibujado para caudal 7.5l/h puesto que la desviación típica que estos introducen es muy alta y debido a la escala, no se verían adecuadamente representadas las curvas de error.

En esta figura se puede observar que todas las curvas promedio cumplen con la normativa exigida y por tanto el análisis de la curva de error se puede dar por satisfactorio. A pesar de esto, en los modelos N2 y N3 puede darse el caso de que para caudales inferiores a 15 l/h el pistón no trabaje de manera adecuada y por ello no es capaz de contabilizar una cantidad de volumen importante a bajos caudales, donde, al fin y al cabo, son los caudales para los cuales se había seleccionado este tipo de contador. Es por ello que la empresa de abastecimiento debería, por un lado, ampliar la muestra de contadores a ensayar para confirmar este hecho y en el caso de que se confirmara, tomar una serie de medidas para evitarlo.

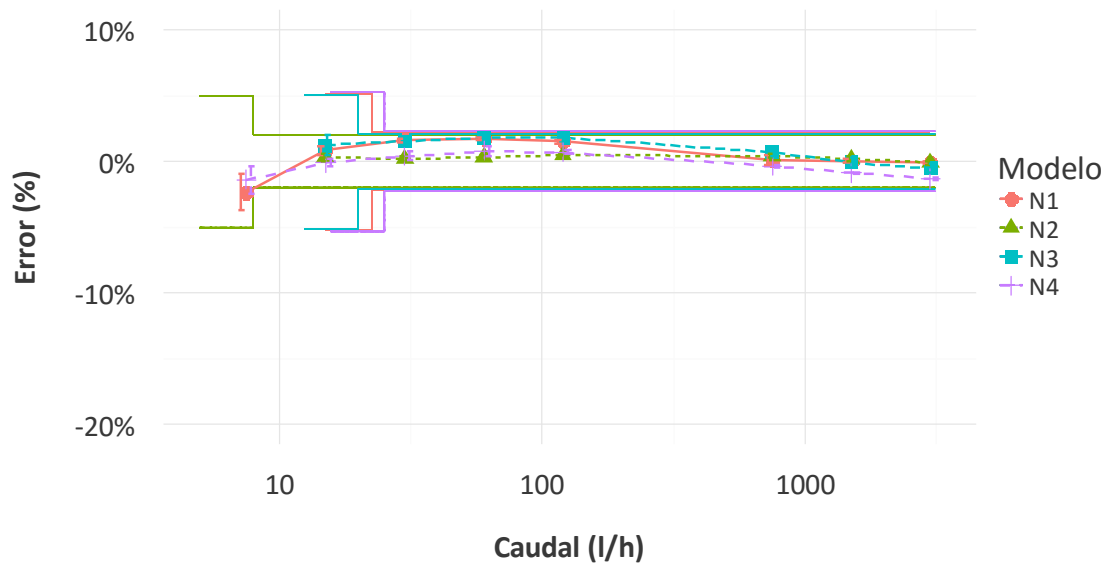


Figura 3.5. Curvas de error promedio de los diferentes modelos e intervalos de confianza

Realizando un análisis más exhaustivo respecto al caudal de 7.5l/h, la Tabla 3.12 muestra los estadísticos más representativos respecto a dicho caudal para los diferentes modelos. Pese a que la muestra es muy baja y no se pueden sacar conclusiones definitivas, sí que se observa que la dispersión de los errores en los modelos N2 y N3 es elevada, mientras que en los modelos N1 y N4 es bastante baja. Esto lleva a la conclusión de que la media de la muestra de contadores del modelo N2 y N3 puede estar bastante alejada de la media poblacional y refuerza la idea de que una muestra mayor es necesaria para aclarar estos supuestos.

Tabla 3.12. Desviación, error estándar e intervalos de confianza para caudal de 7.5l/h

| Modelo | Caudal  | Muestra | Error  | Desv. estándar | Error estándar | Int. Confianza |
|--------|---------|---------|--------|----------------|----------------|----------------|
| N1     | 7.5 l/h | 5       | -2.3%  | 1.1%           | 0.5%           | 1.4%           |
| N2     | 7.5 l/h | 5       | -19.0% | 44.7%          | 20.0%          | 55.5%          |
| N3     | 7.5 l/h | 5       | -59.1% | 55.2%          | 24.7%          | 68.5%          |
| N4     | 7.5 l/h | 5       | -1.4%  | 0.8%           | 0.4%           | 1.0%           |

De manera visual la Figura 3.5 reitera lo ya mencionado varias veces a lo largo de este trabajo. Cada modelo de contador presenta una curva de error diferente. Es más, se ha podido comprobar también que incluso dentro de un mismo modelo, cada contador presenta una curva de error diferente. Incluso en los modelos N1 y N4, que poseen las mismas características metrológicas se aprecian diferencias significativas. Es por esto que

un análisis previo a la instalación de los diferentes modelos de contador es necesaria llevarla a cabo para conocer el comportamiento de todos y cada uno de los modelos.

Con el fin de establecer una comparativa a los resultados mostrados, para el estudio de (Barfus, et al., 2011) y (Bowen, et al., 1991) las curvas de error de los modelos A1 y A2 son las que se muestran en la Figura 3.6.

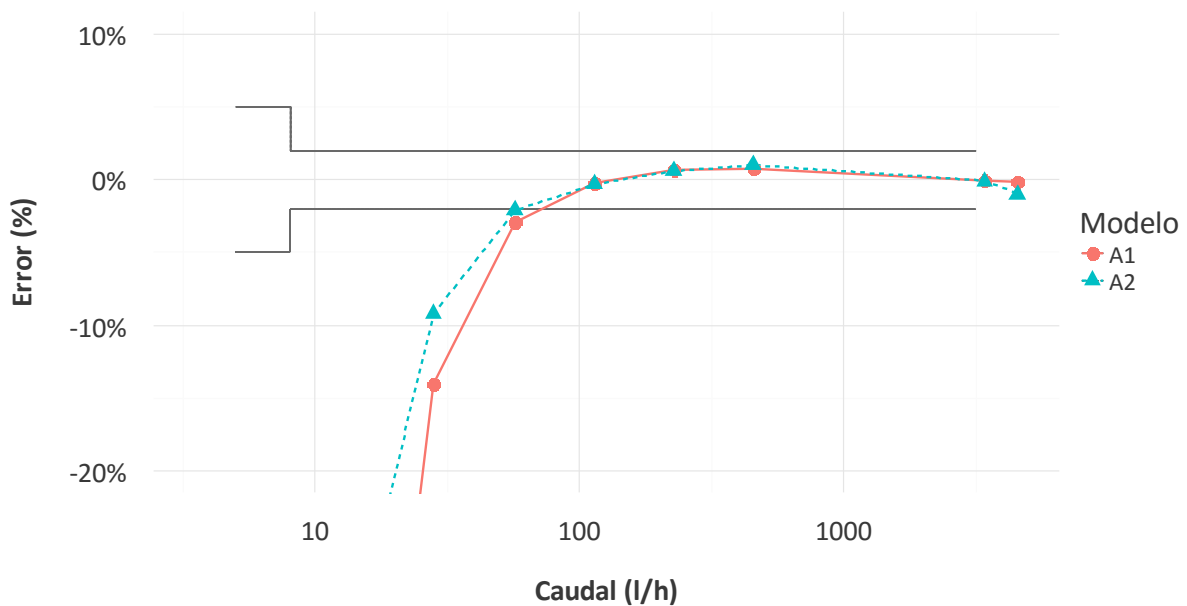


Figura 3.6. Curva de error promedio de los modelos A1 y A2 y límites de error (Bowen, et al., 1991) (Barfus, et al., 2011)

En este estudio se observa que los errores de las curvas de error para caudales de 7.2l/h y 14.2l/h son de 97% y 60% de error respectivamente para el modelo A1 mientras que el modelo A2 para un caudal de 14.2l/h posee un error de -32%. Resultados nada similares a los obtenidos en el estudio anterior llevado a cabo.

Por otro lado, en (Arregui, et al., 2014), los resultados de los ensayos, llevados a cabo en el laboratorio del ITA, se muestran en forma de curva de error en la Figura 3.7. Los límites de error marcados por la normativa para cada modelo se encuentran también delimitados.

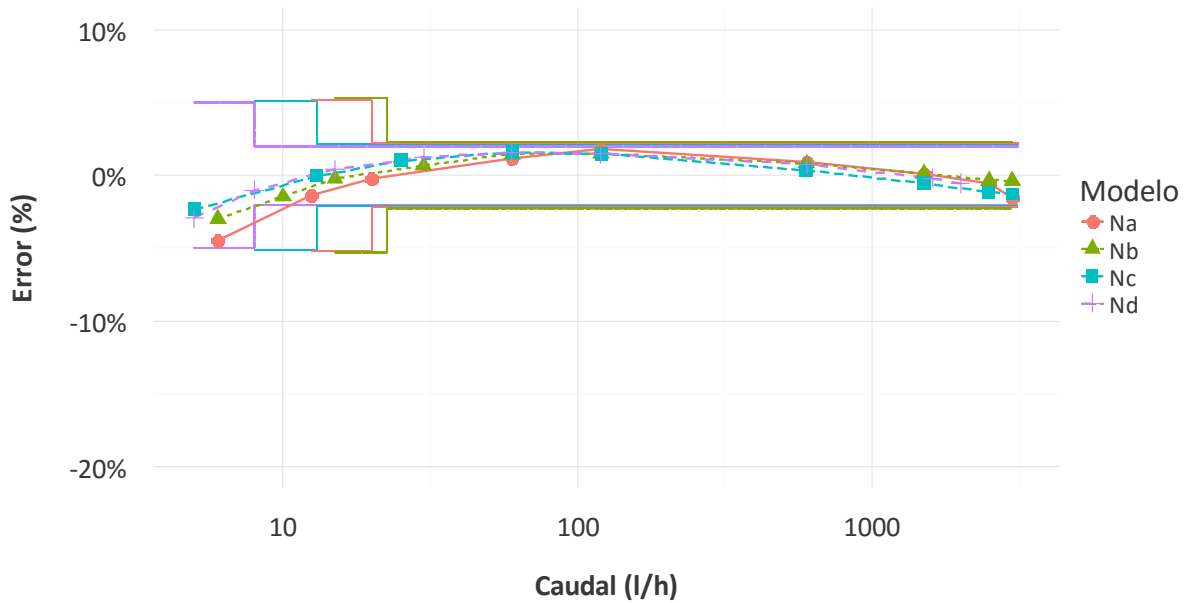


Figura 3.7. Curva de error promedio de los diferentes modelos y límites de error (Arregui, et al., 2014)

Como muestra la curva de error promedio de los diferentes modelos, todos cumplen las limitaciones propuestas por la normativa ISO actual. Es importante destacar que se da la existencia de una zona crítica, alrededor de 120l/h que si bien cumple la normativa, está muy próxima de no cumplirla. El valor de error promedio de los modelos se encuentra alrededor de 1.6%, cercano al 2% que marca el límite.

Pese a que no cabe duda de la importancia de la curva de error en un contador, es importante fijarse en la desviación que muestran los valores de estas curvas. Estos valores se aprecian mediante un diagrama de caja y bigotes.

En la figura posterior se observa el diagrama de caja y bigotes para los diferentes modelos en función del error obtenido en laboratorio y sus caudales de ensayo. Se aprecia como a caudales bajos la dispersión del error, marcada por un mayor tamaño de la caja (mayor rango intercuartílico), es mayor, situándose valores fuera del límite de las cajas, es decir, valores anómalos.



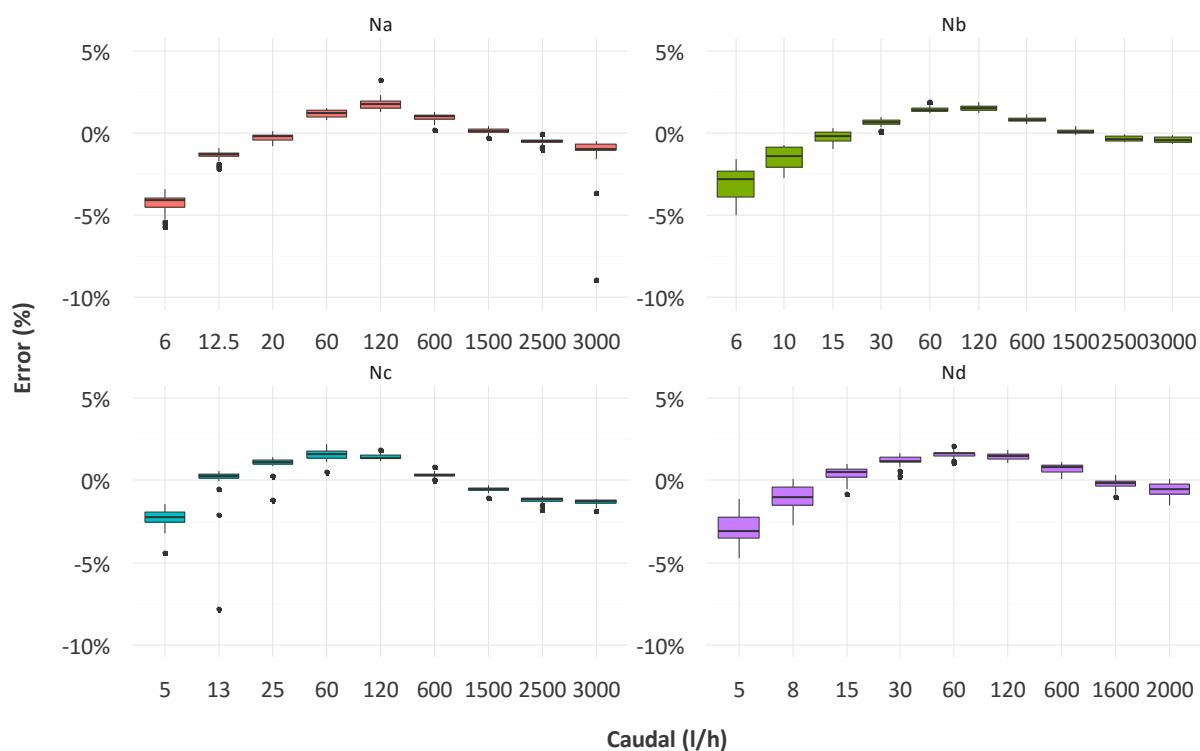


Figura 3.8. Diagrama de caja y bigotes para los diferentes modelos

A medida que aumenta el caudal de ensayo, el diagrama de cajas es cada vez más pequeño, llegando a veces incluso a reducirse a una línea. A pesar de esto, para el modelo Na se dan algunos contadores con valores anómalos, para 120l/h y para 3000l/h, valores que no cumplirían con la normativa exigida.

Por lo que respecta al modelo Nc, este presenta valores anómalos para un caudal igual o inferior a 120l/h, no cumpliendo con la normativa en estos casos.

En cuanto a los modelos Nb y Nd, muestran una dispersión en los valores mínima demostrando valores cercanos al 0% en su curva de error.

El diagrama de caja y bigotes es útil para conocer la dispersión de los valores. Una mayor dispersión de la muestra puede indicar que la calidad de la fabricación de los contadores es baja mientras que un diagrama donde prácticamente no se aprecia la caja demuestra que la dispersión es mínima y que la calidad de fabricación es elevada.

El resultado de las diferentes curvas de error obtenidas se muestra en una comparativa tanto en la Figura 3.9 como en la Figura 3.10.

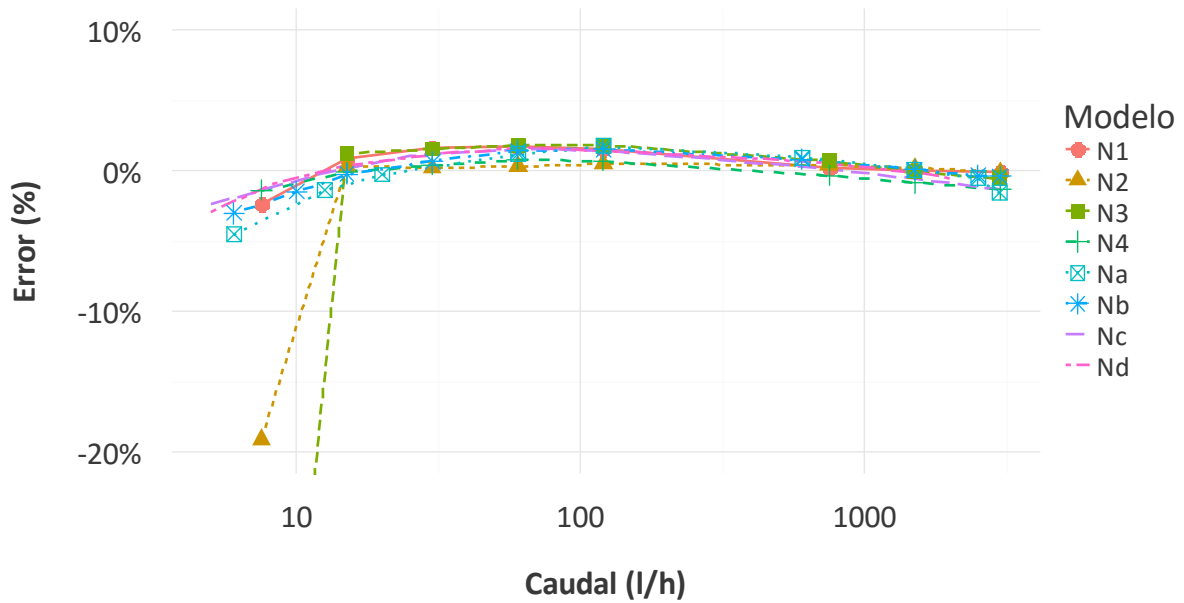


Figura 3.9. Curvas de error de los diferentes modelos analizados (1)

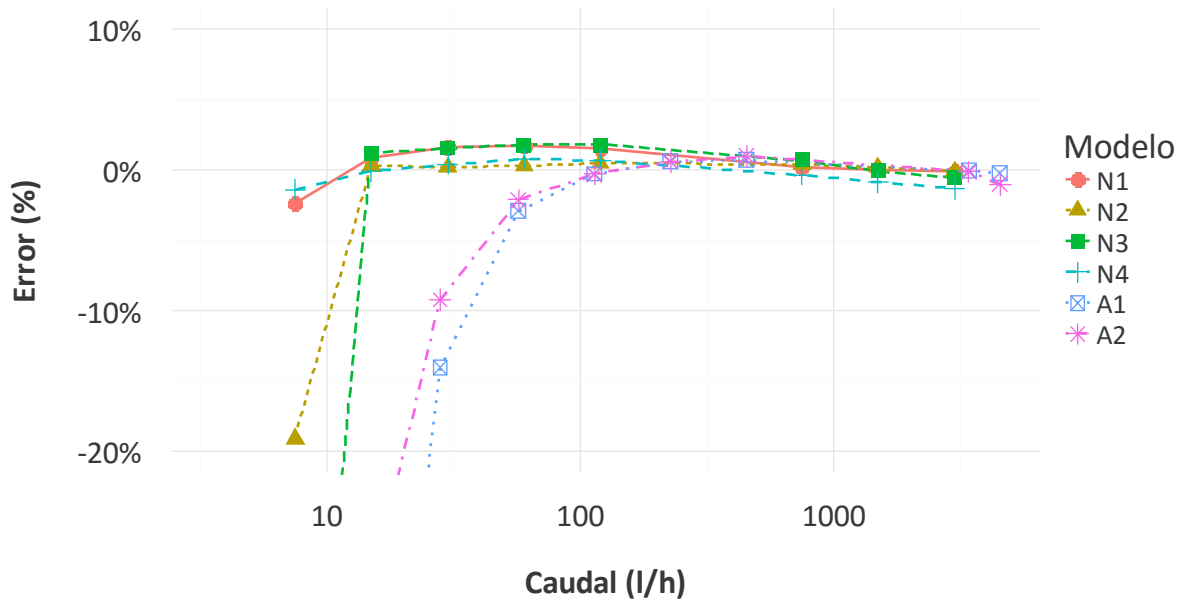


Figura 3.10. Curvas de error de los diferentes modelos analizados (2)

### 3.3 Cálculo del error global

El error obtenido en laboratorio caracteriza el porcentaje de agua que un contador no puede registrar con exactitud para cada caudal en concreto. Pese a que este error se obtiene a diferentes caudales, se hace difícil poder establecer ciertas comparativas entre diferentes contadores al existir tanta diversidad de caudales y errores. Para tal fin, se define

el error global como un parámetro que es capaz de caracterizar el rendimiento de un contador a raíz de los errores obtenidos en laboratorio y del patrón de consumo de los usuarios. De esta manera, se puede establecer una comparativa entre ese error y el de otros contadores de características metrológicas iguales o diferentes.

### 3.3.1 Patrón de consumo

El rendimiento real de los contadores en campo así como su error global, va a depender no solo de las curvas de error de cada contador, sino también del caudal al que los usuarios consumen esa agua. Por lo tanto, la cantidad de agua no registrada por un contador solo puede ser calculada si la distribución de caudales consumidos por el usuario es conocida. Para destacar la importancia del patrón de consumo sobre el error global y para la obtención de este, se han utilizado cuatro patrones de consumo diferente (a diferentes caudales) y que han sido medidos por varios autores para incluirlos en diferentes investigaciones. Estos patrones se detallan a continuación.

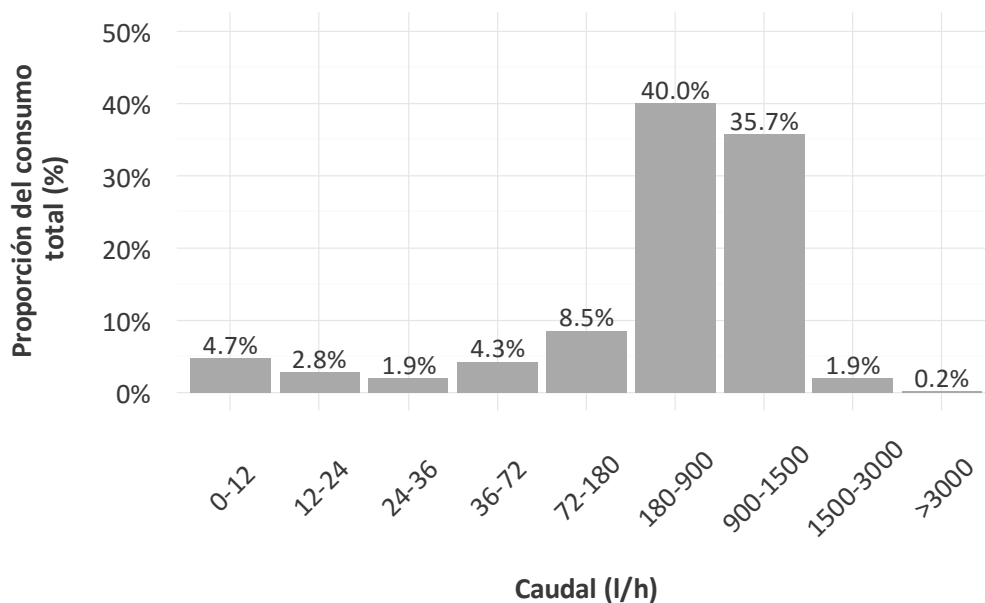


Figura 3.11. Patrón de consumo: Tipo I

*Patrón de consumo Tipo I:* Este patrón de consumo ha sido publicado en (Arregui, et al., 2007). Está asociado con apartamentos en viviendas mediante suministro directo, es decir, las bombas están conectadas directamente a la red. El patrón de consumo fue obtenido

### 3. Estudio de verificación de contadores nuevos

tras monitorizar 389 apartamentos localizados en varias ciudades de España de gran tamaño durante un periodo de tiempo de una o dos semanas. El tiempo de monitorización comprende desde 2003 hasta 2005.

*Patrón de consumo Tipo II:* Este patrón de consumo ha sido publicado también en (Arregui, et al., 2007) y corresponde a viviendas alimentadas a través de depósito dentro de su instalación particular. Este patrón fue calculado a raíz de monitorizar 58 viviendas en tres ciudades de España de tamaño medio bajo durante dos semanas.

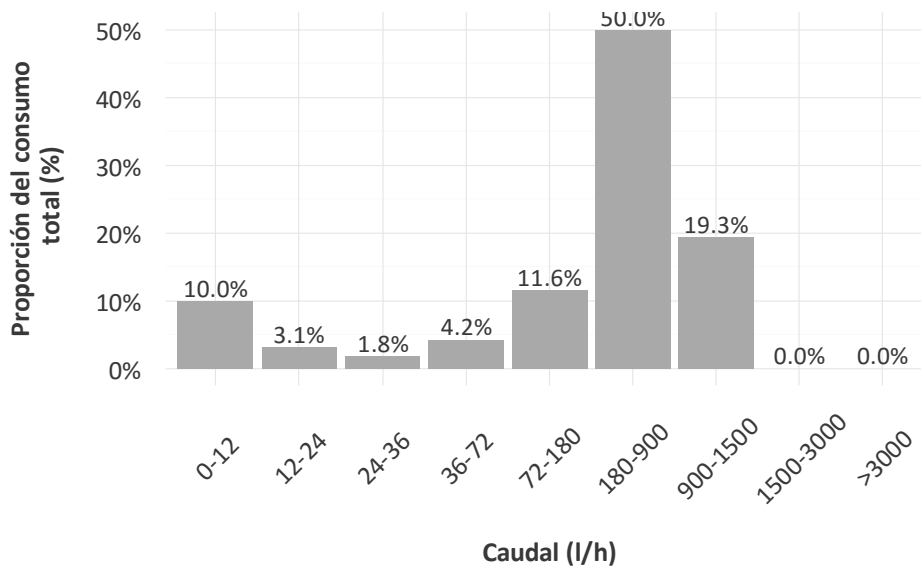


Figura 3.12. Patrón de consumo: Tipo II

*Patrón de consumo AWWA:* "AWWA Research Foundation" publicó un informe en el que fueron monitorizadas 706 hogares en cinco ciudades a lo largo de Estados Unidos. La muestra a su vez fue clasificada en función del tipo de vivienda (unifamiliar o plurifamiliar), el tamaño (mayor o menor de 186 m<sup>2</sup>) y la estación del año en la que se llevaron a cabo las mediciones (verano o invierno). Los resultados de este estudio consideraron tanto uso exterior como interior. Los patrones de consumo obtenidos resultaron ser muy similares y las diferencias encontradas entre caudales bajos y altos fueron mínimas según los diferentes usuarios monitorizados.

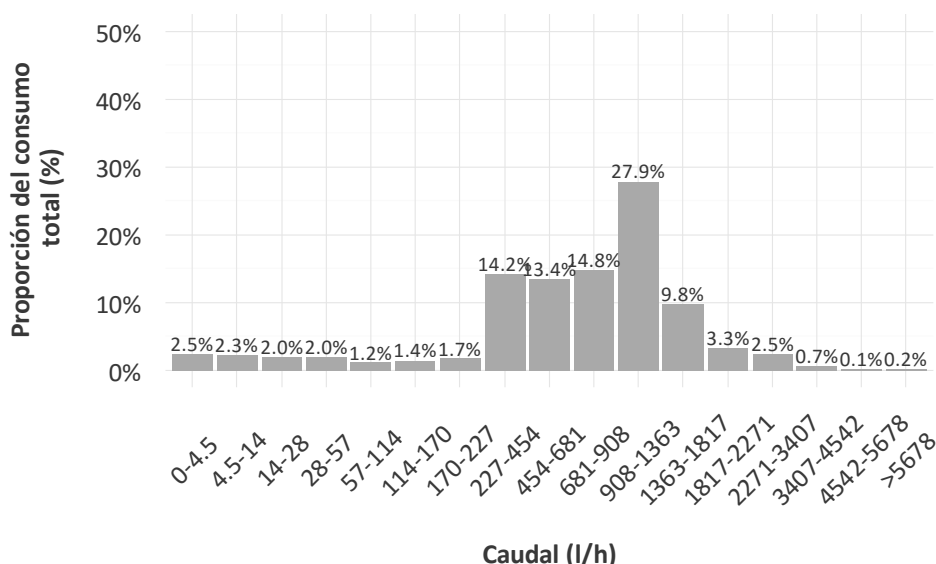


Figura 3.13. Patrón de consumo: AWWA

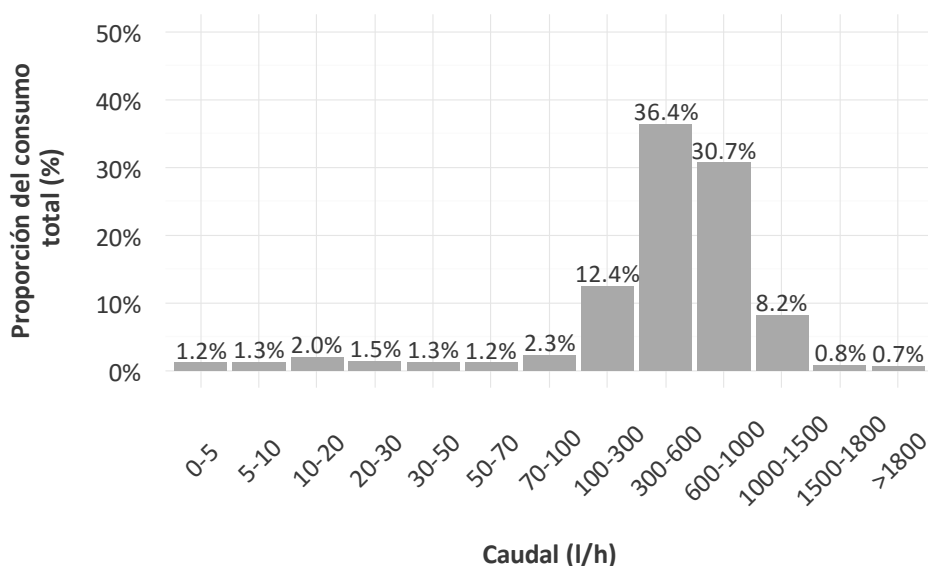


Figura 3.14. Patrón de consumo: SEQREUS

*Patrón de consumo SEQREUS:* El último patrón de consumo considerado fue publicado en 2011 por la Urban Water Security Research Alliance (Beal & Stewart, 2011). Este patrón fue calculado como un promedio de tres periodos monitorizados, dos en verano y uno en invierno, entre junio de 2010 y junio de 2011. El número de viviendas monitorizadas fueron de 213, 219 y 110 para cada periodo respectivamente. Las viviendas estudiadas estaban situadas en diferentes ciudades del sur este de Queensland (Australia) y contemplaban tanto uso exterior como uso interior. Sin embargo, el uso de riego únicamente se clasificaba como el 5% del consumo de agua total.

Tabla 3.13. Datos básicos sobre los estudios de los patrones de consumo de agua

|                               | Tipo I                                  | Tipo II                                 | AWWA  | SEQREUS                    |
|-------------------------------|---|---|---|----------------------------|
| Tipo de uso                   | Interior                                | Interior                                | Interior/Exterior   | Interior/Exterior          |
| Localidad - Año               | España<br>2003-2005                     | España<br>2003-2007                     | USA<br>1989-1990  | Australia<br>2010-2011     |
| Frecuencia de registro        | Tiempo de<br>ocurrencia pulso:<br>0.01s | Tiempo de<br>ocurrencia pulso:<br>0.01s | Intervalos de<br>registro de caudal<br>de alta resolución | 5s                         |
| Volumen de resoluc. del pulso | 0.1l                                    | 0.1l                                    | 0.065l  | 0.014l                     |
| Objetivo                      | Determinación<br>caudales consumo       | Determinación<br>caudales consumo       | Determinación<br>caudales consumo                         | Estudio usos finales       |
| Referencia                    | Arregui et al.<br>(2006)                | Arregui et al.<br>(2006)                | Bowen et al.<br>(1993)                                    | Beal and Stewart<br>(2011) |

El resumen de los datos básicos de los diferentes patrones de consumo empleados se muestra en la Tabla 3.13.

### 3.3.2 Error global

El error global de un contador representa la cantidad de agua no registrada por dicho contador por cada 100l de agua consumida según el patrón de consumo del usuario (Arregui et al. 2006).

El cálculo del error global consiste en una ponderación entre el patrón de consumo de los usuarios y la curva de error del contador ensayado. En (Arregui, et al., 2007) a diferencia de otros estudios, se propone un método para el cálculo del error global que considera tanto el consumo a caudales medios y altos como a caudales por debajo del caudal de arranque. La ponderación se realizaría como indica la ecuación (3.2).

$$Error\ global = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{Contador}(\%) \cdot C_i(\%) \quad (3.2)$$

Donde  $\varepsilon$  corresponde con el error del contador a cada caudal,  $C$  corresponde con el consumo de la vivienda, que varía en función del patrón de consumo e  $i$  corresponde con el número de rangos de caudales correspondientes al patrón de consumo.

Dicho método de ponderación se basa en las siguientes suposiciones:

- El error de medición a caudal de arranque es del -20%.

- La evolución de la curva de error entre los caudales de error conocido es lineal.
- En cada intervalo de caudales del patrón de consumo, el consumo está repartido.
- Todo el volumen consumido por debajo del caudal de arranque no se registra.
- El volumen consumido en cada intervalo del patrón de consumo se registra con el error al caudal medio del mismo, obtenido de la reconstrucción de la curva de error.

A modo de ejemplo, el cálculo del error global utilizando el patrón de consumo Tipo I se muestra en la Tabla 3.14:

Una vez conocido el procedimiento teórico para el cálculo del error global es importante mencionar que todos los cálculos llevados a cabo en este estudio y que hacen referencia al error global han sido llevados a cabo a través del software libre Woltmann, el cual ha sido específicamente diseñado para este propósito.

*Tabla 3.14. Ejemplo de cálculo del error global de un contador*

| <i>Rango caudales<br/>(l/h)</i> | <i>Patrón consumo:<br/>Tipo I (%)</i> | <i>Error del contador<br/>(%)</i> | <i>Volumen registrado<br/>(%)</i> |
|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0-12 l/h                        | 4.7%                                  | -100%                             | 0.00%                             |
| 12-24 l/h                       | 2.8%                                  | -100%                             | 0.00%                             |
| 24-36 l/h                       | 1.9%                                  | -68%                              | 0.16%                             |
| 36-72 l/h                       | 4.3%                                  | -52%                              | 0.9%                              |
| 72-180 l/h                      | 8.5%                                  | -11%                              | 3.83%                             |
| 180-900 l/h                     | 40.0%                                 | 0%                                | 8.50%                             |
| 900-1500 l/h                    | 35.7%                                 | -0.8%                             | 75.09%                            |
| 1500-3000 l/h                   | 1.9%                                  | -0.8%                             | 1.88%                             |
| >3000 l/h                       | 0.2%                                  | -0.8%                             | 0.20%                             |
|                                 |                                       | Total                             | 90.6%                             |
|                                 |                                       | Error                             | -9.4%                             |

Para el análisis, los cuatro patrones de consumo han sido combinados con las curvas de error obtenidas en los ensayos para así poder determinar el error global. Como ya se ha visto anteriormente, el error global depende del consumo de agua a bajos caudales, que corresponde con el área donde el error de los contadores es mayor.

Con estas consideraciones, los cuatro patrones de consumo usados en este proyecto pueden ser organizados dependiendo de la dificultad de un contador para medir cada

### 3. Estudio de verificación de contadores nuevos

distribución de consumo de agua. El patrón de consumo más complicado de medir es el Tipo II pues considera que el 14.9% del agua consumida está por debajo de 36l/h. En el otro extremo se encuentra el patrón SEQREUS que considera que aproximadamente el 6.3% del agua consumida está por debajo de 36l/h. A la vista de estos resultados, es evidente que el error global de los contadores calculados usando el patrón Tipo II será mucho mayor que el resto de patrones de consumo, para los cuales la cantidad de agua consumida a bajos caudales es claramente menor.

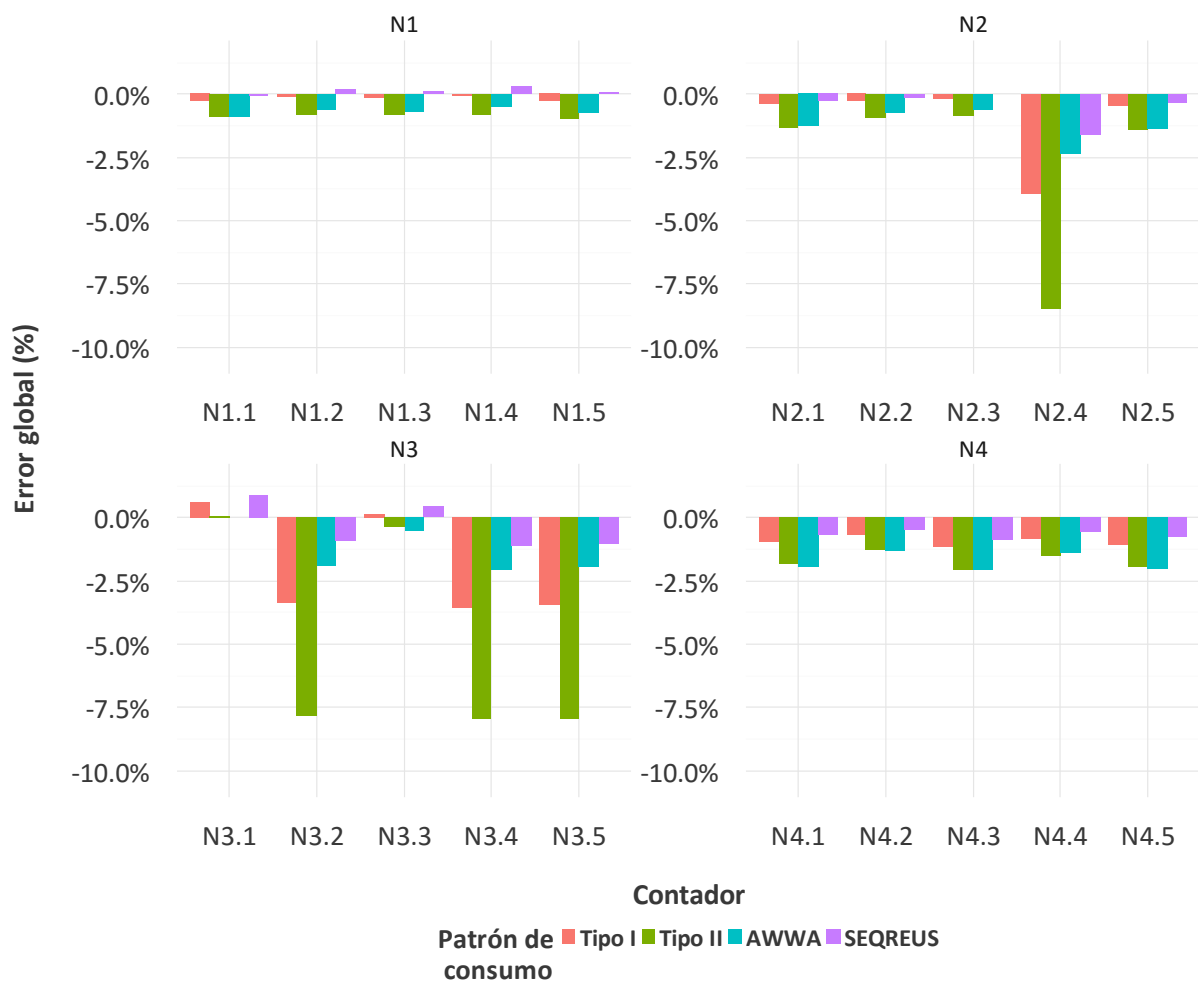


Figura 3.15. Error global para cada contador en función del patrón de consumo

La Figura 3.15 refleja visualmente lo indicado en el párrafo anterior donde se puede observar que el patrón de consumo más desfavorable incrementa las diferencias en el rendimiento de los contadores en campo.

Los valores de la Figura 3.15 se reflejan en la Tabla 3.15, Tabla 3.16, Tabla 3.17, Tabla 3.18:



Tabla 3.15. Error global de cada contador del modelo N1 en función del patrón de consumo

| Patrón/Contador | N1.1   | N1.2   | N1.3   | N1.4   | N1.5   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tipo I          | -0.28% | -0.10% | -0.15% | -0.05% | -0.25% |
| Tipo II         | -0.88% | -0.81% | -0.81% | -0.79% | -0.98% |
| AWWA            | -0.87% | -0.61% | -0.69% | -0.53% | -0.76% |
| SEQREUS         | -0.05% | 0.20%  | 0.12%  | 0.27%  | 0.03%  |

En cuanto a los resultados de error global del modelo N1, todos se encuentran entre el 0% y el -1%. Estos valores se mantienen dentro de unos límites lógicos y acordes a un contador nuevo. La diferencia de error entre los diferentes patrones de consumo es pequeña puesto que el buen rendimiento de estos contadores a caudales bajos hace mínima esta diferencia.

Tabla 3.16. Error global de cada contador del modelo N2 en función del patrón de consumo

| Patrón/Contador | N2.1   | N2.2   | N2.3   | N2.4   | N2.5   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tipo I          | -0.38% | -0.29% | -0.17% | -3.92% | -0.47% |
| Tipo II         | -1.31% | -0.92% | -0.85% | -8.46% | -1.39% |
| AWWA            | -1.24% | -0.76% | -0.62% | -2.32% | -1.33% |
| SEQREUS         | -0.26% | -0.13% | 0.00%  | -1.60% | -0.33% |

En la Tabla 3.16 un contador del modelo N2 presenta un error global bastante elevado. Este contador, que previamente se vio que a caudal 7.5l/h su error caía a -99% es el que produce este incremento de error global. Debido a que este error se produce a caudales bajos, donde el patrón Tipo II da más importancia que el resto de patrones a este tipo de caudales, es por ello que esta diferencia se ve tan agravada.

Tabla 3.17. Error global de cada contador del modelo N3 en función del patrón de consumo

| Patrón/Contador | N3.1  | N3.2   | N3.3   | N3.4   | N3.5   |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Tipo I          | 0.60% | -3.38% | 0.14%  | -3.54% | -3.47% |
| Tipo II         | 0.05% | -7.83% | -0.35% | -7.97% | -7.94% |
| AWWA            | 0.02% | -1.91% | -0.51% | -2.07% | -1.97% |
| SEQREUS         | 0.91% | -0.92% | 0.44%  | -1.09% | -1.02% |

El modelo N3, que a priori es el más exigente, pero una vez ensayados se vio que sus curvas de error no reflejaban lo mismo, muestra tres contadores con un error global elevado. Al igual que para el modelo N2, estos contadores mostraban un error a caudal de 7.5l/h que dejaba ver que el contador estaba prácticamente parado. Es por ello que su error global es

más negativo y por el mismo razonamiento de antes, el peor valor lo muestra el patrón de consumo Tipo II.

Tabla 3.18. Error global de cada contador del modelo N4 en función del patrón de consumo

| Patrón/Contador | N4.1   | N4.2   | N4.3   | N4.4   | N4.5   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tipo I          | -0.98% | -0.71% | -1.16% | -0.85% | -1.06% |
| Tipo II         | -1.83% | -1.25% | -2.05% | -1.46% | -1.94% |
| AWWA            | -1.93% | -1.30% | -2.07% | -1.40% | -1.98% |
| SEQREUS         | -0.69% | -0.44% | -0.86% | -0.55% | -0.76% |

Por lo que respecta al modelo N4 y tal y como muestra la Tabla 3.18 ningún contador posee un error fuera de lo común y todos se encuentran en valores de 0 a -2%. Al igual que para el modelo N1, las diferencias de error global entre el patrón Tipo II y el patrón AWWA son mínimas, síntoma de que no se producen grandes errores a bajo caudal.

Volviendo a hacer hincapié a los estudios ya mencionados, el resultado del error global según los diferentes patrones de consumo para los modelos de los estudios de (Bowen, et al., 1991) y (Barfus, et al., 2011) son los que se muestran en la Figura 3.16.

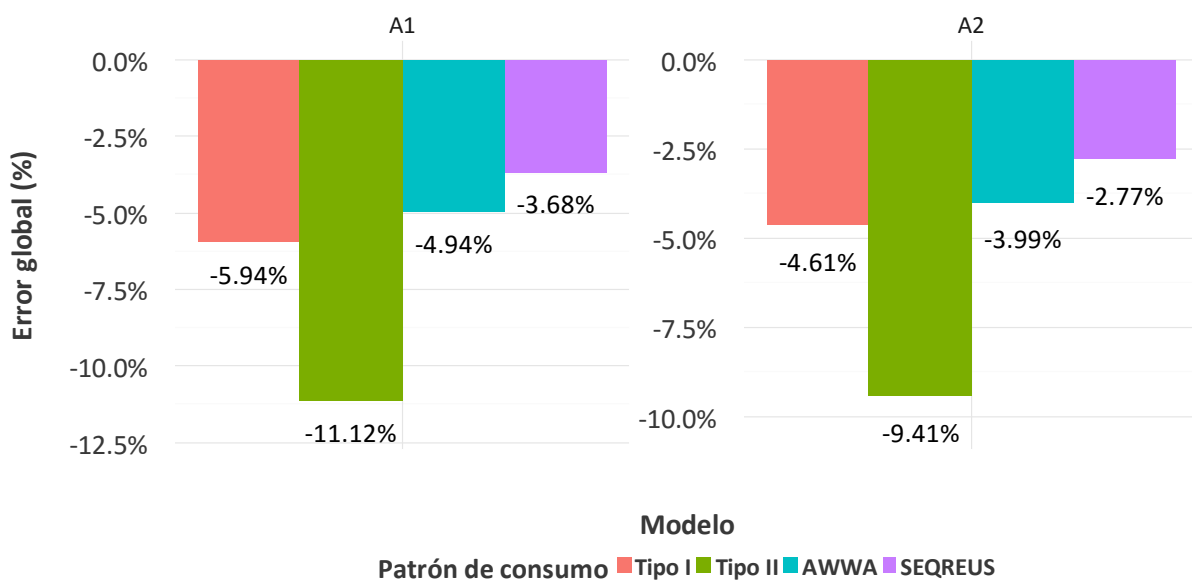


Figura 3.16. Error global en función de los diferentes patrones de consumo para los modelos A1 y A2 (Bowen, et al., 1991) (Barfus, et al., 2011)

En esta se puede apreciar que el error global de un contador volumétrico se encuentra en valores de entre -3 y -5% llegando incluso a valores máximos de -11.12% o -9.41% tanto

para A1 como A2 respectivamente. Además, se observa visiblemente la importancia del patrón de consumo cuando el error del contador es superior a valores de -1 o -2%. Cuanto mayor es el error global de un contador, mayores diferencias se pueden apreciar entre los diferentes patrones de consumo.

Por otro lado, para el estudio de (Arregui, et al., 2014), una vez analizada la curva de error se obtiene también el error global de los diferentes modelos de contador para cada patrón de consumo. Tanto la obtención del error global como los patrones de consumo se encuentran detallados en el apartado 3.3 Cálculo del error global.

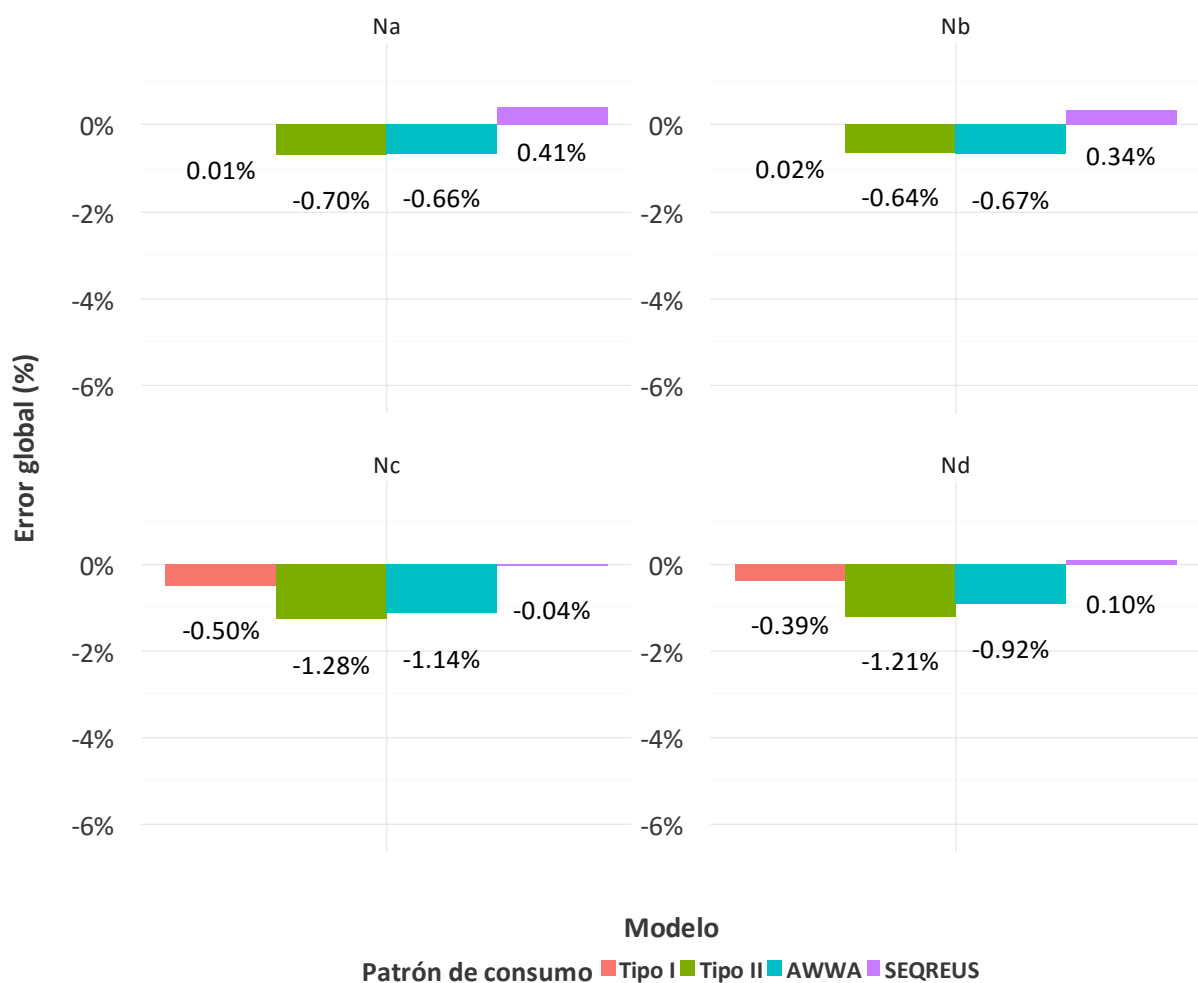


Figura 3.17. Error global para los diferentes modelos según distintos patrones de consumo (Arregui, et al., 2014)

En esta figura al igual que para el estudio anterior, se refleja la importancia del patrón de consumo. Mientras que para el patrón Tipo I el error generalmente es mínimo, para patrones Tipo II o patrón AWWA las diferencias se acentúan. Sin embargo, para el patrón Tipo SEQREUS, los valores tienden hacia el lado positivo de la gráfica debido a que el mayor

### 3. Estudio de verificación de contadores nuevos

porcentaje de consumo de este patrón se encuentra en los lados de error positivo de la curva de error. Con estos resultados se observa que pese a que existen diferencias en el cálculo del error global en función del patrón de consumo, si el error es mínimo, las diferencias entre el error de cada modelo también son mínimas. Es por ello que la elección de un contador volumétrico no debe hacerse en función de su error inicial, puesto que estos son muy similares.

En cualquier caso, y a diferencia del estudio de Barfuss y Bowen, el rendimiento del contador volumétrico es excepcional puesto que presenta para el peor de los casos un error global del -1.28%, dando lugar a que de cada 100 litros de agua que atraviese el contador solo dejaría de registrarse un litro.

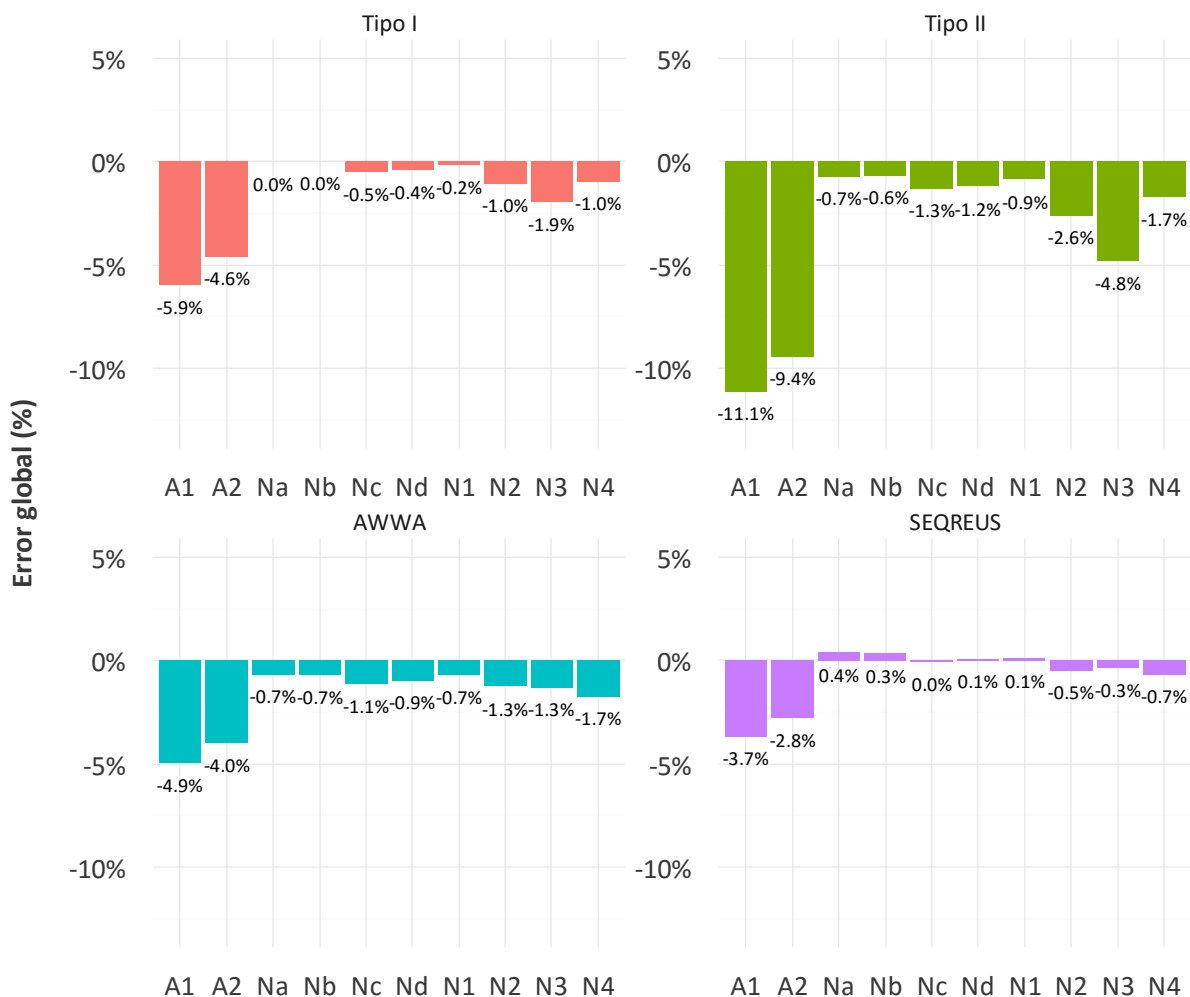


Figura 3.18. Comparativa del error global para los diferentes modelos y patrones de consumo

Por último, la comparativa de los errores globales de los diferentes modelos en función de los diferentes patrones de consumo se muestra en la Figura 3.18.

Esta comparativa muestra la diferencia existente entre los 10 modelos. Mientras que los contadores ensayados en este estudio y en el estudio de (Arregui, et al., 2014) muestran valores de error global para un contador volumétrico de desplazamiento positivo en un intervalo del 0 al -2%, para el ensayo de (Bowen, et al., 1991) y (Barfus, et al., 2011) estos presentan valores cercanos al -5% e inferiores, llegando a valores de -11.1% y -9.4% para A1 y A2 respectivamente.

## 3.4 Conclusiones

Tanto la recopilación de estudios anteriores como el análisis llevado a cabo en este capítulo muestra información importante sobre los resultados que pueden esperarse respecto al rendimiento en campo de contadores volumétricos nuevos. Varias conclusiones generales se pueden extraer:

- El error global, que se define como un estimador del rendimiento del contador, es función de dos parámetros como son la curva de error de un contador y el patrón de consumo de los usuarios.
- La curva de error de cada contador es diferente (ya sea respecto a un mismo modelo o diferente) y esta es difícil de predecir sin realizar ningún tipo de ensayo.
- La forma en la que los usuarios consumen agua (patrón de consumo) es fundamental para conocer cómo se degrada el contador. Este patrón no es fácil de obtener y patrones con diferentes distribuciones en el consumo pueden marcar que la retirada de un contador se produzca antes o después del tiempo estimado.

En particular, se puede decir que la curva de error de un contador volumétrico es una curva decreciente después de un máximo, que como se ha visto se encuentra cercano a 120l/h. Por ello, no es raro encontrar contadores que a 3000l/h muestren un error negativo. De hecho, todos los modelos ensayados muestran valores negativos para dicho caudal.

En relación con los diferentes patrones de consumo, el error global de los contadores que poseen errores similares a cada caudal, es decir, baja dispersión en los valores de error, se ve mínimamente afectado por el patrón de consumo (modelos N1, N2 o N4). Sin embargo, los contadores que a bajo caudal poseen grandes errores (contador N2.4 y modelo N3), ven su error global muy modificado por los patrones de consumo que dan importancia a los caudales bajos (patrón Tipo I o Tipo II). Este razonamiento refuerza la teoría de que el patrón de consumo es fundamental para determinar el error global de los contadores.

El resultado del error global obtenido para los contadores ensayados es bastante satisfactorio, tal y como muestra la Tabla 3.19. Las empresas de abastecimiento optan por contadores de tipo volumétrico con el fin de detectar caudales bajos donde otro modelo de contador no sería capaz de detectarlos. El error a 7.5l/h de los modelos ensayados se encuentra cercano al 0% y esto es señal de que realizan el trabajo de manera adecuada. A pesar de esto, hay una serie de contadores que muestran un error cercano al -100% para este caudal, señal de que no están cumpliendo correctamente su cometido. En concreto, cuatro contadores muestran un error cercano a este valor y considerando que la muestra ensayada es de 20 contadores, esto corresponde con un 20% de la muestra. Este valor, aunque un tanto alarmista, no se debe tomar más que como lo que es, un valor. Para sacar conclusiones definitivas, como se ha dicho anteriormente, la muestra debería ampliarse, prestando especial atención al error a estos caudales.

*Tabla 3.19. Error global promedio por modelo y patrón de consumo*

| <i>Patrón</i>   | <i>N1</i> | <i>N2</i> | <i>N3</i> | <i>N4</i> |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Tipo I</i>   | -0.17%    | -1.05%    | -1.93%    | -0.95%    |
| <i>Tipo II</i>  | -0.85%    | -2.59%    | -4.81%    | -1.71%    |
| <i>AWWA</i>     | -0.69%    | -1.25%    | -1.29%    | -1.74%    |
| <i>SEQREUS</i>  | 0.12%     | -0.46%    | -0.34%    | -0.66%    |
| <i>Promedio</i> | -0.40%    | -1.34%    | -2.09%    | -1.26%    |

Por último, observando la Tabla 3.19 se puede afirmar que el error global inicial de un contador nuevo se establece en un intervalo del 0 al -2%. Esto confirma los resultados extraídos de (Arregui, et al., 2014) donde se indicaba que el error global de un contador se

sitúa cercano a un valor del -1.28% y contradice los resultados ya estudiados en los artículos de (Bowen, et al., 1991) y (Barfus, et al., 2011).

A pesar de esto, es importante insistir en que la muestra no es lo suficientemente significativa para obtener resultados definitivos del rendimiento de los distintos modelos y una mayor muestra debería ser proporcionada antes de tomar cualquier decisión.





## 4 Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

A lo largo de los últimos años, el auge de los contadores volumétricos se ha puesto de manifiesto debido a la capacidad que poseen estos para detectar caudales muy bajos con un error relativamente pequeño. Este hecho, ha llevado a las empresas de abastecimiento a optar por este tipo de contador con el fin de reducir el porcentaje de pérdidas aparentes presentes en su abastecimiento.

No obstante, como se verá más adelante, los contadores volumétricos no son siempre la solución a emplear, ya que esta dependerá de un gran número de factores como puede ser el año de instalación, el volumen acumulado del contador o el precio del agua entre otras, y por ello, es posible que otras tecnologías de medición sean más interesantes.

### 4.1 Descripción de la muestra

La definición de la muestra ensayada permite determinar el consumo de cada usuario en los distintos abastecimientos y poder clasificarla según su vida útil y su volumen acumulado. Esta jerarquización es fundamental para así caracterizar el comportamiento de los contadores a raíz de estas dos variables, y con ello caracterizar su error global.

El análisis llevado a cabo se ha efectuado a partir de muestras obtenidas de cuatro abastecimientos diferentes. Como se ha indicado en el capítulo anterior, cada abastecimiento posee de media de dos a cuatro modelos de contador diferente con el fin de evitar que una partida defectuosa deje inutilizado todo el parque de contadores. La muestra de contadores ensayados hace un total de 2252 contadores volumétricos de desplazamiento positivo, todos de calibre DN15 y desglosados tal y como muestra la Tabla 4.1. Los diferentes modelos analizados se muestran en la Figura 4.1. Sus imágenes se han obtenido de los diferentes catálogos online de los fabricantes.



*Figura 4.1. Imágenes de los diferentes modelos analizados*

Es importante destacar que los resultados de los contadores ensayados se han obtenido de tres fuentes diferentes.

- Ensayos propios gracias al banco de ensayo de contadores instalado en el laboratorio del ITA de la Universidad Politécnica de Valencia (abastecimientos A y C).
- A través de ensayos llevados a cabo por las propias empresas de abastecimiento dotadas de un banco de ensayo o empresas aptas para tal fin siguiendo las mismas pautas de ensayo, tanto en cuanto al orden de los caudales a ensayar como al procedimiento de ensayo (el cual se encuentra indicado en la norma ISO 4064-2), (abastecimiento B).
- Empresas de abastecimiento que han llevado a cabo las mismas pautas de ensayo pero que han realizado los ensayos a diferentes caudales (abastecimiento D).

Tabla 4.1. Características metrológicas y número de contadores ensayados en función del abastecimiento y del modelo

| Abastecimiento | Modelo | $Q_n$ ( $m^3/h$ ) | Clase | Muestra     |
|----------------|--------|-------------------|-------|-------------|
| A              | M1     | 1.5               | C     | 85          |
| A              | M2     | 1.5               | C     | 91          |
| B              | M3     | 1.5               | C     | 170         |
| B              | M4     | 1.5               | C     | 51          |
| C              | M5     | 2.5               | R160  | 213         |
| C              | M6     | 1.5               | C     | 86          |
| D              | *M7    | 1.5               | C     | 420         |
| D              | *M8    | 1.5               | C     | 344         |
| D              | *M9    | 1.5               | C     | 317         |
| D              | *M10   | 1.5               | C     | 356         |
| D              | *M11   | 1.5               | C     | 71          |
| D              | *M12   | 1.5               | C     | 48          |
|                |        |                   |       | <b>2252</b> |

\*Características metrológicas valoradas por el autor

Para mantener tanto la confidencialidad de los modelos como de los resultados obtenidos, la denominación de cada modelo se ha llevado a cabo incluyendo la letra "M" y un número diferente en función del modelo. Por lo que respecta a los abastecimientos cada uno se ha identificado con una letra diferente, perteneciendo los modelos M1 y M2 al abastecimiento A, los modelos M3 y M4 al abastecimiento B, M5 y M6 al abastecimiento C y el resto de modelos al abastecimiento D. Un análisis exhaustivo de la muestra de cada abastecimiento

#### 4. Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

se lleva a cabo a raíz de las variables que identifican a cada contador; el volumen acumulado y la edad.

*Tabla 4.2. Distribución de modelos por grupos de edad*

| Edad (años) | M1 | M2 | M3  | M4 | M5  | M6 | M7  | M8  | M9  | M10 | M11 | M12 |
|-------------|----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0           |    |    | 5   |    |     |    |     |     |     |     |     |     |
| 1           |    |    |     |    |     |    | 30  | 10  | 11  | 11  | 3   | 13  |
| 2           |    |    |     |    | 13  |    | 21  | 20  | 2   | 9   | 1   | 20  |
| 3           |    |    | 1   |    | 35  | 3  | 28  | 5   | 7   | 27  | 6   | 15  |
| 4           | 16 | 10 | 1   |    | 20  | 10 | 23  | 12  | 11  | 13  | 32  |     |
| 5           | 31 | 33 | 22  | 1  | 46  | 23 | 12  | 16  | 10  | 23  | 10  |     |
| 6           | 18 | 48 | 49  |    | 27  | 26 | 22  | 15  | 9   | 23  | 12  |     |
| 7           | 2  |    | 49  |    | 40  | 17 | 32  | 25  | 17  | 26  | 6   |     |
| 8           |    |    | 21  | 5  | 27  | 7  | 30  | 27  | 23  | 24  | 1   |     |
| 9           | 16 |    | 14  |    | 9   |    | 30  | 42  | 21  | 15  |     |     |
| 10          | 2  |    |     | 17 |     |    | 26  | 38  | 28  | 20  |     |     |
| 11          |    |    |     | 1  |     |    | 50  | 22  | 16  | 27  |     |     |
| 12          |    |    |     |    |     |    | 22  | 33  | 22  | 36  |     |     |
| 13          |    |    |     |    |     |    | 28  | 15  | 47  | 28  |     |     |
| 14          |    |    | 1   | 19 |     |    | 26  | 30  | 26  | 35  |     |     |
| 15          |    |    | 5   | 1  |     |    | 20  | 22  | 49  | 31  |     |     |
| 16          |    |    | 1   | 2  |     |    | 12  | 5   | 10  | 5   |     |     |
| 17          |    |    | 1   | 5  |     |    | 7   | 8   | 8   | 3   |     |     |
| 18          |    |    |     |    |     |    | 1   |     |     |     |     |     |
|             | 85 | 91 | 170 | 51 | 213 | 86 | 420 | 344 | 317 | 356 | 71  | 48  |

Los resultados relativos al análisis de la muestra están referidos en el Anexo A.1. El resumen de la muestra se muestra tanto en la Tabla 4.2 donde la discretización se realiza por edad del contador, y la Tabla 4.3, dividida en función de grupos de volumen acumulado.

*Tabla 4.3. Distribución de modelos por grupos de volumen*

| Volumen (m <sup>3</sup> ) | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7  | M8 | M9 | M10 | M11 | M12 |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|
| 0-500                     | 3  | 9  | 21 |    | 17 | 15 | 111 | 71 | 67 | 73  | 32  | 42  |
| 500-1000                  | 15 | 6  | 51 | 6  | 23 | 15 | 67  | 56 | 56 | 69  | 16  | 5   |
| 1000-1500                 | 19 | 9  | 41 | 4  | 35 | 10 | 76  | 76 | 64 | 69  | 11  |     |
| 1500-2000                 | 11 | 18 | 27 | 11 | 35 | 5  | 80  | 62 | 57 | 68  | 5   | 1   |
| 2000-2500                 | 7  | 16 | 14 | 11 | 24 | 12 | 38  | 42 | 34 | 37  | 2   |     |
| 2500-3000                 | 6  | 4  | 7  | 3  | 22 | 14 | 13  | 11 | 17 | 19  | 2   |     |
| 3000-3500                 | 1  | 2  | 2  | 9  | 21 | 4  | 11  | 10 | 11 | 10  | 1   |     |

| Volumen (m <sup>3</sup> ) | M1 | M2 | M3  | M4 | M5  | M6 | M7  | M8  | M9  | M10 | M11 | M12 |
|---------------------------|----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 3500-4000                 | 3  | 5  | 1   | 2  | 11  | 2  | 8   | 6   | 6   | 7   | 1   |     |
| 4000-4500                 | 6  | 5  | 1   |    | 12  | 2  | 7   | 4   | 2   |     |     |     |
| 4500-5000                 | 3  | 3  | 2   | 1  | 6   | 3  | 3   | 3   | 1   | 1   |     |     |
| >5000                     | 11 | 14 | 3   | 4  | 11  | 4  | 6   | 4   | 2   | 3   | 1   |     |
|                           | 85 | 91 | 170 | 51 | 213 | 86 | 420 | 344 | 317 | 356 | 71  | 48  |

El modelo M1 está formado por 85 contadores distribuidos principalmente en edades de 4 a 9 años, siendo 7 años una edad muy poco representativa puesto que solo hay dos contadores de esa edad. El volumen acumulado se distribuye hasta 7000m<sup>3</sup> pese que a partir de 3000m<sup>3</sup> la muestra es baja pues en cada escalón de volumen hay una muestra de 3 o 4 contadores.

El modelo M2 posee una muestra de 91 contadores repartidos principalmente de 4 a 6 años, pese a que la edad que predomina son cinco y seis años. En cuanto al volumen acumulado, la muestra se encuentra más disgregada ya que abarca un rango desde 0 a 7000m<sup>3</sup> pese que a partir de 2500m<sup>3</sup> la muestra deja de ser significativa. Se puede decir que el abastecimiento A posee un mayor porcentaje de contadores en un rango de 4 a 6 años.

Por lo que respecta al modelo M3, que corresponde al abastecimiento B, la muestra total es de 170 contadores donde la edad principal abarca de 5 a 9 años. Pese a que se da la existencia de contadores de 0 a 4 años o incluso con más de 9 años, estos no representan en total más de un 5% de la muestra. La disgregación por volumen acumulado también se encuentra acotada a valores de entre 0 y 3000m<sup>3</sup>. Valores que corresponden con un volumen acumulado anual bastante elevado.

El modelo M4, con una muestra de 51 contadores, presenta valores de edad bastante altos, situándose más del 70% de la muestra con edades de 10 y 14 años mientras que un 12% de la muestra tiene edades comprendidas entre 16 y 17 años. Por lo que respecta al volumen acumulado, está distribuida más del 85% de la muestra en un rango de 500 a 3500m<sup>3</sup>.

Se puede decir que la muestra obtenida del abastecimiento B está bien distribuida tanto en rangos de edad como de volumen.

En cuanto al modelo M5, este posee una muestra de 213 contadores en un rango de edades distribuido de manera bastante equitativa donde el 50% de la muestra se encuentra comprendido entre edades de 2 a 5 años y el otro 50% en edades de 6 a 9 años. El volumen acumulado por los diferentes contadores también se encuentra distribuido equitativamente de 0 a 4500m<sup>3</sup>, situándose en ese rango el 94% de la muestra.

El modelo M6 posee una muestra de 86 contadores. Estos se encuentran distribuidos principalmente en los rangos de edad de 4 a 7 años, donde se sitúa el 90% de la muestra mientras que el resto de la muestra posee edades de 3 y 8 años. Por lo que respecta al volumen acumulado, este se encuentra distribuido en un rango de 0 a 3000 m<sup>3</sup>.

Del abastecimiento C se ha obtenido una muestra total de 299 contadores donde las edades predominantes se engloban de 4 a 7 años y con un volumen máximo de 3000m<sup>3</sup>.

La muestra del modelo M7 hace un total de 420 contadores. Probablemente, debido al gran número de contadores, esta muestra está bastante bien disgregada por edades, abarcando un amplio rango de edades desde 1 a 17 años. Por lo que respecta al volumen acumulado, el 90% de la muestra se concentra por debajo de 2500m<sup>3</sup>.

En cuanto a la muestra del modelo M8, esta hace un total de 344 contadores. Esta muestra, al igual que la del modelo M7, se encuentra bastante bien disgregada por edades, mientras que el volumen acumulado de los contadores vuelve a concentrarse en el rango de 0 a 3000m<sup>3</sup>.

El modelo M9 posee una muestra de 317 contadores. Esta muestra posee un porcentaje elevado de contadores con edades superiores a 10 años. Por lo que respecta al volumen acumulado, al igual que los modelos anteriores, posee más del 90% de los contadores con volúmenes acumulados entre 0 y 3000m<sup>3</sup>.

El modelo M10 posee una muestra de 356 contadores, dividida equitativamente entre edades de 1 a 15 años. Por lo que respecta al volumen acumulado, posee un número elevado de contadores con volúmenes entre 0 y 2000m<sup>3</sup> (más del 80%) mientras que el resto de la muestra posee volúmenes superiores a 2000m<sup>3</sup>.

Los contadores del modelo M12 parecen ser relativamente nuevos pues tienen una edad máxima de tres años y un volumen acumulado inferior a 2000m<sup>3</sup>. Las conclusiones que se obtendrán de la degradación del error no podrán ser tomadas como definitivas puesto que la mayor parte de los contadores se sitúan en un volumen de entre 0 a 500m<sup>3</sup>

En la Figura 4.2 se observa cómo está distribuida la muestra por abastecimientos. Mientras que en el abastecimiento D, el porcentaje de muestra está bastante distribuido respecto a la edad, en otros abastecimientos como el abastecimiento A la mayoría de la muestra está distribuida en dos o tres años.

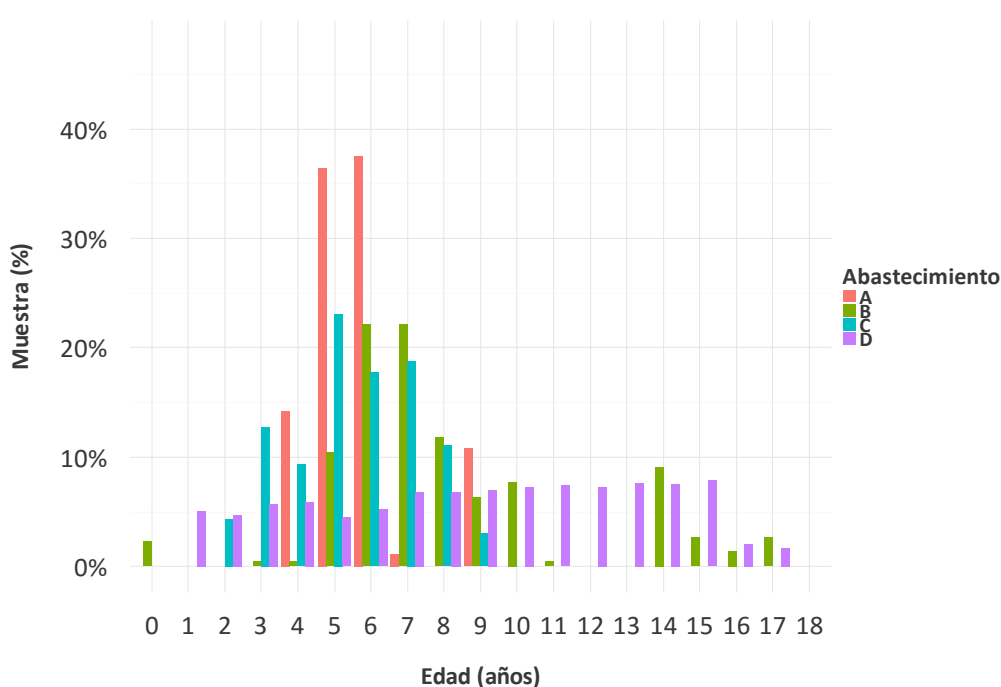


Figura 4.2. Edad de la muestra disgregada por abastecimientos

A diferencia de la figura anterior, en la Figura 4.3 se observa que la distribución de la muestra según el volumen acumulado de cada parque de contadores es muy similar. El mayor porcentaje se da en el rango de 0 a 2500m<sup>3</sup> mientras que a partir de 3000m<sup>3</sup> la muestra es bastante reducida en todos los abastecimientos. Esto podría explicarse debido a que si el consumo de una vivienda promedio anual es de alrededor 120-150m<sup>3</sup>, un consumo superior a 3000m<sup>3</sup> implica un consumo muy elevado y por tanto, inusual.

Es importante tener en cuenta los resultados de los contadores con volumen acumulado elevado, ya que pese a que no existe una muestra excesivamente representativa, son estos

consumidores en los que el contador volumétrico puede que no trabaje de la manera más adecuada y sea más indicado recurrir a otro tipo de contador.

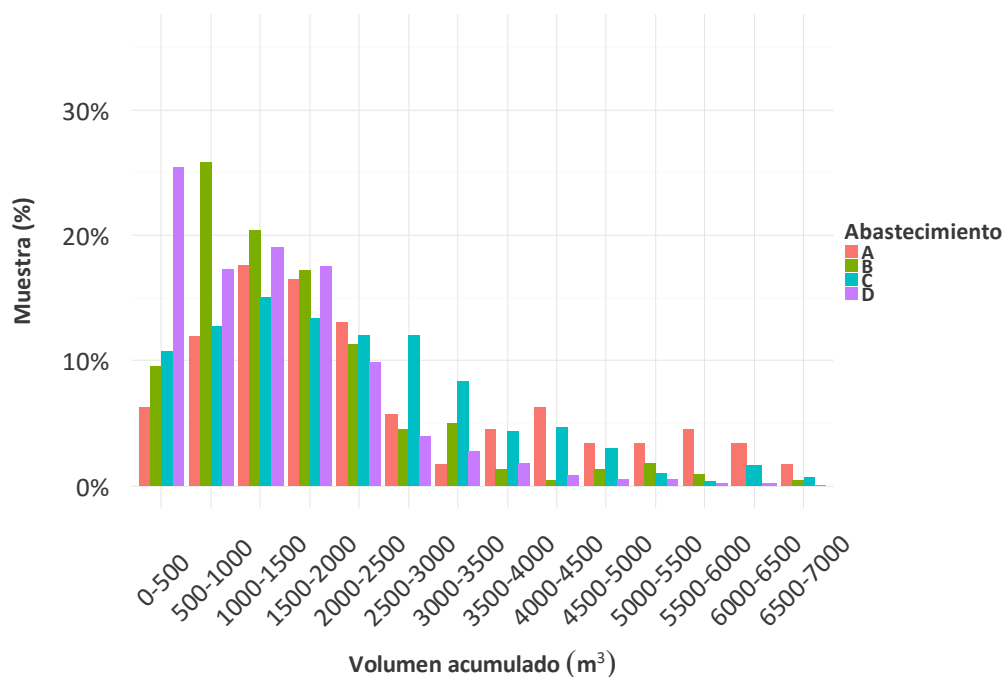


Figura 4.3. Resumen del volumen acumulado de la muestra por abastecimientos

## 4.2 Análisis de la curva de error

Con el objetivo de evaluar el rendimiento de los contadores en campo, se han analizado las curvas de error de 12 modelos comerciales de contador diferentes. El procedimiento de ensayo de los contadores analizados en el banco de ensayo del ITA (Universidad Politécnica de Valencia) se ha llevado a cabo de la misma manera que para la verificación de contadores nuevos, tal y como se indica en el apartado 3.2.2 Procedimiento de ensayo. Tal y como se ha explicado al inicio del capítulo, los ensayos de los contadores del abastecimiento A, B, C y D se han efectuado según los caudales y el orden que indica la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Caudales de ensayo para los contadores de los abastecimientos A, B, C y D

| Ensayo  | 1   | 2   | 3  | 4    | 5  | 6    | 7    | 8    | Abastec. |
|---------|-----|-----|----|------|----|------|------|------|----------|
| Q (l/h) | 750 | 120 | 60 | 30   | 15 | 1500 | 3000 | -    | A, B, C  |
| Q (l/h) | 600 | 100 | 30 | 22.5 | 15 | 10   | 5    | 1500 | D        |



### 4.2.1 Contadores parados

Para llevar a cabo un análisis efectivo tanto de las curvas de error de los diferentes modelos como de la degradación del error global y con el objetivo de no distorsionar la muestra de forma innecesaria, los contadores que se han detectado tanto parados como con un error muy alto, es decir, que no están trabajando de manera adecuada con respecto a su grupo, se han retirado del análisis. El resumen de contadores retirados del análisis se muestra en la Tabla 4.5. El modelo M8 y el modelo M10 porcentualmente representan un mayor número de contadores parados. Por otro lado, los modelos M4 y M6 son los que menor porcentaje de contadores parados representan. Tanto en el modelo M2, M5 y M12 no se ha hallado contadores parados. El número de contadores parados hace un total de 112, lo que representa un valor promedio del 5% de la muestra total.

*Tabla 4.5. Contadores parados según los distintos modelos*

| <i>Modelo</i> | <i>Abastecimiento</i> | <i>n</i> | <i>%</i>        |
|---------------|-----------------------|----------|-----------------|
| <i>M1</i>     | A                     | 4        | 4.5%            |
| <i>M3</i>     | B                     | 11       | 6.0%            |
| <i>M4</i>     | B                     | 1        | 2.0%            |
| <i>M6</i>     | C                     | 2        | 2.0%            |
| <i>M7</i>     | D                     | 15       | 3.6%            |
| <i>M8</i>     | D                     | 30       | 9.0%            |
| <i>M9</i>     | D                     | 9        | 2.8%            |
| <i>M10</i>    | D                     | 38       | 11.0%           |
| <i>M11</i>    | D                     | 2        | 2.8%            |
| <i>Total</i>  |                       | 112      | Promedio: 4.95% |

### 4.2.2 Curvas de error

La discusión de las curvas de error es fundamental para conocer la evolución del error del contador en función de las variables edad y volumen acumulado. Sin embargo, debido a la no normalidad de los datos, se muestra más apropiada una discusión de rangos de error en lugar de los valores promedios obtenidos por dichas curvas. Estos rangos, que marcan la dispersión del error, vienen dados por lo que se conoce como un diagrama de caja y bigotes.

El diagrama de caja y bigotes está formado por:

#### 4. Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

- Un rectángulo que marca el primer cuartil, la mediana (o segundo cuartil) y el tercer cuartil. El primer cuartil indica que el 25% de los datos se encuentran por debajo de ese valor. La mediana indica que el 50% de los datos se sitúan por debajo de ese valor y en el tercer cuartil el 75% de los datos son inferiores a ese valor.
- Las líneas que salen de la caja, que se extienden hasta los valores máximo y mínimo o hasta 1.5 veces el rango intercuartílico.
- Los valores atípicos, que son aquellos valores que no están ni dentro de la caja ni dentro del rango intercuartílico y que por tanto su análisis debería realizarse de manera particular.

De esta manera, los diagramas permiten no solo facilitar el análisis de los datos sino también detectar la dispersión de los puntos con respecto a la mediana, los percentiles y los valores máximos y mínimos. Estos diagramas se han realizado para cada abastecimiento y en función de cada caudal de ensayo.

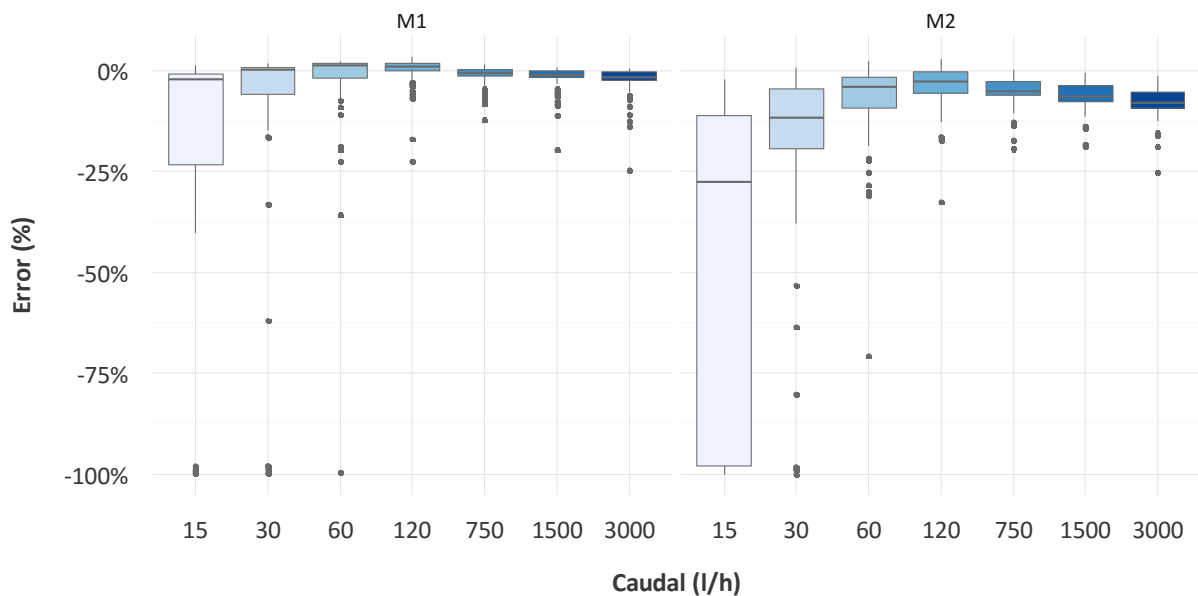


Figura 4.4. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento A

Observando la dispersión del diagrama del abastecimiento A se puede concluir que el modelo M1 presenta una baja dispersión tanto para caudales bajos como caudales altos dándose la situación de contadores con caudales de arranque tanto a 15, 30 e incluso 60l/h.

La dispersión del modelo M2 es bastante elevada a 15l/h mientras que para el resto de caudales es muy similar a la del modelo M1.

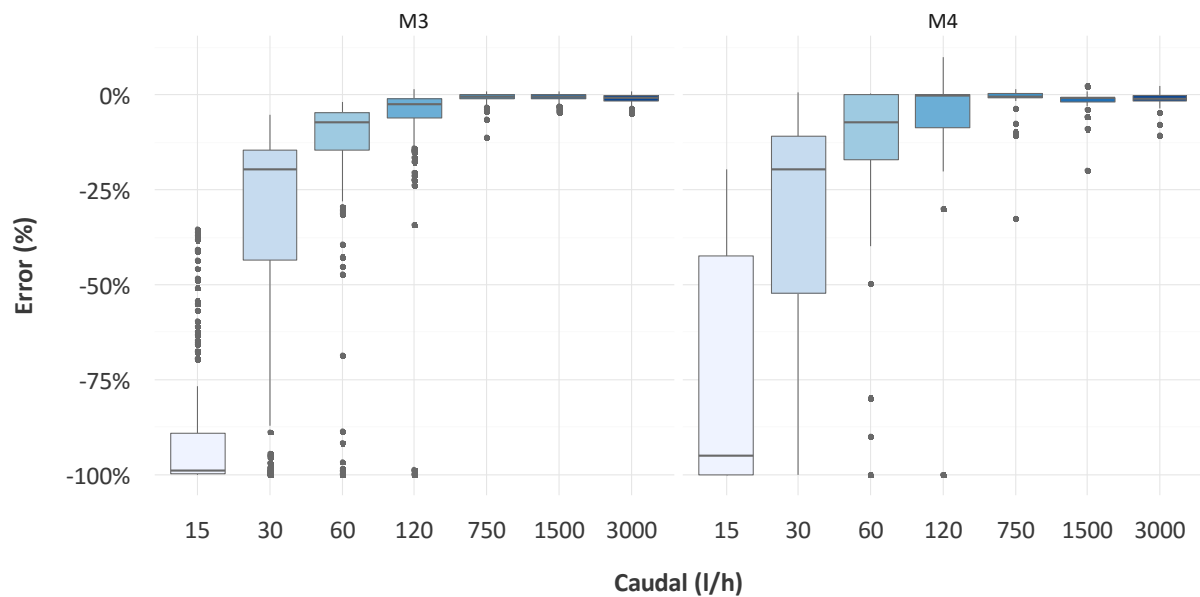


Figura 4.5. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento B

Es importante destacar que a medida que aumenta el caudal de ensayo, el diagrama de cajas es cada vez más pequeño, síntoma de que la dispersión de los valores es muy baja. De esta forma tan visual, el contorno de las cajas deja entrever la forma de la curva de error de un contador volumétrico.

La Figura 4.5 muestra que el abastecimiento B posee una gran dispersión a caudales bajos. De los contadores analizados del modelo M3, la mayoría poseen un error del -100% a 15l/h, señal de que su caudal de arranque es superior a este valor. El modelo M4 presenta una caja muy amplia, dando lugar a una dispersión muy elevada de los valores tanto a 15 como a 30l/h. Esto es significativo de que el 25% de los valores se encuentran en un error cercano al -100% pero que el otro 50% de los valores presenta una dispersión muy elevada.

El modelo M5 presenta una dispersión relativamente baja pese a que a 15l/h se encuentran una buena serie de puntos anómalos. En cuanto al modelo M6, pese a que el 25% de los valores a 15l/h se encuentre muy disperso, se da un mayor porcentaje de valores cercanos

#### 4. Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

a un error del 0%. Tanto el modelo M5 como M6 presentan una dispersión muy baja a caudales iguales o superiores a 30l/h.

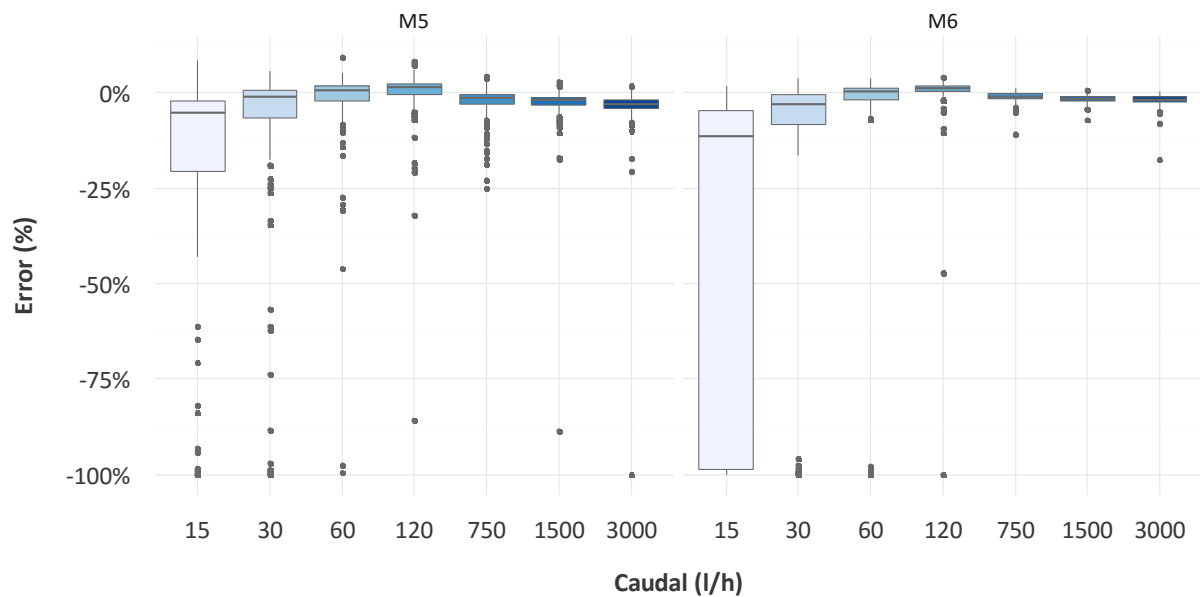


Figura 4.6. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento C

La dispersión de los modelos del abastecimiento D se muestra en las figuras siguientes. Es importante destacar que los caudales de ensayo de este abastecimiento son diferentes al resto de caudales de ensayo. Estos valores dan más importancia, aún si cabe, a caudales bajos, es por ello que no solo se ensayan a 15l/h sino también a 5 y a 10l/h.

Los modelos M7 y M8 presentan dispersiones elevadas tanto a 5, 10 y 15l/h, situándose el 75% de estos valores cercanos a un error de entre -75 y -100%. Para caudales superiores, pese a que la dispersión es bastante baja, poseen un elevado número de puntos anómalos tanto como a 30 como a 100l/h.

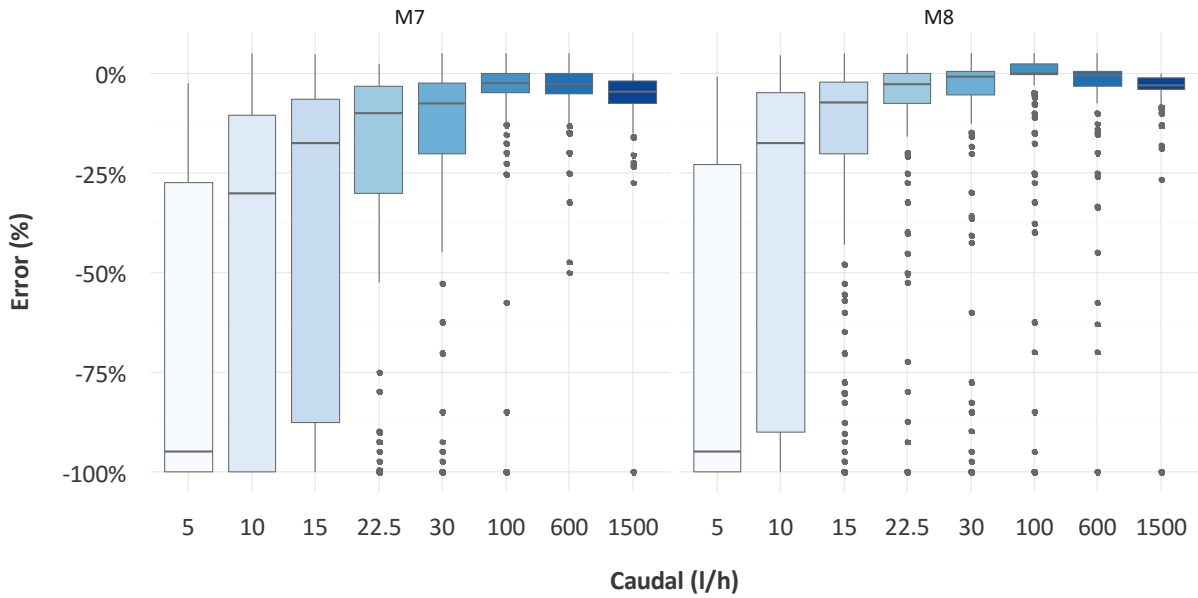


Figura 4.7. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento D (M7, M8)

El modelo M9 presenta valores próximos a -100% para un caudal de 5l/h, señal de que el caudal de arranque se sitúa superior a este valor. La dispersión de este modelo se reduce para valores de entre 100 a 1500l/h. Por otra parte, el error del contador del modelo M10 se sitúa prácticamente en 0% para valores superiores a 100l/h mientras que por bajo de 15l/h la dispersión es similar a la del modelo anterior.

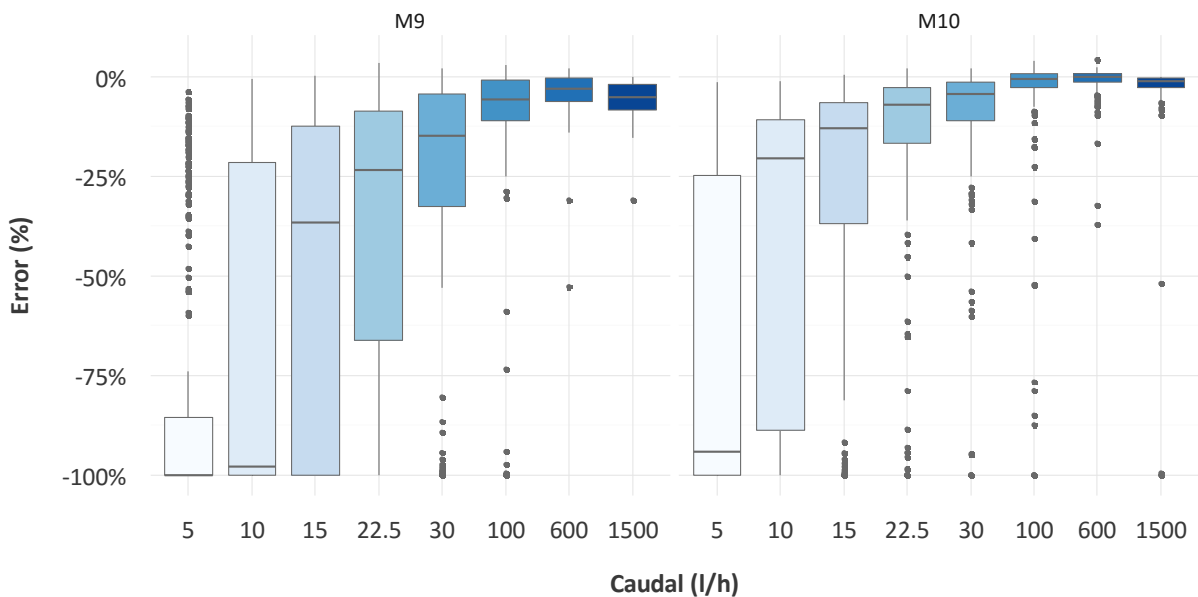


Figura 4.8. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento D (M9, M10)

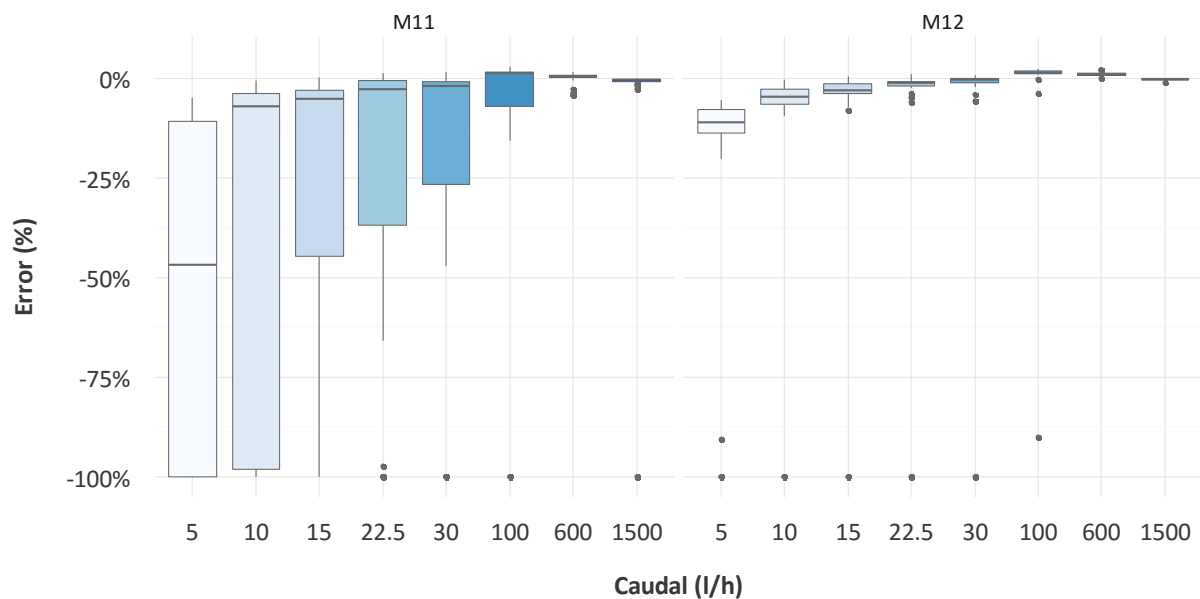


Figura 4.9. Diagrama de caja y bigotes para el abastecimiento D (M11, M12)

El modelo M12 presenta unos resultados muy buenos puesto que su dispersión es mínima para los diferentes caudales situándose el error a 5l/h cercano a -13%, lo que indica que su caudal de arranque se sitúa por debajo de 3l/h, con toda seguridad. También se debe destacar que es el modelo que posee menor muestra, por lo tanto, la probabilidad de encontrar valores anómalos es inferior.

En cuanto al modelo M11, este presenta unos valores muy similares al resto de modelos de su abastecimiento, manteniendo la tónica de una dispersión muy elevada para caudales inferiores a 30l/h y donde el rango de valores de error no se puede predecir con claridad.

Es importante destacar que pese a que la tendencia de los modelos M7, M8, M9 y M10 sea la de una gran dispersión a caudales bajos, esta es debida a que son los modelos con mayor muestra, lo que provoca esta mayor dispersión. Sin embargo, estos modelos son los que van a proporcionar resultados con mayor fiabilidad.

Una vez analizados los rangos de errores facilitados por los diagramas de caja y bigotes se representan las curvas de error de los diferentes modelos y que se muestran en el Anexo A.2. Para esta representación se han tomado una serie de consideraciones.

- Los contadores parados o defectuosos no se han considerado en el análisis.

- Con el fin de proporcionar un análisis robusto, los grupos de edad y de volumen con una muestra inferior a cinco contadores no se han considerado en el análisis.

De la representación de las curvas de error se puede observar como a medida que aumenta tanto el volumen acumulado como la edad el error de estas es cada vez más negativo. Igual que se desprende de los diagramas de caja y bigotes, a partir de 60l/h las curvas de error prácticamente se superponen pues la dispersión de estas es mínima y el error es muy próximo al 0%. Es interesante destacar que en muchos modelos se da la existencia de una curva de error que pese a tener menor volumen o menor edad, tiene un mayor error, señal de que al pistón le lleva más tiempo acoplarse y a medida que avanza su vida útil este se estabiliza y proporciona mejores valores de error.

Por otro lado, observar la fluctuación de los diferentes caudales de ensayo en función del volumen acumulado es una forma de conocer también cómo se comporta el contador a lo largo de su vida útil. Estos se observan en la Figura 4.10 y Figura 4.11.

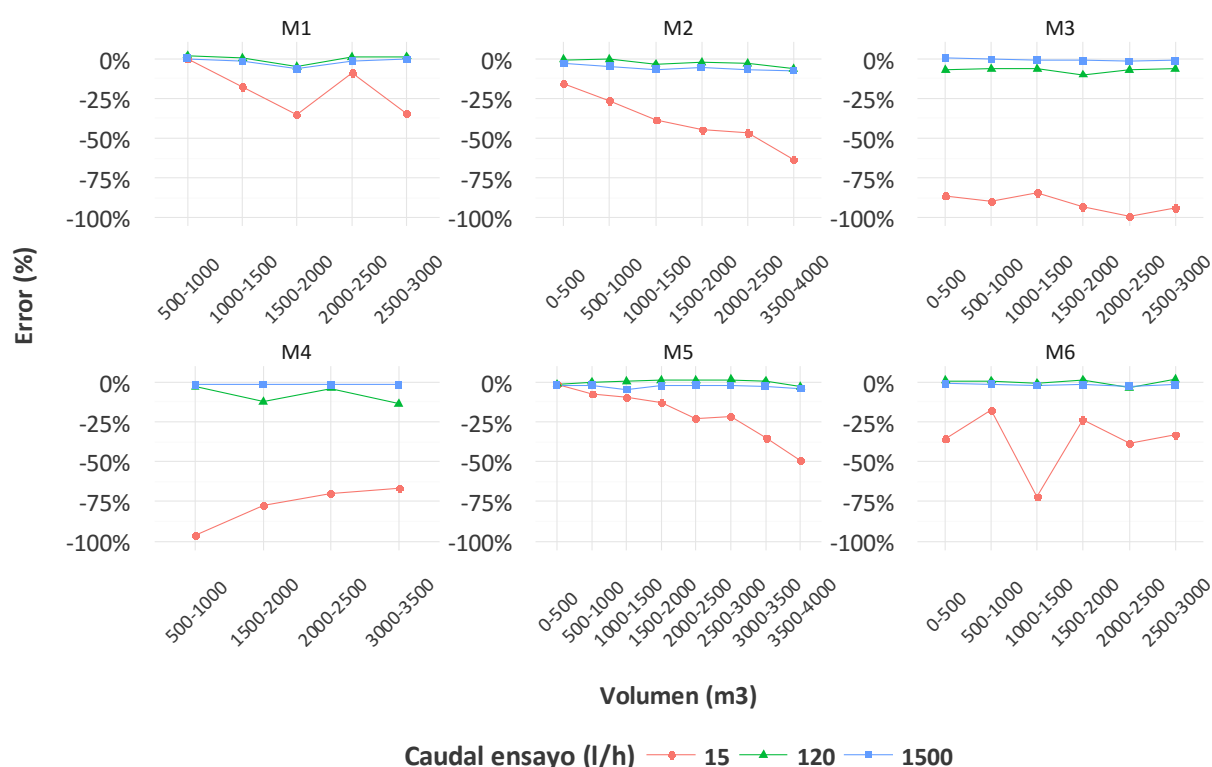


Figura 4.10. Evolución de los caudales de ensayo para los contadores del abastecimiento A, B, y C en función del volumen acumulado

Para los tres primeros abastecimientos en concreto se puede concluir que:

- Hay una diferencia de error significativa entre el error a 15 l/h y el error a 120l/h
- El error a caudal 120l/h y a caudal 1500l/h es muy similar y próximo al 0%. Las fluctuaciones de error a estos caudales son mínimas, señal de que el contador no tiene problemas a lo largo del tiempo contabilizando el volumen que atraviesa a este caudal.
- Las fluctuaciones del error a 15l/h son muy diversas. El contador tiene un error que aumenta con el paso del tiempo y del volumen acumulado, en algunos caso se degrada de manera más notable y en otros de manera menos grave, de ahí radica la calidad del contador. En cualquier caso, la pendiente de la línea que une los puntos, excepto para el modelo M4, siempre es negativa.
- En algunos puntos, como en el caso del modelo M6, se observan ciertos valores anómalos. Esto es señal de que se ha encontrado algún contador con una degradación mayor (posiblemente por la edad) que hace que esta degradación presente algunos picos de error más negativos.
- No se puede definir, con la muestra existente, un rango de error inicial para el caudal de 15l/h pues en cada modelo el error comienza en un valor completamente diferente.

Por lo que respecta al abastecimiento D, se ha aprovechado el mayor número de caudales bajos para observar de manera minuciosa la evolución comentada en el párrafo anterior.

- En este abastecimiento se observa una menor fluctuación de todos los caudales, posiblemente explicada por la mayor muestra de contadores analizada.
- Del modelo M12, que coincide con el abastecimiento con menor muestra, no se pueden sacar conclusiones adecuadas puesto que solo existen dos grupos de volumen.
- Del resto de modelos se pueden sacar varias conclusiones respecto a la información que proporcionan a caudales bajos. El error inicial a caudal 15l/h fluctúa alrededor



de un -25% y a partir de ahí se va degradando a medida que aumenta el volumen acumulado.

- Se puede observar una cierta dependencia entre los errores a cada caudal pues cuando se produce una fluctuación en un grupo de volumen concreto, esta se produce para el resto de caudales. El ejemplo más claro son los modelos M7 en el grupo de 3000-3500m<sup>3</sup> y M11 en el grupo de volumen de 1000-1500m<sup>3</sup>.
- Por lo que respecta a los grupos de caudal de 100l/h y 1500l/h, al igual que en el resto de abastecimientos, se mantiene un error constante y muy cercano en ambos caudales al 0%. Señal de que el contador volumétrico no tiene grandes problemas de registrar caudales superiores a 100l/h con el paso del volumen a lo largo del tiempo.

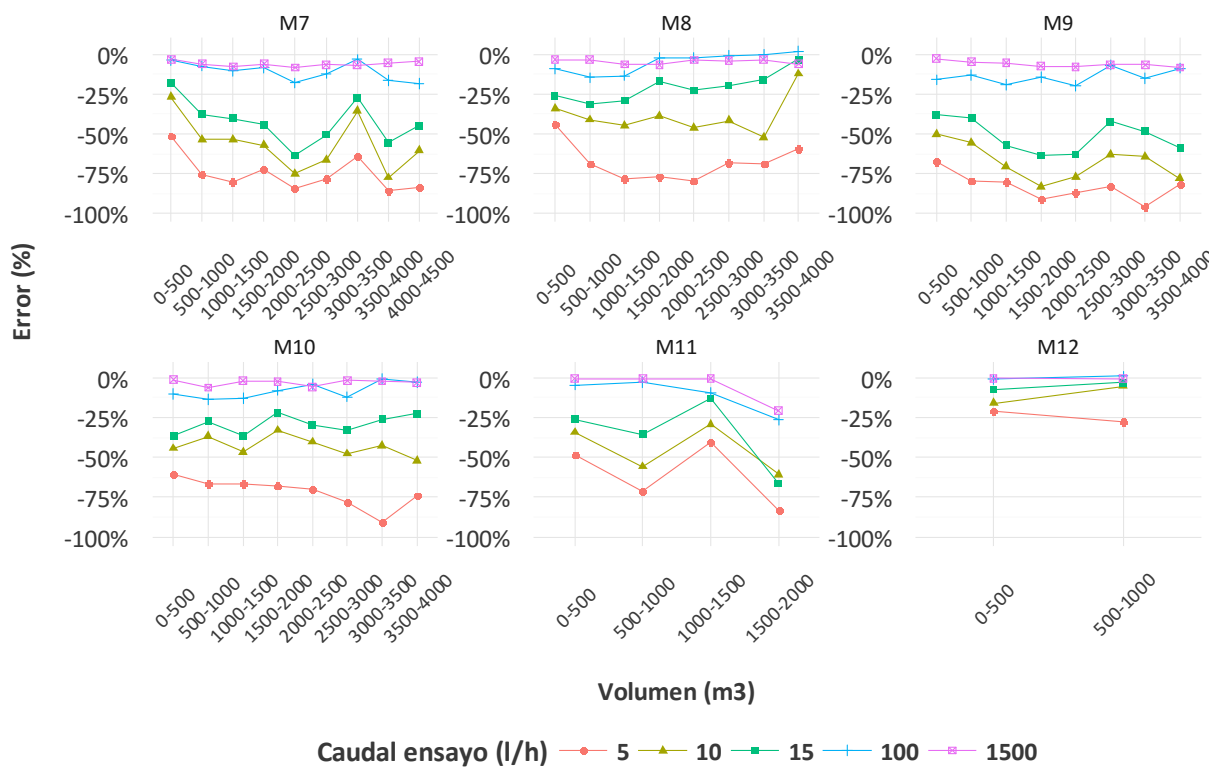


Figura 4.11. Evolución de los caudales de ensayo para los contadores del abastecimiento D en función del volumen acumulado

##### 4.2.2.1 Caso particular: Modelo M5

Uno de los modelos estudiados y analizados en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Valencia es el modelo M5. Es importante hacer mención especial a este modelo pues corresponde con uno de los modelos nuevos ensayados en el Capítulo III y que corresponde con el modelo N3.

Mediante los ensayos realizados se pudo detectar un problema en este tipo de contadores que podría estar causando numerosas pérdidas a la empresa de abastecimiento poseedora de este modelo en su parque en cuestión.

De los 213 contadores ensayados para el modelo M5, diez contadores estaban formados por una carcasa de composite (plástico), en lugar de latón como los 203 restantes. Estos contadores arrojaron la curva de error que se muestran en la Figura 4.12. Como ya se ha visto, esta curva de error no es común en ningún contador, y mucho menos en un contador de tipo volumétrico.

Considerando que el mayor error del contador se produce a caudales de 750l/h, es decir, el consumo mayoritario de los usuarios, esto puede estar produciendo unas pérdidas flagrantes a la empresa en cuestión. En cualquier caso, una mayor muestra de contadores de este estilo es necesaria para confirmar este hecho. La empresa en cuestión ha sido informada y estos contadores no han vuelto a ser instalados de nuevo.

Cuando se detecta el fallo de un contador, con el objetivo de encontrar la razón de fallo, es sumamente recomendable inspeccionar y desmontar el contador. A veces, el fallo puede ser resultado de una manipulación externa, sin embargo, otras puede ser debidas a defectos en el diseño del medidor. En cualquier caso, este tipo de datos, juntos con los resultados de los ensayos debe ser registrado y almacenado para que en un futuro sea de ayuda para la obtención de contadores nuevos.

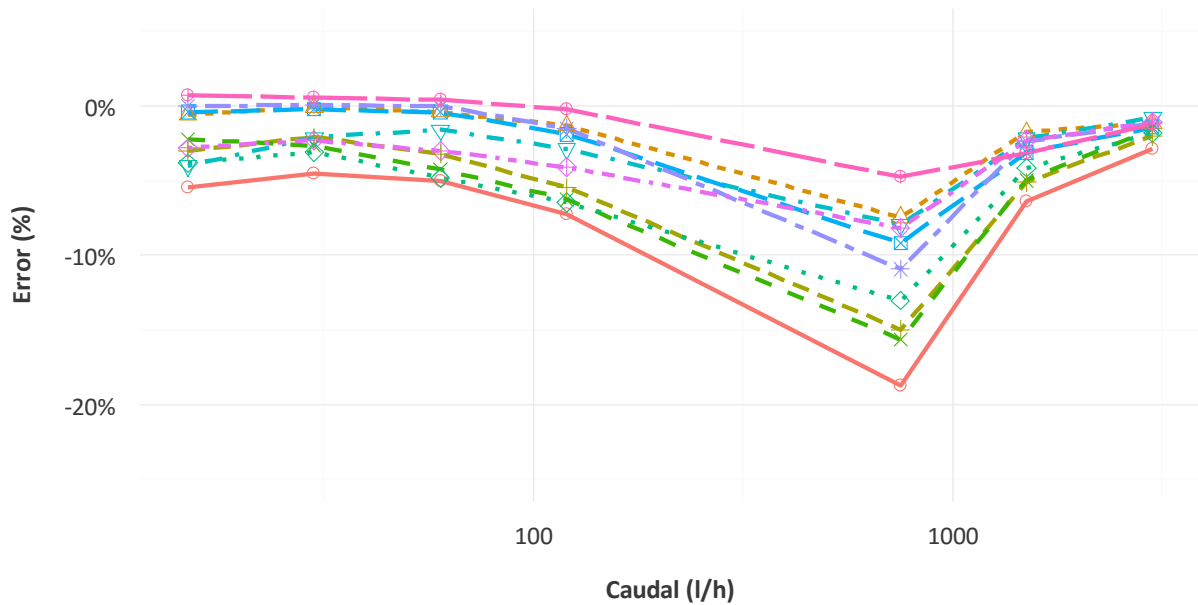


Figura 4.12. Curvas de error para el caso particular del modelo M4

A modo de ejemplo y según los patrones de consumo considerados en el capítulo 3, se puede decir que si en un hogar se produce un consumo diario de 800 litros, esto implica que se están consumiendo en el rango de caudales de 600 a 1000l/h alrededor de 350 litros. De esos 350 litros se estarían registrando 250 litros diarios mientras que 100 litros no los estaría registrando el contador debido al error detectado por sus curvas de error. Esto implicaría que el contador dejaría de registrar mensualmente  $3\text{m}^3$  y al cabo del año serían  $36\text{m}^3$  por usuario, los que no contabilizaría. En el caso de que estos contadores estuvieran instalados en bastantes usuarios (cosa común puesto que el composite está reemplazando al latón debido a su bajo coste), los costes para la empresa podrían elevarse de manera excesiva.

### 4.3 Cálculo del error ponderado

Con el objetivo de obtener el error global, se realiza una ponderación entre dos parámetros, por un lado, los errores obtenidos en los ensayos en laboratorio a cada caudal (curva de error) y por otro, la forma en la que los usuarios consumen agua, es decir, el patrón de consumo. La obtención del patrón de consumo empleado para el cálculo del error global

#### 4. Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

así como el cálculo de este se detalla en el apartado 3.3.1 Patrón de consumo y se muestra de nuevo en la Figura 4.6.

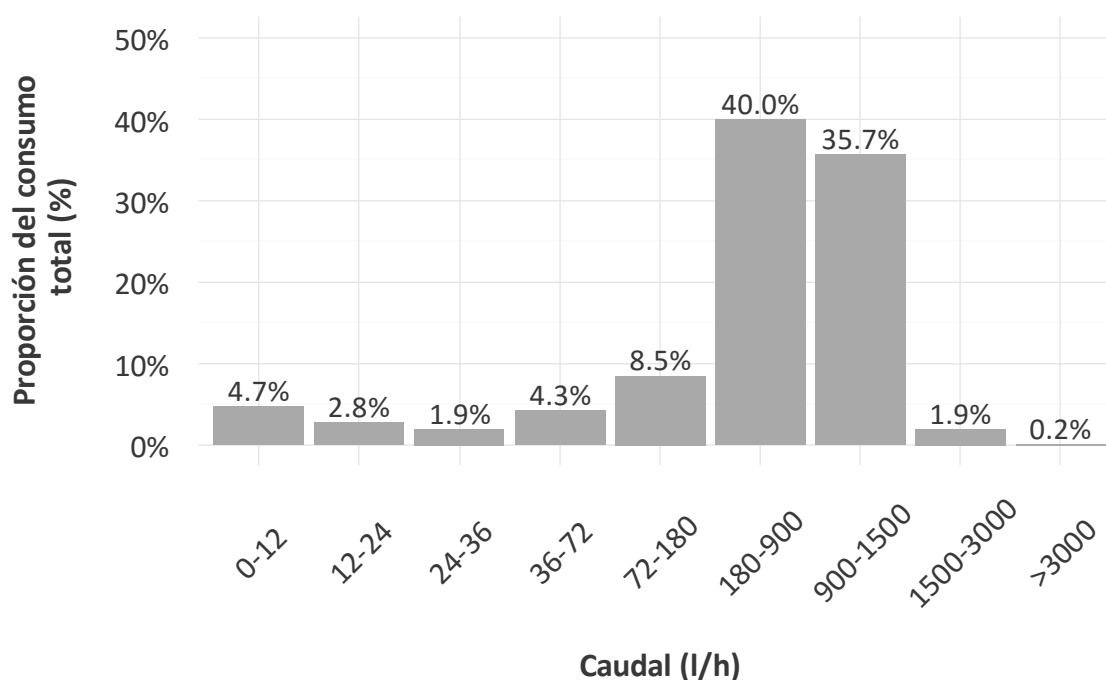


Figura 4.13. Patrón de consumo: Tipo I

Tabla 4.6. Error global promedio en función de la edad y del modelo de contador

| Edad/<br>Mod | M1    | M2     | M3     | M4     | M5    | M6     | M7     | M8     | M9     | M10    | M11    | M12   |
|--------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 0            |       |        | -10.8% |        |       |        |        |        |        |        |        |       |
| 1            |       |        |        |        |       |        | -4.1%  | -0.8%  | -3.0%  | -6.5%  |        | -1.5% |
| 2            |       |        |        |        | -7.3% |        | -3.3%  | -2.2%  | -0.3%  | -1.9%  | -12.3% | -2.0% |
| 3            |       |        | -10.4% |        | -3.9% | -18.9% | -5.5%  | -1.6%  | -3.5%  | -3.4%  | -0.3%  | -1.6% |
| 4            | -4.3% | -13.7% | -14.1% |        | -7.4% | -6.5%  | -5.9%  | -2.5%  | -7.8%  | -6.7%  | -5.0%  |       |
| 5            | -3.9% | -8.7%  | -11.2% | -8.6%  | -3.9% | -7.4%  | -8.7%  | -5.1%  | -11.1% | -10.1% | -4.7%  |       |
| 6            | -5.6% | -9.9%  | -10.7% |        | -3.9% | -7.2%  | -7.4%  | -5.9%  | -6.7%  | -7.5%  | -8.6%  |       |
| 7            | -4.4% |        | -10.0% |        | -5.6% | -2.6%  | -8.5%  | -4.6%  | -9.7%  | -8.2%  | -9.5%  |       |
| 8            |       |        | -11.4% | -17.1% | -5.0% | -1.9%  | -8.6%  | -9.0%  | -7.3%  | -6.9%  | -7.8%  |       |
| 9            | -9.9% |        | -11.1% |        | -3.7% |        | -10.2% | -7.4%  | -15.6% | -6.1%  |        |       |
| 10           |       |        |        | -8.1%  |       |        | -11.4% | -8.2%  | -8.6%  | -10.3% |        |       |
| 11           |       |        |        | -10.2% |       |        | -12.6% | -10.0% | -13.3% | -8.0%  |        |       |
| 12           |       |        |        |        |       |        | -11.4% | -12.4% | -12.3% | -8.0%  |        |       |
| 13           |       |        |        |        |       |        | -12.0% | -11.0% | -12.8% | -8.5%  |        |       |
| 14           |       |        | -17.8% | -9.9%  |       |        | -15.8% | -8.4%  | -14.8% | -7.9%  |        |       |
| 15           |       |        | -18.3% | -23.1% |       |        | -12.9% | -14.4% | -16.3% | -12.0% |        |       |
| 16           |       |        | -13.2% | -49.6% |       |        | -14.6% | -11.8% | -12.9% | -5.0%  |        |       |
| 17           |       |        | -14.3% | -10.5% |       |        | -27.0% | -15.6% | -21.1% | -12.9% |        |       |
| 18           |       |        |        |        |       |        | -21.1% |        |        |        |        |       |

El cálculo del error se ha llevado a cabo a través de la herramienta Woltmann, realizada ad-hoc para ello. El valor del error global promedio obtenido para cada modelo se muestra en la Tabla 4.6 y Tabla 4.7.

A simple vista se puede observar que mientras la Tabla 4.7 posee valores de error para todos los modelos y prácticamente todos los grupos de volumen, los grupos de la Tabla 4.6 no están distribuidos de manera tan uniforme, destacando el abastecimiento D como aquel con mayor número de grupos jerárquicos con error.

*Tabla 4.7. Error global promedio en función del volumen acumulado y del modelo de contador*

| Volum/<br>Mod | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | M6     | M7     | M8     | M9     | M10    | M11    | M12   |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 0-500         | -3.1%  | -6.1%  | -9.7%  |        | -4.2%  | -4.2%  | -5.2%  | -7.0%  | -9.1%  | -7.1%  | -5.6%  | -1.8% |
| 500-1000      | -3.1%  | -6.9%  | -10.1% | -10.7% | -3.3%  | -4.2%  | -9.9%  | -9.4%  | -10.3% | -8.8%  | -7.1%  | -1.1% |
| 1000-1500     | -5.2%  | -9.9%  | -10.5% | -8.4%  | -4.2%  | -8.9%  | -11.6% | -8.7%  | -12.9% | -8.6%  | -6.5%  |       |
| 1500-2000     | -10.2% | -9.0%  | -12.3% | -12.8% | -3.4%  | -3.9%  | -10.5% | -7.2%  | -13.2% | -6.8%  | -18.1% | -0.6% |
| 2000-2500     | -4.6%  | -9.8%  | -12.5% | -9.3%  | -3.9%  | -7.2%  | -15.8% | -7.9%  | -15.1% | -8.0%  | -2.2%  |       |
| 2500-3000     | -5.0%  | -10.8% | -11.2% | -8.2%  | -3.6%  | -4.2%  | -13.5% | -6.5%  | -9.8%  | -8.5%  | -1.0%  |       |
| 3000-3500     | -4.1%  | -10.2% | -15.8% | -12.5% | -5.9%  | -4.6%  | -9.4%  | -5.3%  | -12.8% | -5.6%  | -2.3%  |       |
| 3500-4000     | -6.0%  | -12.5% | -18.1% | -7.6%  | -11.4% | -22.5% | -13.4% | -6.1%  | -15.0% | -6.5%  | -4.6%  |       |
| 4000-4500     | -4.9%  | -8.6%  |        |        | -6.6%  | -3.3%  | -12.9% | -6.1%  | -10.3% |        |        |       |
| 4500-5000     | -4.8%  | -18.7% | -20.2% | -6.7%  | -8.4%  | -21.1% | -23.8% | -5.3%  | -24.9% | -6.2%  |        |       |
| 5000-5500     | -7.6%  | -12.6% | -13.2% | -17.3% | -8.6%  | -9.1%  | -7.7%  | -2.9%  | -19.9% | -26.8% | -3.1%  |       |
| 5500-6000     | -6.9%  | -12.9% |        | -55.6% | -5.1%  | -6.2%  | -17.1% | -60.4% | -26.1% | -6.9%  |        |       |

La Figura 4.14 muestra a partir de la función de densidad, como se distribuye el error global para cada abastecimiento. Mientras que para los abastecimientos A, C y D el error global se encuentra distribuido entre el -10 y el 0% mostrando un pico para este último valor, en el abastecimiento B los valores se encuentran más próximos a -10%, mostrando así peores resultados.

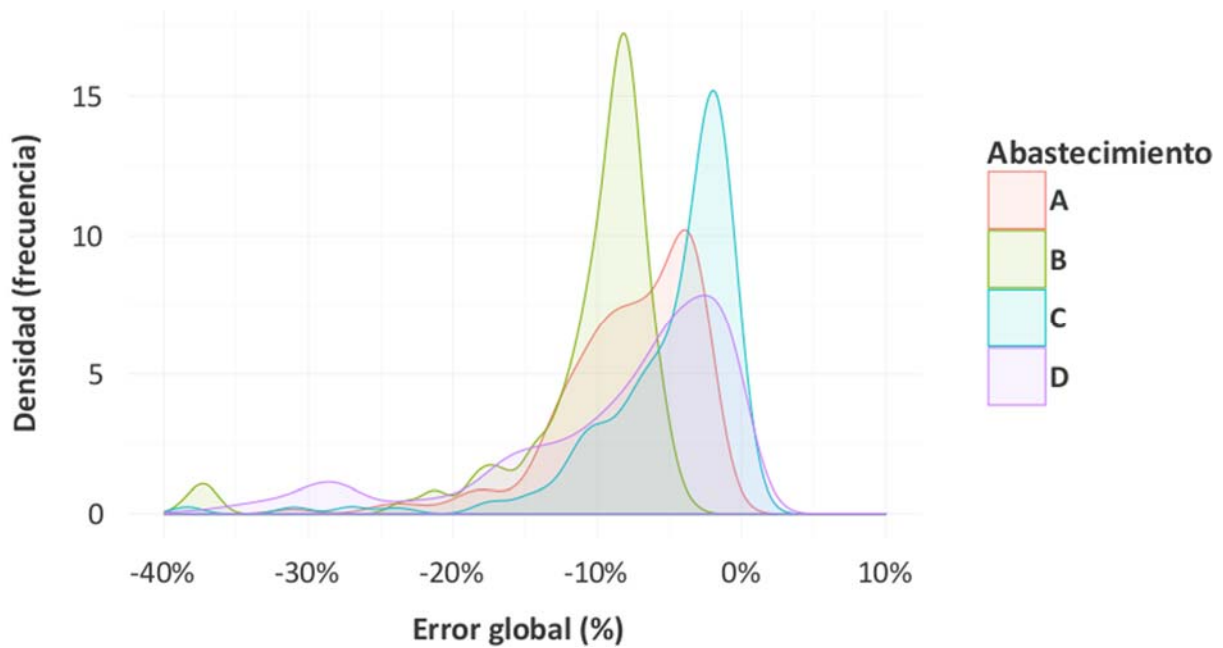


Figura 4.14. Función de densidad del error global para cada abastecimiento

#### 4.3.1 Velocidad de degradación según la edad

Para obtener la ecuación que marca la degradación del error del contador se han llevado a cabo una serie de análisis estadísticos. Primero, se ha efectuado un análisis con todos los resultados obtenidos (dicho análisis se muestra en el Anexo A.3). Esta representación, sin embargo, no se puede interpretar estadísticamente por lo que lleva a la conclusión de que es más favorable trabajar de manera paralela con diagramas de caja y bigotes y con valores medios.

Los análisis estadísticos indican que los modelos de regresión con mayor  $r$  cuadrado y que por lo tanto explican un mayor porcentaje de la variabilidad del error global son el modelo lineal, logarítmico y no lineal. A pesar de ello, la regresión no lineal carece de sentido en ciertos casos tratando de representar algunos valores, por tanto esta clasificación se ha llevado a cabo entre la regresión lineal y la regresión logarítmica.

Con todo esto, para la realización del modelo de regresión se ha partido del error inicial de un contador volumétrico. Esta información se ha extraído del capítulo 3 donde se ha llegado a la conclusión de que para un contador volumétrico nuevo el error global correspondía a un valor cercano al -1.5%. Este es el valor del cual ha partido la regresión.

La estructura de este apartado se muestra de la siguiente manera. Cada modelo muestra un diagrama de caja y bigotes para observar la dispersión del error global, posteriormente la representación gráfica de la regresión llevada a cabo y por último los valores estadísticos de los resultados junto con las ecuaciones obtenidas en dicha regresión.

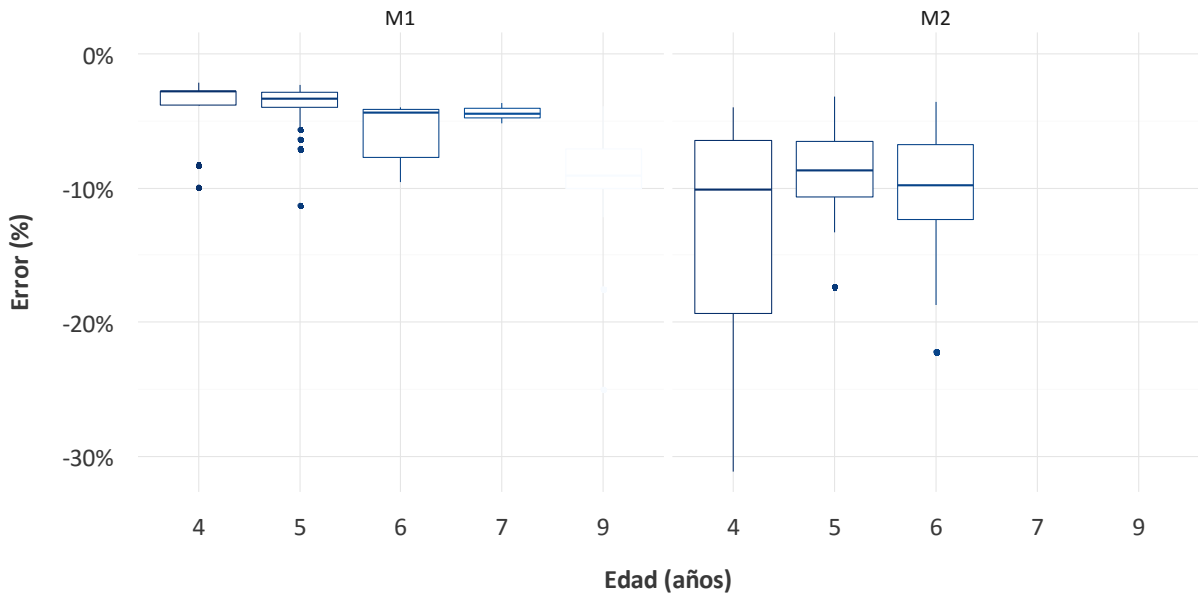


Figura 4.15. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M1 y M2

Según la Tabla 4.8 el modelo M1 explica el 77% de la variabilidad del error. Esto se puede verificar no únicamente por su recta de regresión sino observando el gráfico de caja y bigotes de la figura anterior donde se observa que la dispersión es mínima.

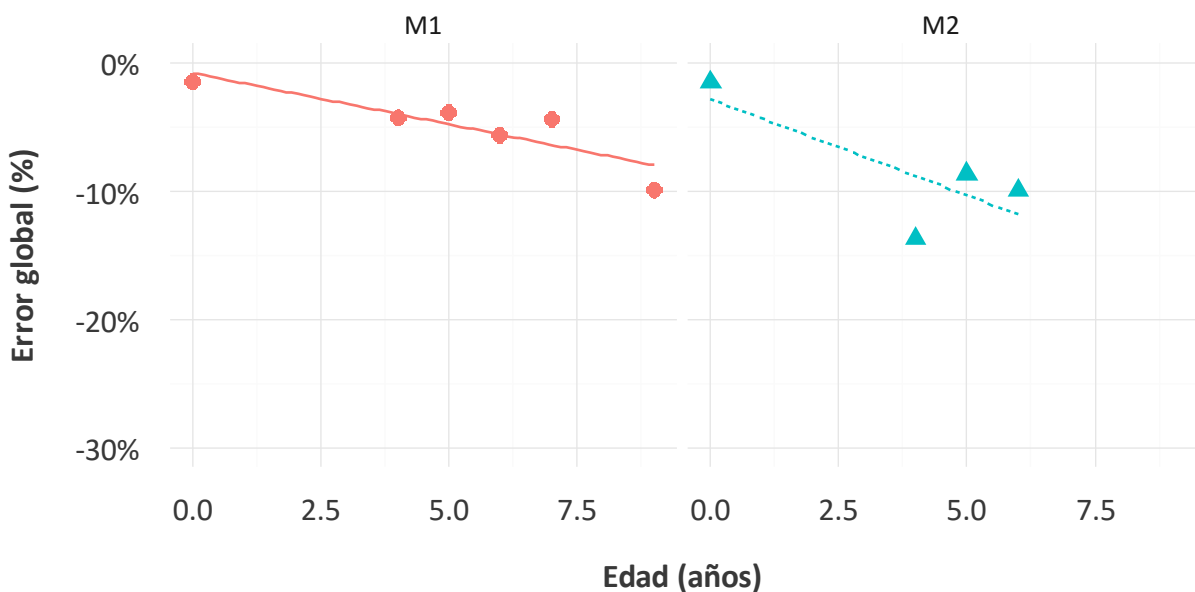


Figura 4.16. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M1, M2)

#### 4. Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

El ajuste del modelo M2 explica el 59% de la variabilidad del error. A pesar de esto, queda en evidencia que es necesario más clúster de edad para mostrar una evolución significativa puesto que con tres puntos no es significativo.

Tabla 4.8. Parámetros estadísticos de la regresión (M1, M2)

| Comb | Modelo | Regresión | a       | b       | R<br>cuadrado | F     | P-valor |
|------|--------|-----------|---------|---------|---------------|-------|---------|
| 1    | M1     | Lineal    | -0.804% | -0.798% | 0.769         | 13.36 | 0.02    |
| 2    | M2     | Lineal    | -2.840% | -1.495% | 0.591         | 2.9   | 0.23    |

Las ecuaciones de degradación para los modelos M1 y M2 son las que se muestran a continuación:

$$\varepsilon_{M1}(\%) = -0.798 \cdot Edad - 0.804 \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{M2}(\%) = -1.495 \cdot Edad - 2.840 \quad (4.2)$$

Por lo que respecta al abastecimiento B, el diagrama de caja y bigotes es el que se muestra a continuación.

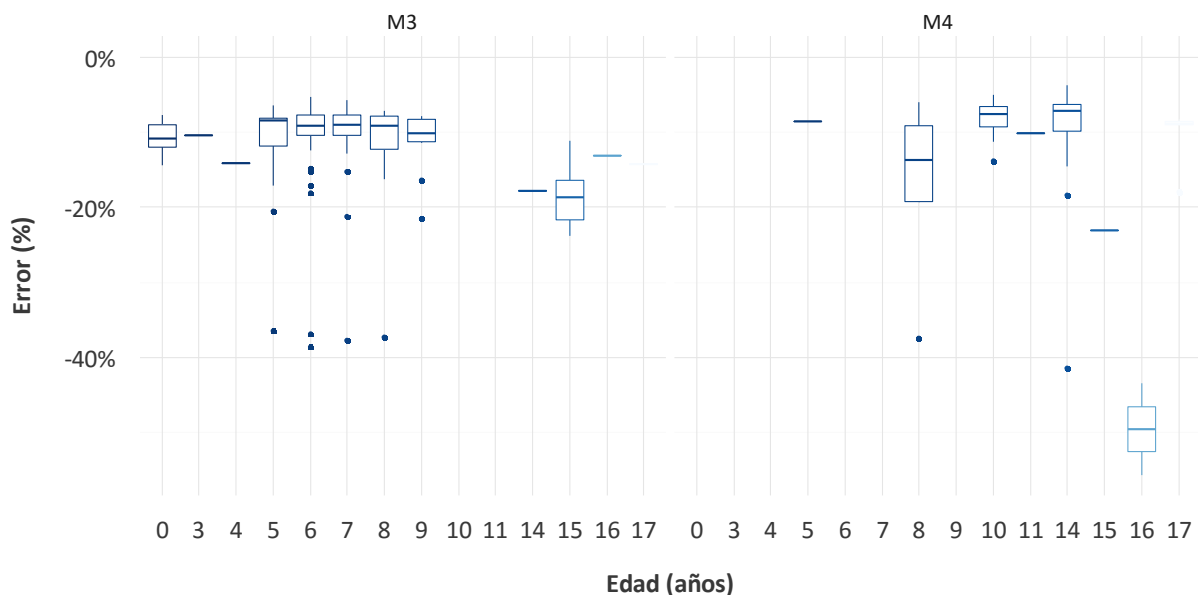


Figura 4.17. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M3 y M4

El modelo M3 presenta cierta estabilidad hasta 10 años pese a la presencia de algunos puntos anómalos mientras que el modelo M4 no posee grupos de edad consecutivos y sus



valores se muestran dispersos, lo que va a marcar que la representatividad del modelo no sea muy precisa.

Observando la Figura 4.18, la regresión del modelo M3 se adapta bien a los datos pese a que existe un salto desde el grupo de 9 años hasta el grupo de 15 años que va a marcar la diferencia. Por lo que respecta al modelo M4 este muestra cierta variabilidad en su error promedio, como se ha visto anteriormente.

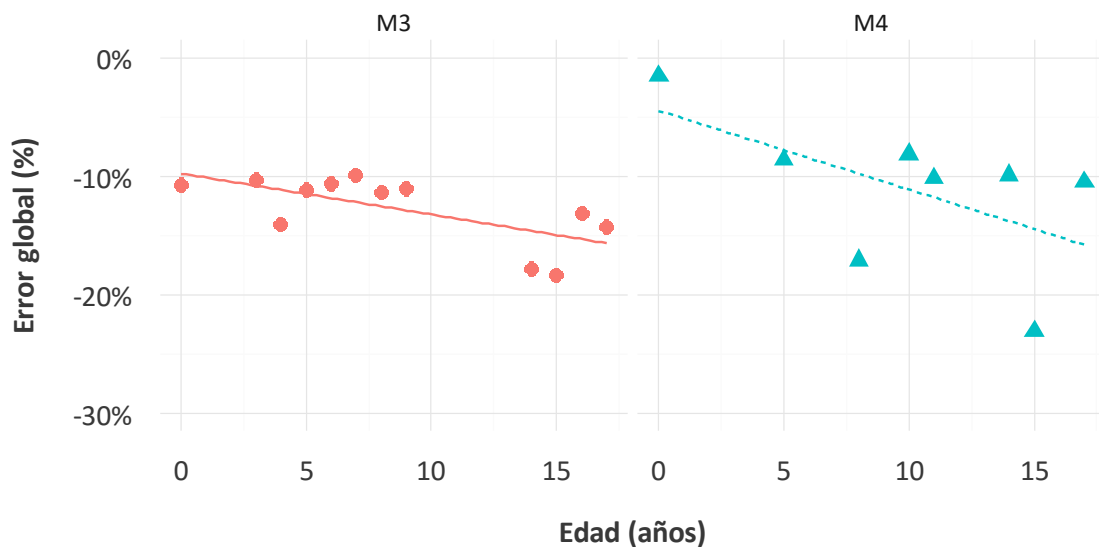


Figura 4.18. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M3, M4)

La ecuación 4.3 explica el 51% de la variabilidad del error mientras que la ecuación del modelo M4 explica únicamente un 31% de la variabilidad del error.

Tabla 4.9. Parámetros estadísticos de la regresión (M3, M4)

| Comb | Modelo | Regresión | a       | b       | R-Cuadrado | F     | P-valor |
|------|--------|-----------|---------|---------|------------|-------|---------|
| 3    | M3     | Lineal    | -7.853% | -0.505% | 0.51       | 11.43 | 0.01    |
| 4    | M4     | Lineal    | -0.501% | -1.396% | 0.31       | 3.09  | 0.12    |

La velocidad de degradación de los modelos M3 y M4 viene explicada por las ecuaciones siguientes:

$$\varepsilon_{M3}(\%) = -0.505 \cdot Edad - 7.853 \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{M4}(\%) = -1.396 \cdot Edad - 0.501 \quad (4.4)$$

El abastecimiento C presenta un error global promedio constante a lo largo del tiempo y cercano al -10%. Esto da lugar a pensar que estos modelos de contador mantienen su curva de error constante a lo largo del tiempo. El modelo M6 presenta mejores valores incluso para 7 u 8 años, esto es debido a que se da la existencia de un par de contadores con un error global cercano a cero y por ello el error promedio se acerca más hacia el cero que el resto de rangos de edad.

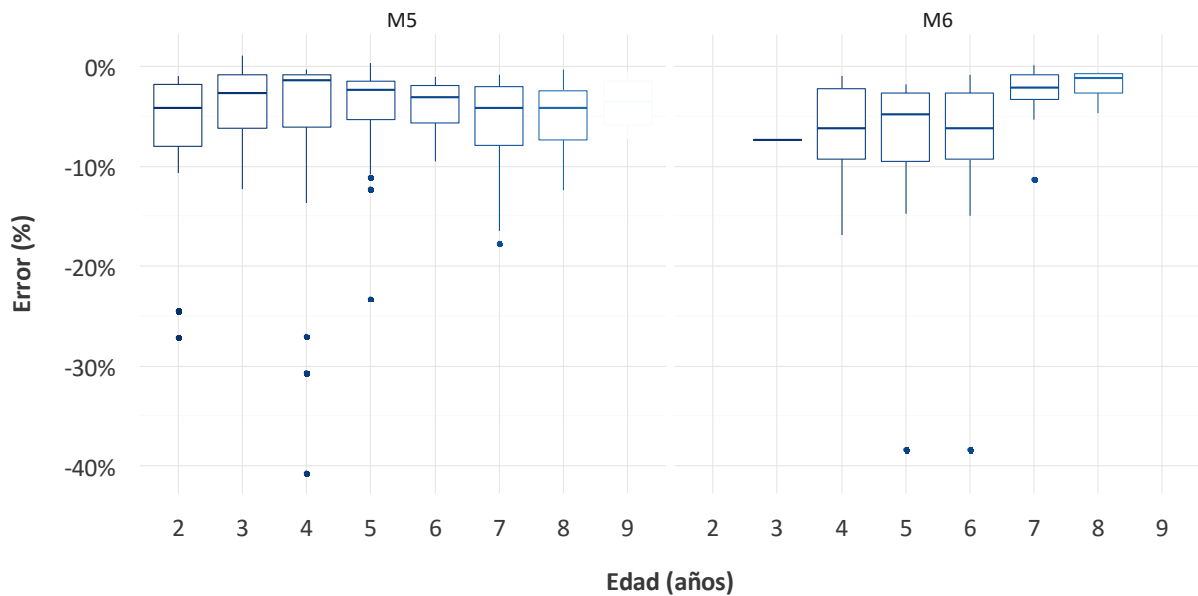


Figura 4.19. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M5 y M6

Para el modelo M5 y M6 se ha optado por una regresión logarítmica debido a que la regresión lineal no sería un buen ajuste puesto que de esta manera se ve más marcada la diferencia entre el error global inicial, fijado en un -1.5% para el año inicial y el error de tres años en adelante. Esto implica que los primeros años se produce una degradación más marcada del contador hasta que el pistón se acopla de manera adecuada y posteriormente su degradación es mínima con el paso del tiempo.

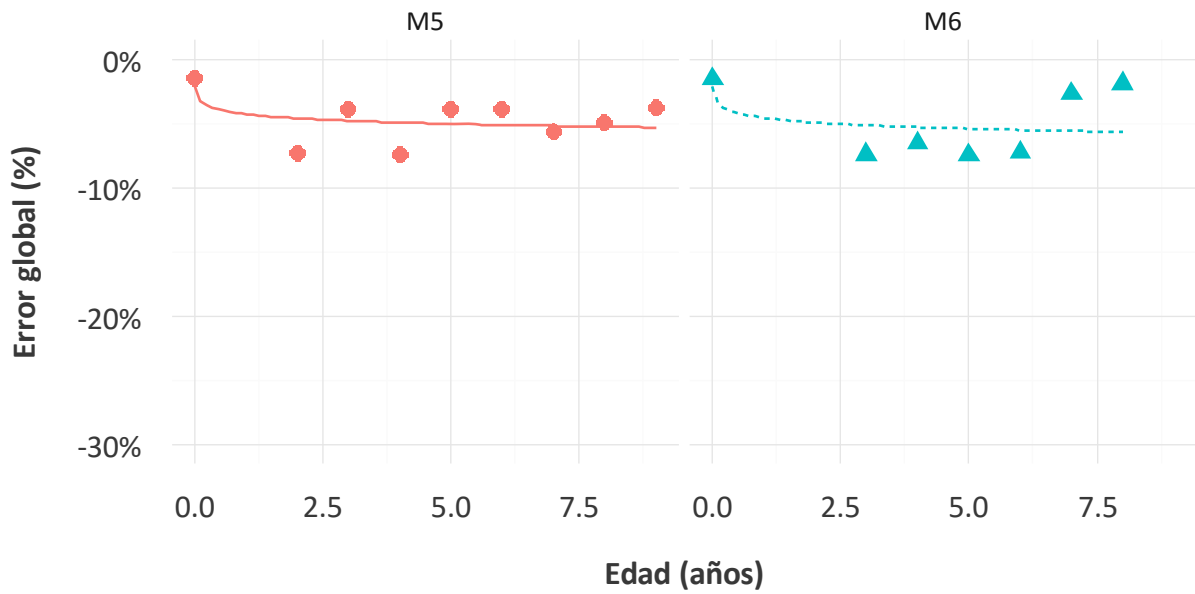


Figura 4.20. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M5, M6)

A pesar de esto, el 28% de la variabilidad del error viene explicada por la ecuación del modelo M5 mientras que el 20% de la variabilidad del error del modelo M6 viene explicada por la ecuación (4.6).

Tabla 4.10. Parámetros estadísticos de la regresión (M5, M6)

| Comb | Modelo | Regresión   | a       | b       | R-Cuadrado | F    | P-valor |
|------|--------|-------------|---------|---------|------------|------|---------|
| 5    | M5     | Logarítmica | -4.263% | -0.470% | 0.28       | 2.75 | 0.14    |
| 6    | M6     | Logarítmica | -4.547% | -0.527% | 0.20       | 1.29 | 0.31    |

La velocidad de degradación logarítmica viene definidas por las ecuaciones (4.5) y (4.6).

$$\varepsilon_{M5}(\%) = -0.470 \cdot \log(\text{Edad}) - 4.263 \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_{M6}(\%) = -0.527 \cdot \log(\text{Edad}) - 4.547 \quad (4.6)$$

Por lo que respecta al abastecimiento D, el análisis se ha dividido en grupos de dos modelos para poder llevar a cabo un análisis minucioso.

#### 4. Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

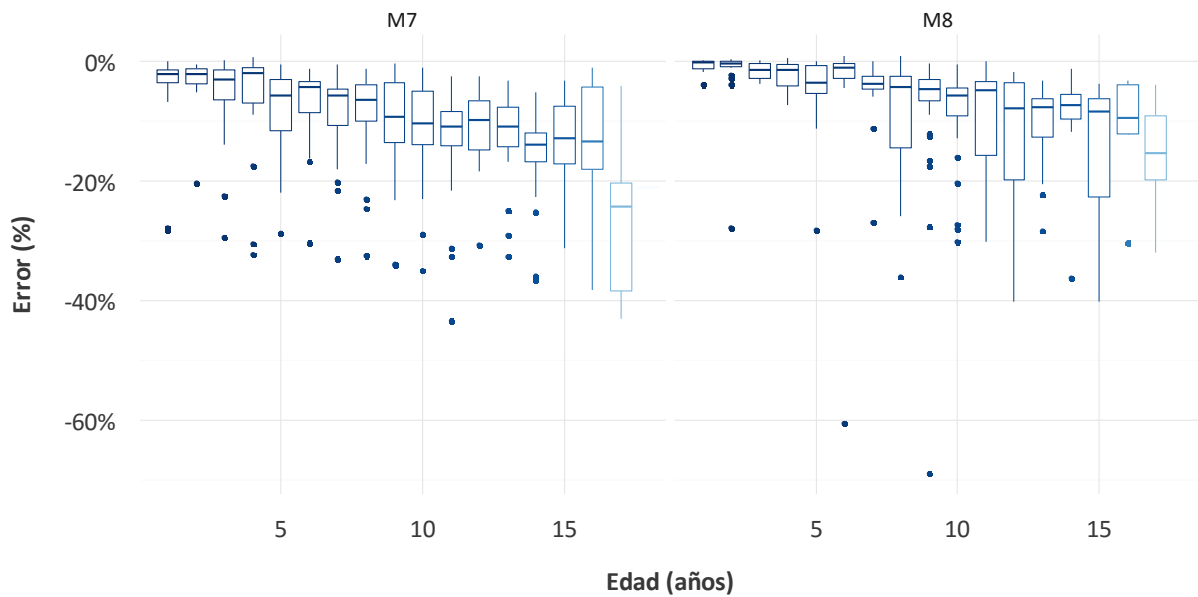


Figura 4.21. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M7 y M8

Un claro ejemplo de la degradación del error global se observa en los modelos M7 y M8. Esta degradación se observa de manera clara debido a que la muestra corresponde a más de 350 contadores por cada modelo, distribuidos a lo largo de los años.

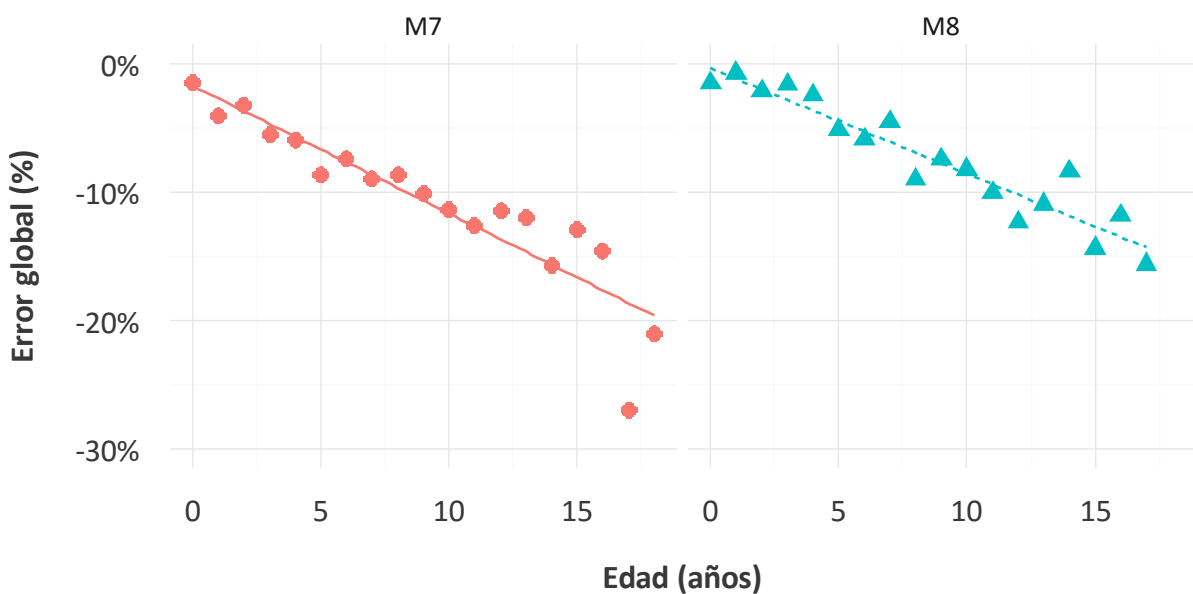


Figura 4.22. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M7, M8)

Estos valores reflejan que a partir de 10 años el modelo sobrepasa el error de -10% y llega hasta valores de incluso -20%. La degradación de ambos modelos es muy similar con el paso del tiempo llegando el modelo M7 a un valor de error global de casi -15% para un valor correspondiente a 17 años.

La ecuación obtenida explica el 83% y el 90% de la variabilidad del error global. Un valor que se ve reflejado claramente tanto en los diagramas de caja y bigotes como en el gráfico de regresión lineal.

Tabla 4.11. Parámetros estadísticos de la regresión (M7, M8)

| Comb | Modelo | Regresión | a       | b       | R-Cuadrado | F      | P-valor |
|------|--------|-----------|---------|---------|------------|--------|---------|
| 7    | M7     | Lineal    | -1.711% | -0.996% | 0.83       | 83.06  | 0.00    |
| 8    | M8     | Lineal    | -0.365% | -0.822% | 0.90       | 143.67 | 0.00    |

$$\varepsilon_{M7}(\%) = -0.996 \cdot Edad - 1.711 \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_{M8}(\%) = -0.822 \cdot Edad - 0.365 \quad (4.8)$$

Por lo que respecta a los modelos M9 y M10, la degradación es la que muestra la Figura 4.24. El modelo M9 se adapta de manera muy similar a los modelos M7 y M8 llegando a alcanzar para 10 años un valor del -10%. En el modelo M10, pese a que la ecuación explique un 42% de la variabilidad del error, su pendiente es menos acusada llegando a un valor de error de -10% para quince años.

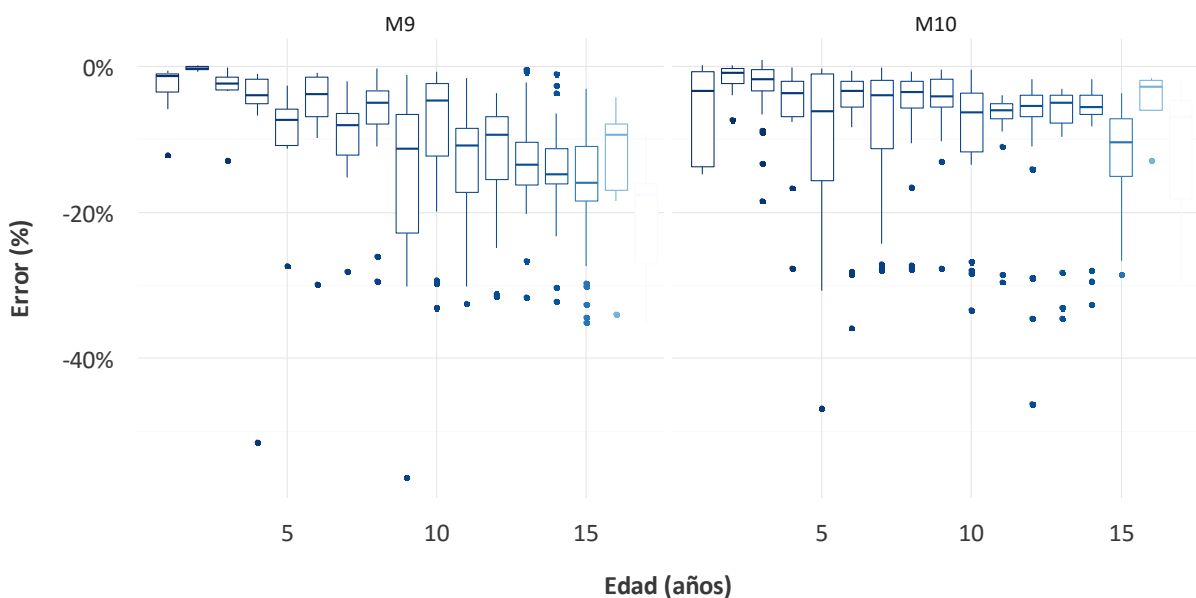


Figura 4.23. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M9 y M10

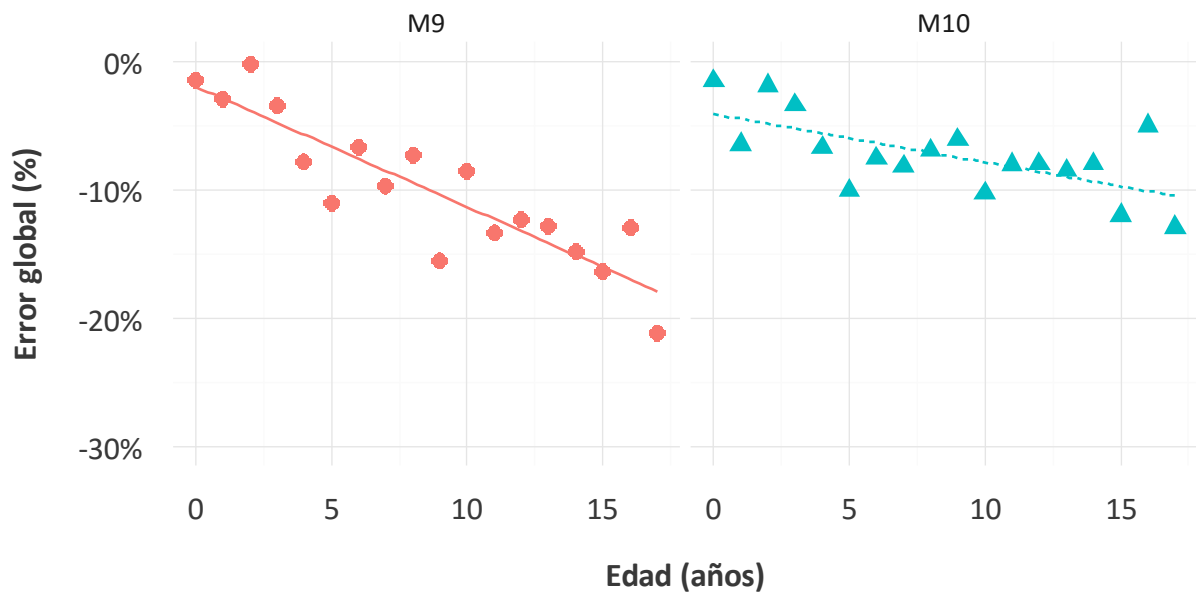


Figura 4.24. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M9, M10)

Los parámetros estadísticos y las ecuaciones que representan la regresión son los que se muestran a continuación:

Tabla 4.12. Parámetros estadísticos de la regresión (M9, M10)

| Comb | Modelo | Regresión | <i>a</i> | <i>b</i> | R-Cuadrado | F     | P-valor |
|------|--------|-----------|----------|----------|------------|-------|---------|
| 9    | M9     | Lineal    | -1.956%  | -0.938%  | 0.79       | 61.45 | 0.00    |
| 10   | M10    | Lineal    | -4.109%  | -0.375%  | 0.42       | 11.78 | 0.00    |

$$\varepsilon_{M9}(\%) = -0.938 \cdot Edad - 1.956 \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_{M10}(\%) = -0.375 \cdot Edad - 4.109 \quad (4.10)$$

Los modelos M11 y M12 poseen muestras de contadores relativamente pequeñas, 71 y 48 contadores respectivamente. Observando la Figura 4.25 ya se puede concluir que el modelo de regresión que se obtiene no puede aportar una información demasiado precisa.

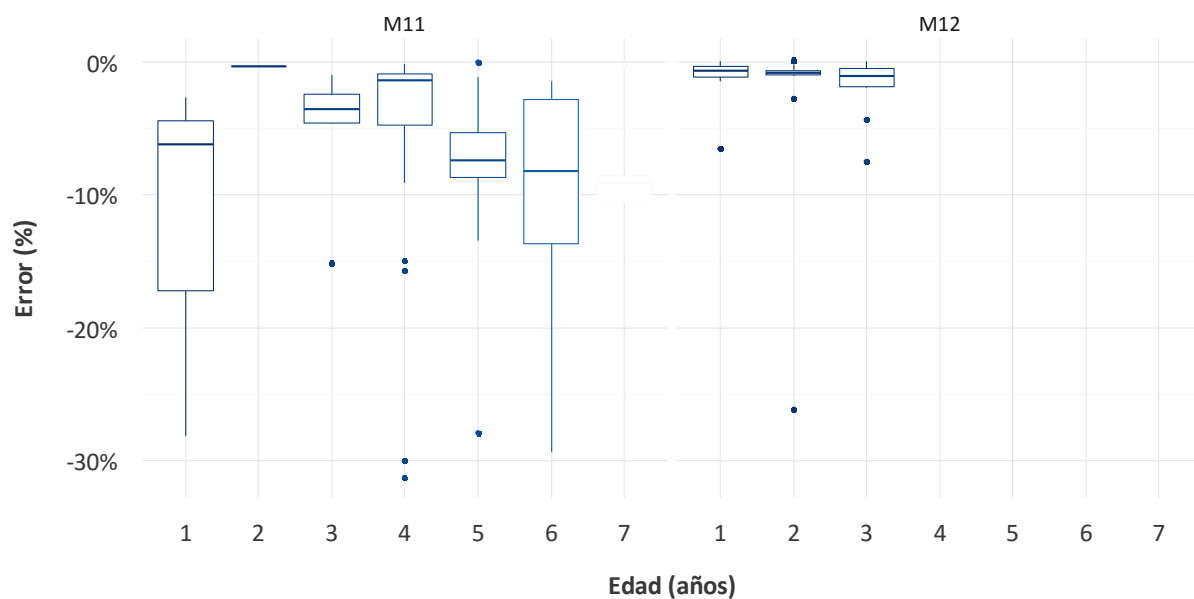


Figura 4.25. Diagrama de caja y bigotes del error global en función de la edad para los modelos M11 y M12

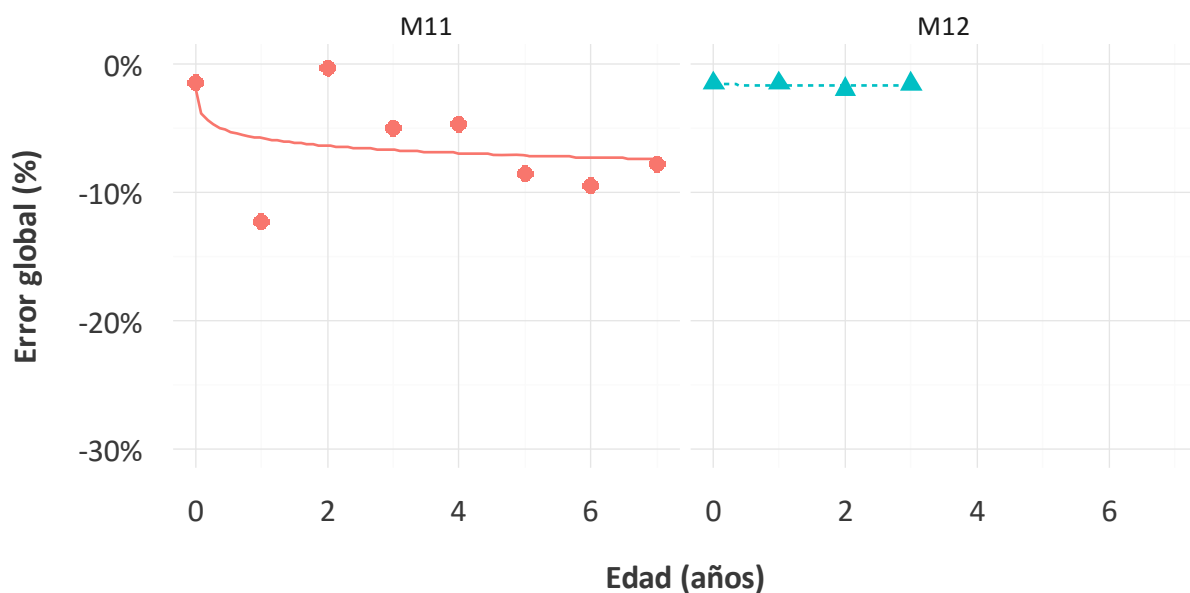


Figura 4.26. Velocidad de degradación del error global en función de la edad (M11, M12)

La Tabla 4.13 refuerza lo indicado anteriormente puesto que las ecuaciones que intentan explicar la variabilidad del error global representan un 19% y un 16% de la variabilidad total. La pendiente del modelo M12 es prácticamente nula mientras que la ecuación del modelo M11 representa una ecuación logarítmica añadiendo importancia al error inicial y fluctuando el resto de valores promedios alrededor de la recta en un valor cercano al -8%.

Pese a que se puede construir una ecuación que trate de representar la degradación de dichos modelos con la edad, es importante destacar que tal y como se observa en las figuras y en la Tabla 4.13, la muestra es insuficiente y haría falta aumentar dicho número.

Tabla 4.13. Parámetros estadísticos de la regresión (M11, M12)

| Comb | Modelo | Regresión   | a       | b       | R-Cuadrado | F    | P-valor |
|------|--------|-------------|---------|---------|------------|------|---------|
| 11   | M11    | Logarítmica | -5.811% | -0.831% | 0.19       | 1.42 | 0.28    |
| 12   | M12    | Lineal      | -1.537% | -0.073% | 0.16       | 0.37 | 0.60    |

$$\varepsilon_{M11}(\%) = -0.831 \cdot \log(\text{Edad}) - 5.811 \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{M12}(\%) = -0.073 \cdot \text{Edad} - 1.537 \quad (4.12)$$

#### 4.3.2 Velocidad de degradación según el volumen acumulado

Una vez efectuada el análisis de los diferentes a partir de su año de instalación, se lleva a cabo lo propio a raíz de su volumen acumulado. A priori, al estar distribuida la muestra de manera más homogénea en función del volumen, se debería ver más claramente la evolución del error. Los cálculos se pueden encontrar en el Anexo A.3.

De la misma manera que para la edad, se ha tomado como consideración que el error global de un contador volumétrico para un volumen acumulado de 0m<sup>3</sup> corresponde con un valor de -1.5% y se han llevado a cabo una serie de análisis de regresión donde las regresiones lineal y logarítmica han resultado ser las que mejor explican la variabilidad del error global. La estructura de este apartado, se estructura igual que el apartado anterior.



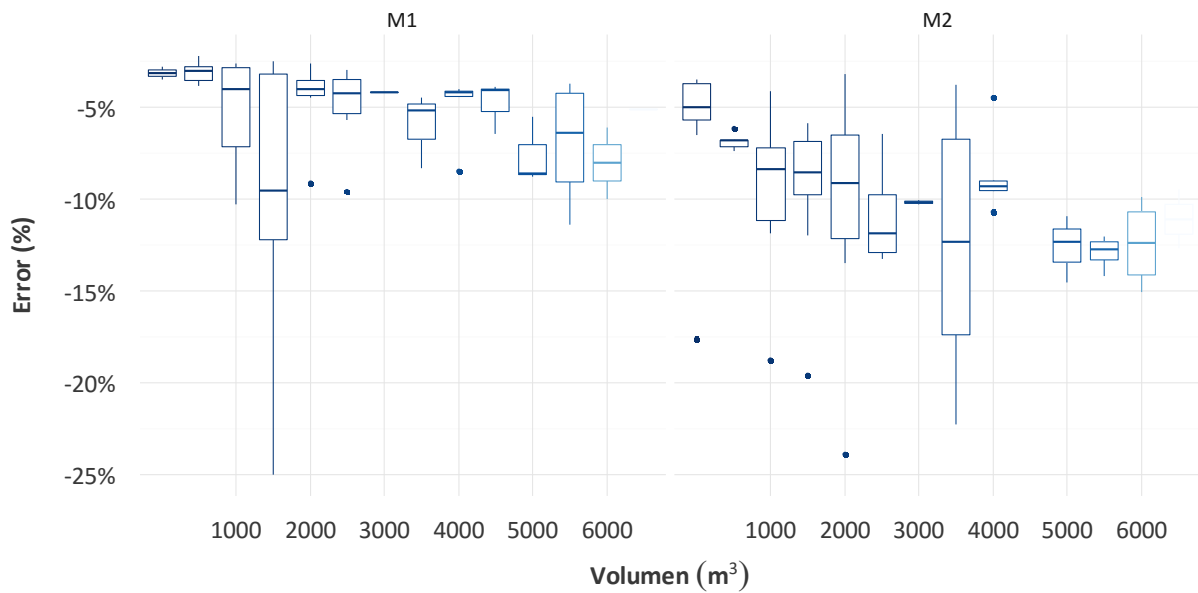


Figura 4.27. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M1 y M2

De la Figura 4.27 se desprende que el modelo M1 y M2 posee una dispersión elevada tanto a 1500 como a 3500m<sup>3</sup> respectivamente. La degradación del error global de M1 fluctúa alrededor de -5% mientras que la degradación del error de M2 se encuentra alrededor del -10%.

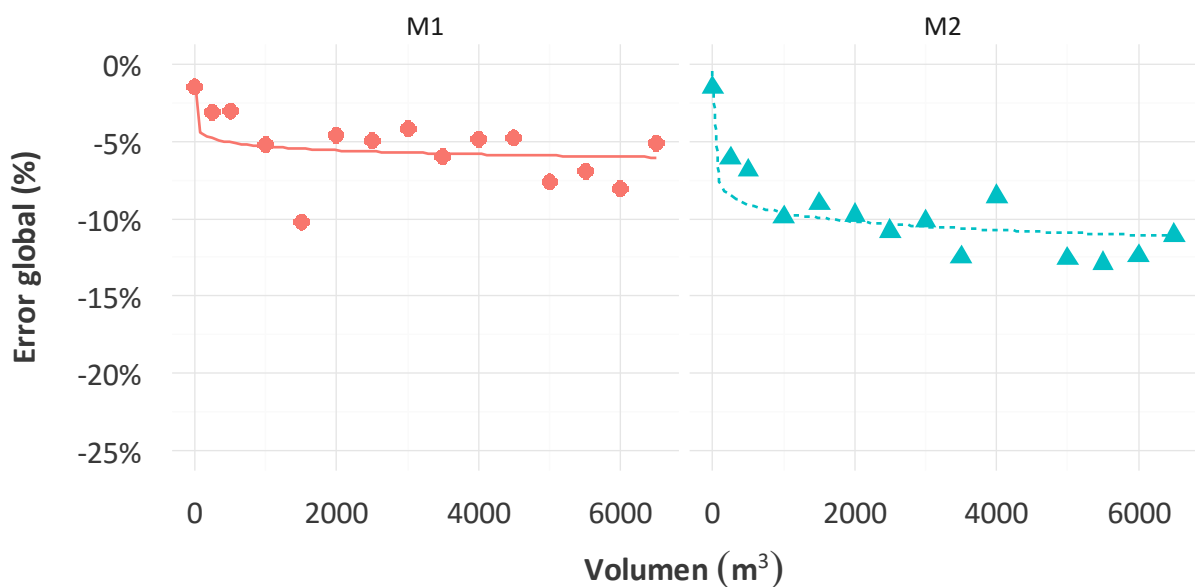


Figura 4.28. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M1, M2)

#### 4. Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

De la tabla de estadísticos se desprende que mientras que para el modelo M1 la ecuación logarítmica no explica más de un 33% de la variabilidad del error, para el modelo M2 sí que explica un 77% de la variabilidad del error.

Tabla 4.14. Parámetros estadísticos de la regresión (M1, M2)

| Comb | Modelo | Regresión   | a       | b       | R-Cuadrado | F     | P-valor |
|------|--------|-------------|---------|---------|------------|-------|---------|
| 13   | M1     | Logarítmica | -2.714% | -0.377% | 0.33       | 6.47  | 0.02    |
| 14   | M2     | Logarítmica | -4.132% | -0.796% | 0.77       | 39.21 | 0.00    |

Por tanto, se puede decir que mientras que para el modelo M2, la ecuación en función de la edad representa el 59% de la variabilidad del error, el volumen representa un mayor porcentaje de esta variabilidad, siendo al revés para el caso del modelo M1.

$$\varepsilon_{M1}(\%) = -0.3777 \cdot \log(\text{Volumen}) - 2.714 \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_{M2}(\%) = -0.796 \cdot \log(\text{Volumen}) - 4.132 \quad (4.14)$$

Por lo que respecta al abastecimiento B, en la Figura 4.29 se observa la dispersión del error global de ambos modelos. Mientras que el error de M3 tiende a decaer a medida que aumenta el volumen, el error de M4 se mantiene relativamente constante pese a la mayor dispersión de los valores.

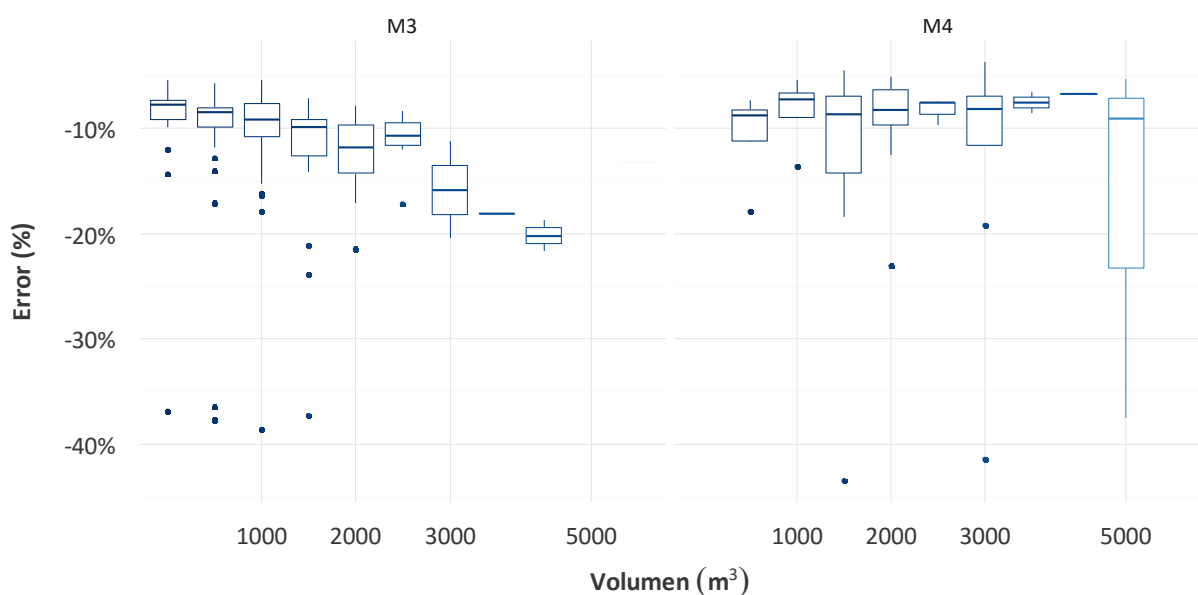


Figura 4.29. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M3 y M4

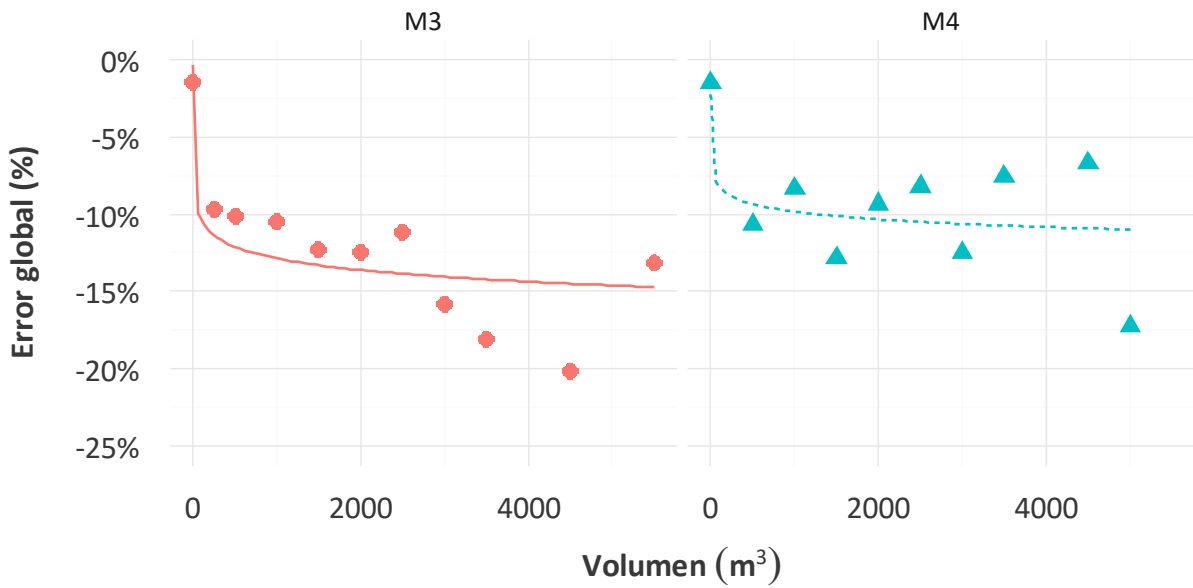


Figura 4.30. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M3, M4)

El hecho de que M4 posea una dispersión tan elevada a 5000m<sup>3</sup> es debido a que se da un contador con un error bastante bajo, y esto da lugar a que la caja del diagrama que corresponde a ese volumen sea tan alargada.

Según la tabla de estadísticos, la ecuación que mejor representa la variabilidad del error global es la ecuación logarítmica. Mientras que en el modelo M3 el 69% de la variabilidad del error viene explicada por el volumen, en el modelo M4 únicamente es el 45%.

Tabla 4.15. Parámetros estadísticos de la regresión (M3, M4)

| Comb | Modelo | Regresión   | a       | b       | R-Cuadrado | F     | P-valor |
|------|--------|-------------|---------|---------|------------|-------|---------|
| 15   | M3     | Logarítmica | -5.381% | -1.083% | 0.69       | 19.64 | 0.00    |
| 16   | M4     | Logarítmica | -4.875% | -0.718% | 0.45       | 6.52  | 0.03    |

Las ecuaciones del modelo son las que se muestran a continuación:

$$\varepsilon_{M3}(\%) = -1.083 \cdot \log(\text{Volumen}) - 5.381 \tag{4.15}$$

$$\varepsilon_{M4}(\%) = -0.718 \cdot \log(\text{Volumen}) - 4.875 \tag{4.16}$$

En la Figura 4.31 se muestra cómo evoluciona el error global del abastecimiento C en función del volumen. Para el modelo M5 se observa una clara tendencia decreciente con el

#### 4. Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

paso del volumen mientras que para el modelo M6, debido a la falta de muestra suficiente, no se observa una tendencia demasiado evidente.

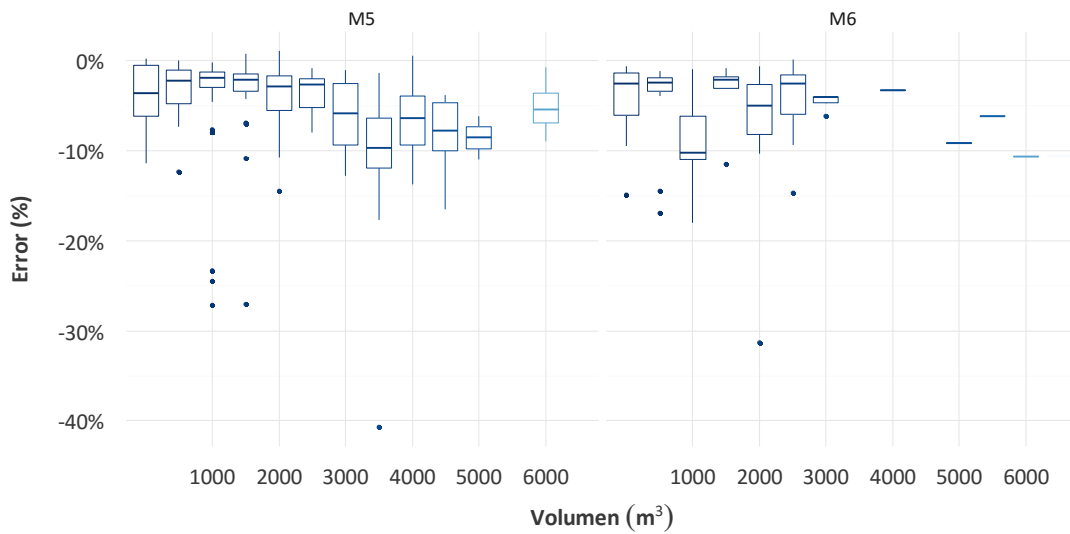


Figura 4.31. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M5 y M6

El modelo M5 presenta una tendencia claramente lineal donde el 45% de la variabilidad del error global viene explicado por el volumen mientras que el 44% corresponde con el modelo M6.

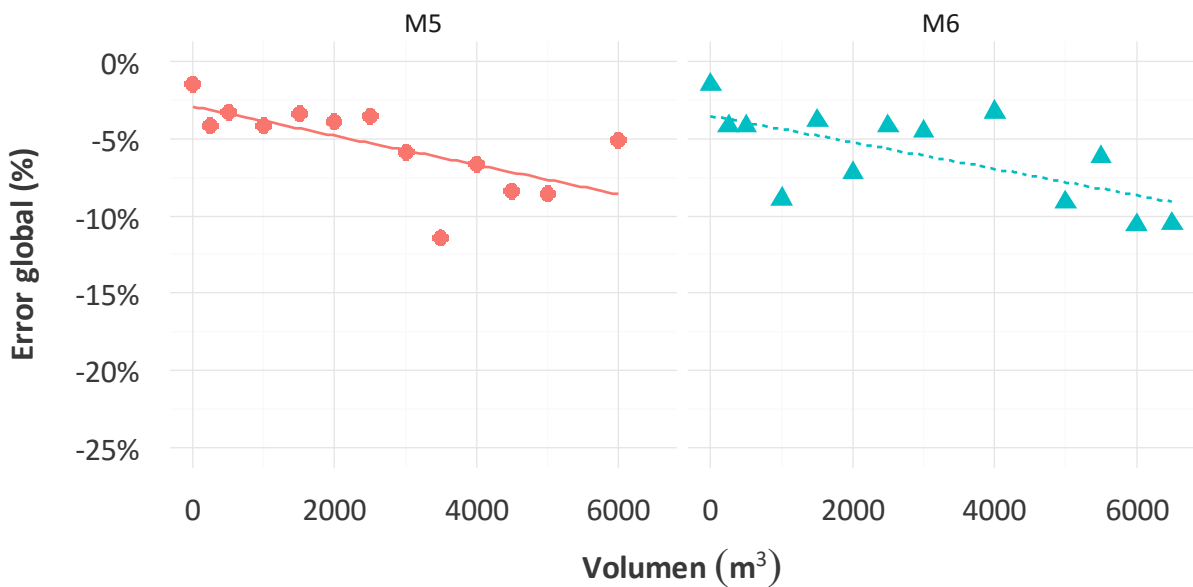


Figura 4.32. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M5, M6)

Pese a que la tendencia que se muestra parece lineal, es necesario un mayor número de contadores para analizar la tendencia de estos modelos, al igual que se ha concluido para la edad, donde un 28% y un 20% eran los valores de  $r^2$ , valores bastante bajos.

Tabla 4.16. Parámetros estadísticos de la regresión (M5, M6)

| Comb | Modelo | Regresión | a       | b       | R-Cuadrado | F    | P-valor |
|------|--------|-----------|---------|---------|------------|------|---------|
| 17   | M5     | Lineal    | -2.925% | -0.001% | 0.45       | 8.94 | 0.01    |
| 18   | M6     | Lineal    | -3.541% | -0.001% | 0.44       | 8.55 | 0.01    |

Por otro lado, es importante destacar que la pendiente de las ecuaciones corresponde con un valor del -0.001%. Pendientes relativamente bajas considerando que las pendientes de las ecuaciones en función de la edad son del orden de un -0.5%.

$$\varepsilon_{M5}(\%) = -0.001 \cdot \text{Volumen} - 2.925 \quad (4.17)$$

$$\varepsilon_{M6}(\%) = -0.001 \cdot \text{Volumen} - 3.541 \quad (4.18)$$

Por lo que respecta al abastecimiento D, de la misma manera que en el apartado anterior, se muestran los modelos divididos en grupos para poder llevar a cabo un análisis más riguroso.

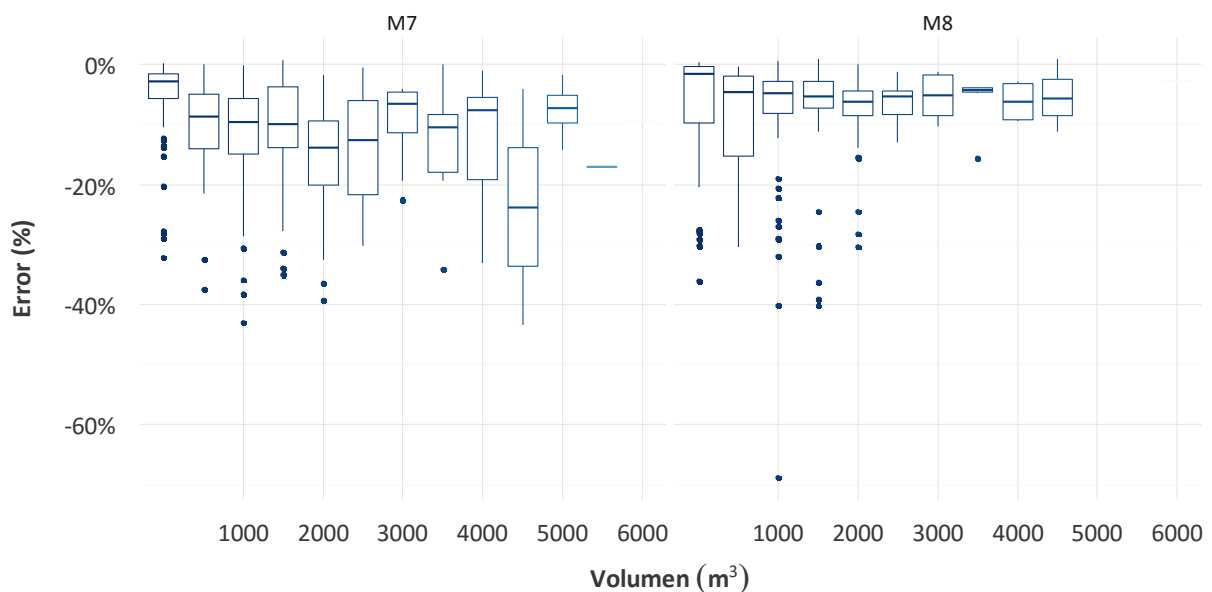


Figura 4.33. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M7 y M8

Según la Figura 4.33, el modelo M7 presenta mayor dispersión del error global llegando a alcanzar valores cercanos al -15%. Por otro lado, el modelo M8 muestra menor dispersión

en los valores, exceptuando para los primeros 1000m<sup>3</sup> donde se produce también una gran dispersión.

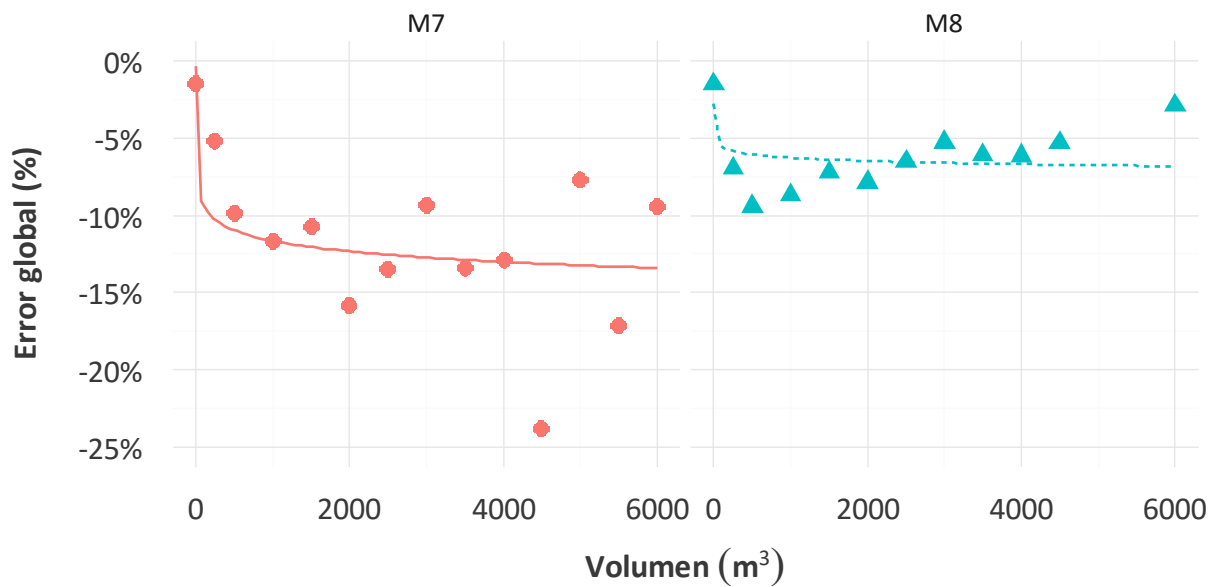


Figura 4.34. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M7, M8)

El modelo M7 presenta una tendencia logarítmica pese a que a partir de 4000m<sup>3</sup> es común que los valores se dispersen puesto que una serie de contadores continúan con una degradación más acusada mientras que otros mantienen su curva de error.

El modelo M6 presenta una tendencia más constante a medida que aumenta el volumen acumulado.

Tabla 4.17. Parámetros estadísticos de la regresión (M7, M8)

| Comb | Modelo | Regresión   | a       | b       | R-Cuadrado | F    | P-valor |
|------|--------|-------------|---------|---------|------------|------|---------|
| 19   | M7     | Logarítmica | -4.853% | -0.984% | 0.39       | 7.74 | 0.02    |
| 20   | M8     | Logarítmica | -4.176% | -0.304% | 0.24       | 3.17 | 0.11    |

Por lo que respecta al modelo M7, la ecuación es capaz de explicar un 39% de la variabilidad del error global en función del volumen mientras que el modelo M8 explica un 24% de la variabilidad en función del volumen.

$$\varepsilon_{M7}(\%) = -0.984 \cdot \log(\text{Volumen}) - 4.853 \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_{M8}(\%) = -0.304 \cdot \log(\text{Volumen}) - 4.176 \quad (4.20)$$

Es digno de mención que mientras que los valores de  $R^2$  para estos modelos en función de la edad son los más altos del resto de modelos, y cercanos ambos al 90%, no corresponde de la misma manera para el volumen acumulado. Esto es señal de que la edad es una variable más significativa en este tipo de contadores.

Por lo que respecta a los modelos M9 y M10, la dispersión se muestra en la Figura 4.35. De la misma manera que para la edad, la tendencia es muy similar a la de los modelos M7 y M8.

El modelo M9 presenta una tendencia logarítmica. Para volúmenes elevados, y de la misma manera que el modelo M7, los valores de error comienzan a dispersarse sin una tendencia clara.

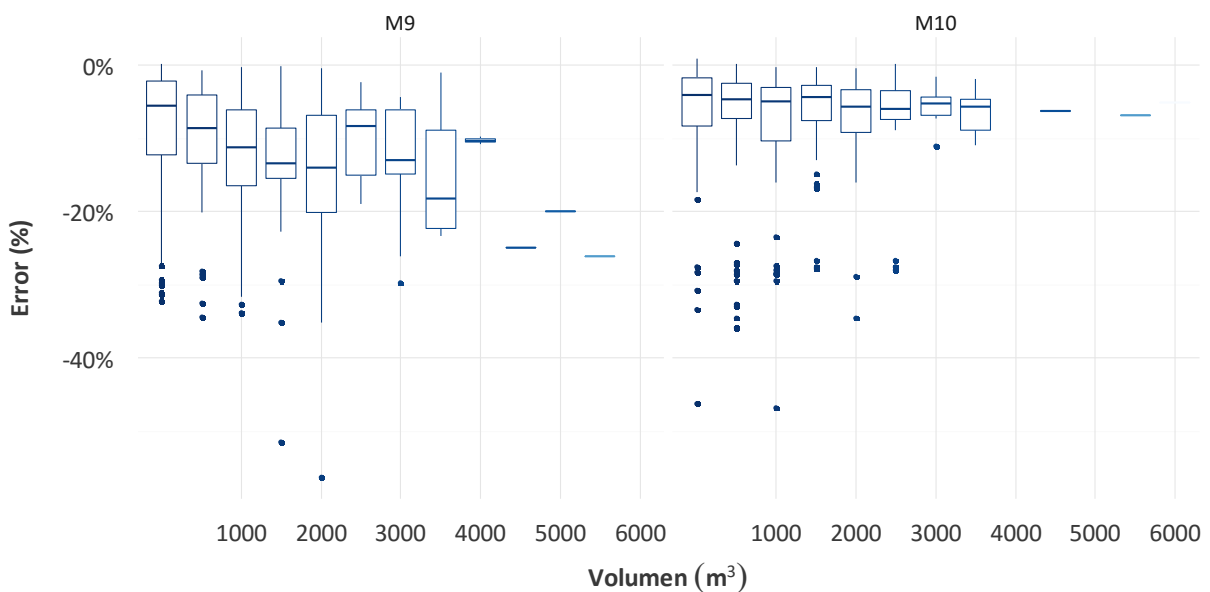


Figura 4.35. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M9 y M10

Por lo que respecta al modelo M10, así como en el modelo M8, este presenta una tendencia logarítmica con una pendiente menos acusada que el modelo M9 y con los últimos valores continuando la tendencia logarítmica que marca la regresión.

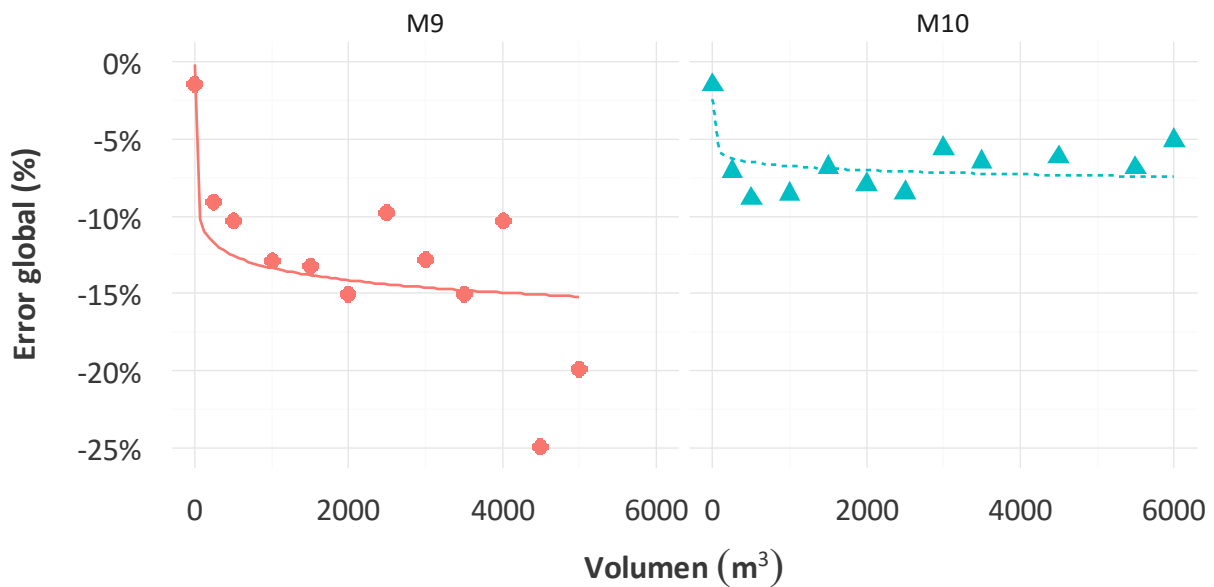


Figura 4.36. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M9, M10)

Tabla 4.18. Parámetros estadísticos de la regresión (M9, M10)

| Comb | Modelo | Regresión   | a       | b       | R-Cuadrado | F    | P-valor |
|------|--------|-------------|---------|---------|------------|------|---------|
| 21   | M9     | Logarítmica | -5.313% | -1.288% | 0.46       | 9.48 | 0.01    |
| 22   | M10    | Logarítmica | -4.148% | -0.379% | 0.48       | 9.13 | 0.01    |

De esta manera, y según la Tabla 4.18, el 46% de la variabilidad del error global viene explicada por la variable volumen para el modelo M9 mientras que el 48% de la variabilidad es explicada por parte del modelo M10.

$$\varepsilon_{M9}(\%) = -1.288 \cdot \log(\text{Volumen}) - 5.313 \quad (4.21)$$

$$\varepsilon_{M10}(\%) = -0.379 \cdot \log(\text{Volumen}) - 4.148 \quad (4.22)$$

Por último, los modelos M11 y M12, de los cuales se posee una muestra relativamente baja, no se puede obtener una conclusión clara de su degradación, tal y como muestra la Figura 4.37.

Debido a que estos valores no tienen sentido, puesto que, como se ha indicado, la muestra es demasiado pequeña y no es representativa, la ecuación de ambos modelos se representa como una horizontal con un valor del error relativo a 250m<sup>3</sup> que en el caso del modelo M11 corresponde con un valor de -5.552% y en el caso del modelo M12 de -1.656%.



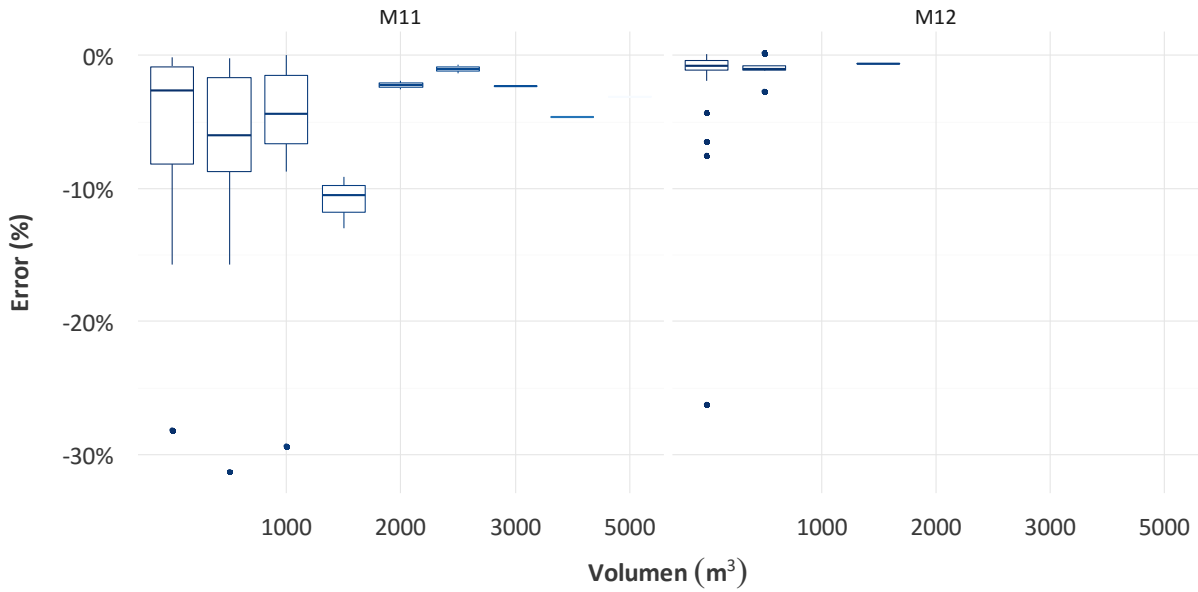


Figura 4.37. Diagrama de caja y bigotes del error global en función del volumen para los modelos M11 y M12

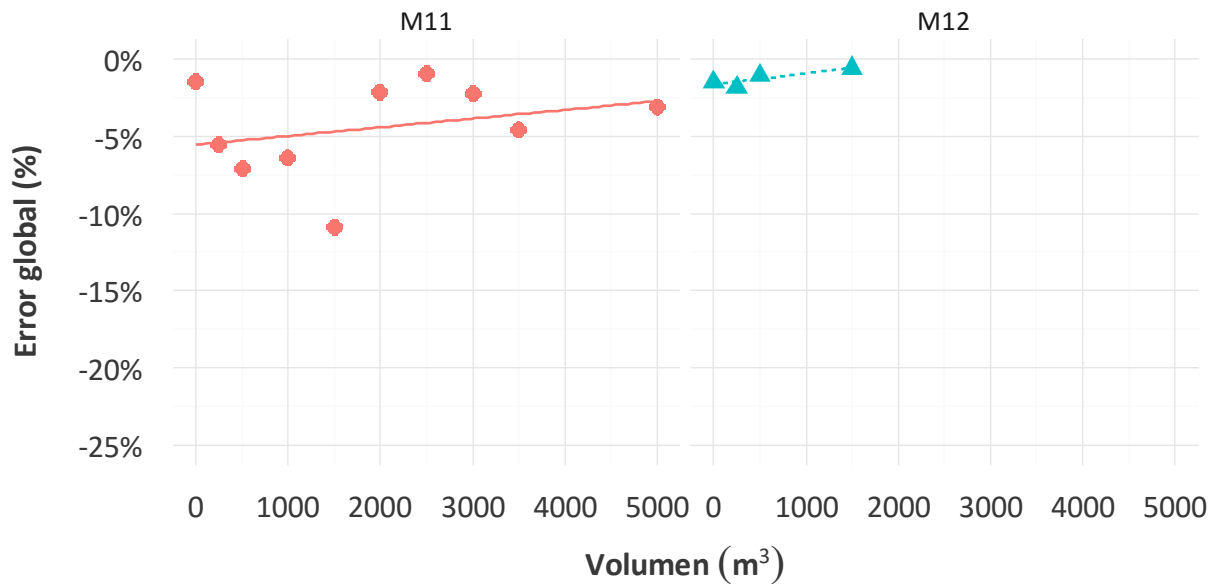


Figura 4.38. Velocidad de degradación del error global en función del volumen (M11, M12)

$$\varepsilon_{M11}(\%) = -5.552 \quad (4.23)$$

$$\varepsilon_{M12}(\%) = -1.656 \quad (4.24)$$

Una vez llevado a cabo el análisis tanto por edad como por volumen acumulado se ha llegado a la conclusión de que existe cierta relación directa entre el número de contadores analizados y el valor de  $R^2$ , es decir, la variabilidad del error que puede ser explicada por

una de estas dos variables está relacionada con el tamaño de la muestra. Esto se observa en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19. Valores de  $R^2$  y  $R^2$  ponderado en función del modelo de contador para la variable edad

|     | Regresión   | $n$ | $P. \text{ curva}$ | $R^2$ | $C$  | $R^2 \text{ pond.}$ |
|-----|-------------|-----|--------------------|-------|------|---------------------|
| M1  | Lineal      | 81  | 5                  | 0.77  | 0.22 | 0.17                |
| M2  | Lineal      | 91  | 3                  | 0.59  | 0.10 | 0.06                |
| M3  | Lineal      | 159 | 11                 | 0.51  | 0.58 | 0.30                |
| M4  | Lineal      | 50  | 7                  | 0.31  | 0.34 | 0.10                |
| M5  | Logarítmica | 213 | 8                  | 0.28  | 0.40 | 0.11                |
| M6  | Logarítmica | 84  | 6                  | 0.20  | 0.28 | 0.06                |
| M7  | Lineal      | 405 | 18                 | 0.83  | 1.00 | 0.83                |
| M8  | Lineal      | 314 | 17                 | 0.90  | 0.94 | 0.85                |
| M9  | Lineal      | 308 | 17                 | 0.79  | 0.94 | 0.75                |
| M10 | Lineal      | 318 | 17                 | 0.42  | 0.94 | 0.40                |
| M11 | Logarítmica | 69  | 7                  | 0.19  | 0.34 | 0.06                |
| M12 |             | 48  | 3                  | 0.16  | 0.10 | 0.02                |

Esta relación es muy significativa especialmente para la variable edad. En esta tabla se muestra el tamaño de la muestra analizada, así como los puntos utilizados para construir el modelo de regresión de cada tipo de contador. El valor de  $R^2$  se muestra también en la tabla.

A pesar de esto, el valor de  $R^2$  no es del todo un valor realista puesto que si, por ejemplo, tuviéramos un modelo con dos puntos para llevar a cabo la regresión,  $R^2$  tomaría un valor de 1 cuando realmente harían falta más puntos para determinar la degradación de ese error. Es por esto que se llega al valor de  $R^2$  ponderado, que corresponde de aplicar un factor de corrección ( $C$ ) al valor de  $R^2$  original, que es función de los puntos existentes para poder construir la curva. De esta manera, la relación entre el tamaño de la muestra y el valor de  $R^2$  estándar como  $R^2$  ponderado se muestra en la Figura 4.39.

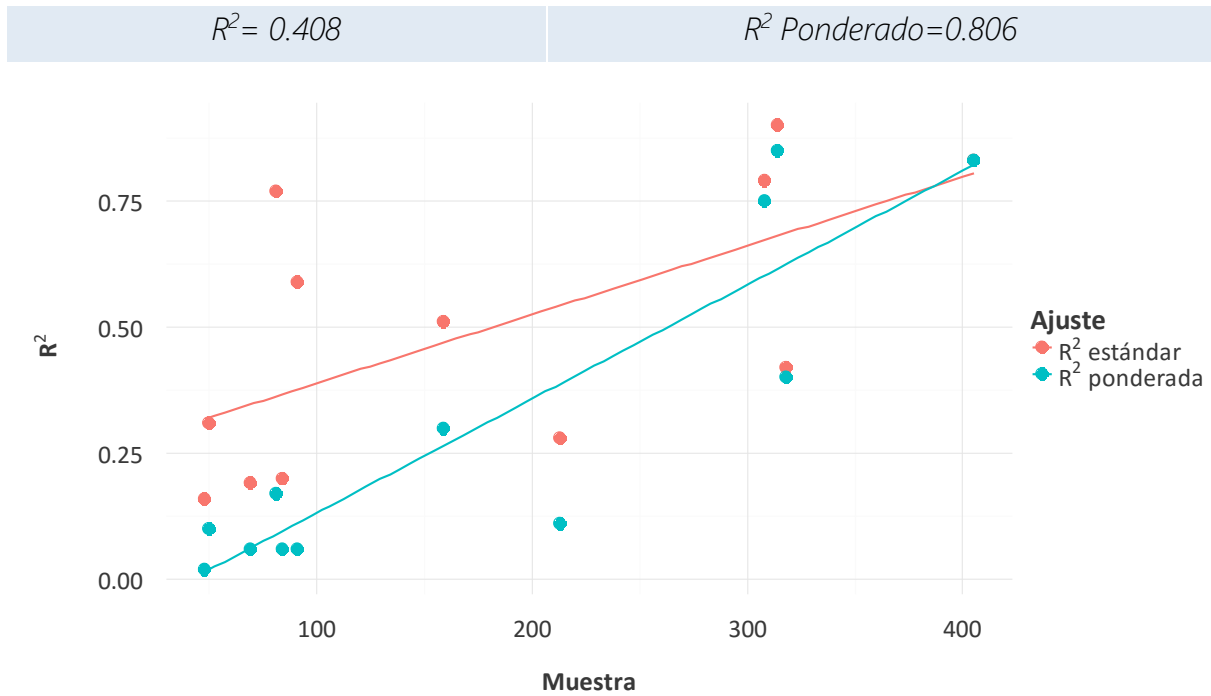


Figura 4.39. Valores de  $R^2$  y  $R^2$  ponderado en función del tamaño de la muestra para la variable edad

Esta figura es capaz de responder a la pregunta del número necesario de contadores a ensayar para poder obtener un modelo de degradación aproximado para conocer la degradación del error. Mientras que para una muestra de 100 contadores los valores poseen una gran dispersión, para un valor cercano o superior a 300 contadores, la dispersión es mínima. Es por ello que se puede establecer este valor como valor de referencia mínimo a partir del cual se podría conocer la degradación de un modelo de contador.

Por otro lado, la clasificación en función del volumen acumulado muestra un valor de  $R^2$  bastante bajo en relación con la muestra ensayada. Estos valores se muestran en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20. Valores de  $R^2$  y  $R^2$  ponderado en función del modelo de contador para la variable volumen

|    | Regresión   | n   | P. curva | $R^2$ | C    | $R^2$ pond. |
|----|-------------|-----|----------|-------|------|-------------|
| M1 | Logarítmica | 81  | 14       | 0.33  | 1.00 | 0.33        |
| M2 | Logarítmica | 91  | 13       | 0.77  | 0.92 | 0.70        |
| M3 | Logarítmica | 159 | 10       | 0.69  | 0.67 | 0.46        |
| M4 | Logarítmica | 50  | 9        | 0.45  | 0.59 | 0.27        |
| M5 | Lineal      | 213 | 12       | 0.45  | 0.84 | 0.38        |
| M6 | Lineal      | 84  | 12       | 0.44  | 0.84 | 0.37        |
| M7 | Logarítmica | 405 | 13       | 0.39  | 0.92 | 0.36        |
| M8 | Logarítmica | 314 | 11       | 0.24  | 0.75 | 0.18        |

#### 4. Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

|     | Regresión   | n   | P. curva | R <sup>2</sup> | C    | R <sup>2</sup> pond. |
|-----|-------------|-----|----------|----------------|------|----------------------|
| M9  | Logarítmica | 308 | 11       | 0.46           | 0.75 | 0.35                 |
| M10 | Logarítmica | 318 | 11       | 0.48           | 0.75 | 0.36                 |
| M11 | -           | 69  | 8        | 0.08           | 0.51 | 0.04                 |
| M12 | -           | 48  | 3        | 0.00           | 0.10 | 0.00                 |

El procedimiento llevado a cabo es similar al procedimiento realizado para la variable edad. La representación de los valores se muestra en la Figura 4.41.

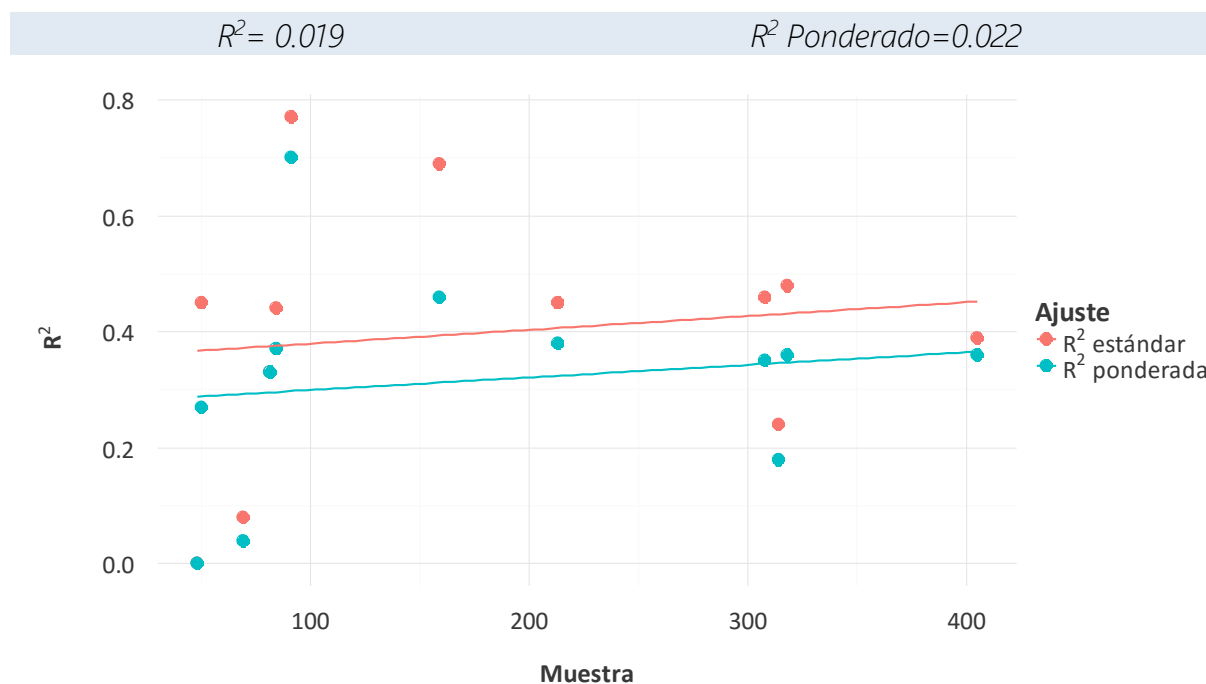


Figura 4.40. Valores de R<sup>2</sup> y R<sup>2</sup> ponderado en función del tamaño de la muestra para la variable volumen acumulado

En esta figura se observa que los diferentes modelos se adaptan mejor a la variable edad que a la variable volumen acumulado, presentando valores de R<sup>2</sup> nada satisfactorios y careciendo de sentido.

#### 4.3.3 Velocidad de degradación del error global en función de la edad y del volumen acumulado

Una vez realizadas las regresiones tanto por edad como por volumen acumulado para los diferentes modelos, se ha llevado a cabo una regresión conjunta con el fin de obtener un modelo de regresión que englobe a ambas variables en una única ecuación. Como se ha podido observar, la precisión de los ajustes por edad va a marcar si la ecuación viene definida por dos parámetros o únicamente por uno.

Para la realización del modelo de degradación se han llevado a cabo las combinaciones mostradas en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21. Combinaciones efectuadas para obtener la velocidad de degradación

| Regresión | Parámetro b: Edad | Parámetro c: Volumen |
|-----------|-------------------|----------------------|
| A         | Lineal            | Lineal               |
| B         | Lineal            | Logarítmica          |
| C         | Logarítmica       | Lineal               |
| D         | Logarítmica       | Logarítmica          |

Las cuatro combinaciones (A, B, C y D) se han realizado para cada modelo de contador, dando lugar a un total de 48 regresiones combinadas de manera diferente. Los resultados de los parámetros estadísticos se muestran en el Anexo A.4. Las regresiones con mayor  $R^2$  de cada modelo se han extraído y se muestran en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22. Parámetros de regresión conjunta edad-volumen acumulado para cada modelo de contador

| Comb | Mod | Regresión            | a       | b       | c       | R-Cuadrado | F     | P-valor |
|------|-----|----------------------|---------|---------|---------|------------|-------|---------|
| 26   | M1  | Lineal - Logarítmica | -0.909% | -0.554% | -0.200% | 0.23       | 3.99  | 0.10    |
| 32   | M2  | Log - Log            | 0.743%  | 2.541%  | -2.001% | 0.51       | 13.48 | 0.02    |
| 34   | M3  | Lineal - Logarítmica | -3.721% | -0.343% | -0.801% | 0.36       | 10.84 | 0.02    |
| 38   | M4  | Lineal - Logarítmica | -4.634% | -0.199% | -0.685% | 0.06       | 0.67  | 0.73    |
| 41   | M5  | Lineal - Lineal      | -3.115% | 0.063%  | -0.001% | 0.09       | 2.51  | 0.86    |
| 46   | M6  | Lineal - Logarítmica | -5.572% | 0.996%  | -0.741% | 0.28       | 5.88  | 0.01    |
| 49   | M7  | Lineal - Lineal      | -0.358% | -0.976% | -0.001% | 0.31       | 23.90 | 0.00    |
| 53   | M8  | Lineal - Lineal      | -0.982% | -0.806% | -0.001% | 0.32       | 22.37 | 0.00    |
| 57   | M9  | Lineal - Lineal      | -0.806% | -0.917% | -0.001% | 0.31       | 22.20 | 0.00    |
| 61   | M10 | Lineal - Lineal      | -5.778% | -0.400% | -0.001% | 0.10       | 4.94  | 0.01    |
| 65   | M11 | Lineal - Lineal      | -3.181% | -1.049% | 0.001%  | 0.31       | 4.23  | 0.03    |
| 71   | M12 | Logarítmica - Lineal | -1.829% | -0.068% | 0.001%  | 0.59       | 2.84  | 0.52    |

Donde el parámetro  $a$  hace referencia al término independiente de la ecuación,  $b$  hace referencia a la pendiente de la edad del contador y  $c$  a la pendiente del volumen acumulado.

Pese a que la mayoría de las ecuaciones consigue explicar al menos un 30% de la variabilidad del error global a partir de las variables edad y volumen, para los modelos M4, M5, que poseen una  $R^2$  prácticamente nula, se ha optado por elegir una ecuación con una única variable independiente, que en los dos casos corresponde a la asociada con el volumen acumulado.

#### 4. Estudio del comportamiento metrológico de contadores en uso

Por otro lado, para el modelo M1, se ha optado por una regresión múltiple lineal-logarítmica, ya que pese a que su  $r$  cuadrado no es la mayor, es la que mejor se adapta en este caso a la degradación del error.

En la Tabla 4.23 se muestran los valores de  $R^2$  en función de los diferentes modelos y de las variables empleadas. En ella, al combinar ambas variables es cuando se producen los valores más bajos. A pesar de esto, en la Figura 4.41 se puede distinguir también cierta relación directa entre el tamaño de muestra y los valores de  $R^2$ .

Tabla 4.23. Valores de  $R^2$  para los diferentes modelos de regresión en función de las variables del modelo

|     | Muestra | $R^2$ : Edad | $R^2$ : Volumen | $R^2$ : Edad-Volumen |
|-----|---------|--------------|-----------------|----------------------|
| M1  | 81      | 0.77         | 0.33            | 0.23                 |
| M2  | 91      | 0.59         | 0.77            | 0.51                 |
| M3  | 159     | 0.51         | 0.69            | 0.36                 |
| M4  | 50      | 0.31         | 0.45            | 0.06                 |
| M5  | 213     | 0.28         | 0.45            | 0.09                 |
| M6  | 84      | 0.20         | 0.44            | 0.28                 |
| M7  | 405     | 0.83         | 0.39            | 0.31                 |
| M8  | 314     | 0.90         | 0.24            | 0.32                 |
| M9  | 308     | 0.79         | 0.46            | 0.31                 |
| M10 | 318     | 0.42         | 0.48            | 0.10                 |
| M11 | 69      | 0.19         | 0.08            | 0.00                 |
| M12 | 48      | 0.16         | 0.00            | 0.00                 |

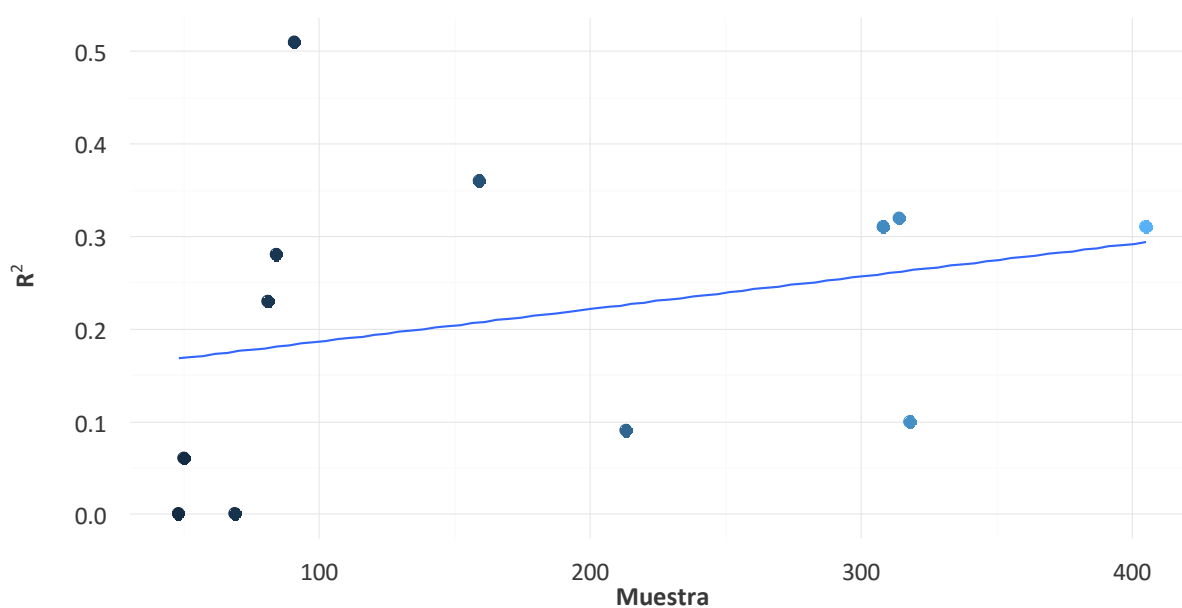


Figura 4.41. Valores de  $R^2$  función de la muestra para el modelo conjunto edad-volumen

Por último, la Tabla 4.24 muestra las ecuaciones definitivas y por tanto la degradación del error de cada modelo de contador.

Tabla 4.24. Ecuación de degradación del error global para cada modelo de contador

| Modelo | Ecuación  |        |
|--------|---|--------|
| M1     | $\varepsilon_{M1}(\%) = -0.798 \cdot Edad - 0.804$                                  | (4.25) |
| M2     | $\varepsilon_{M2}(\%) = 2.541 \cdot \log(Edad) - 2.001 \cdot \log(Volumen) + 0.743$ | (4.26) |
| M3     | $\varepsilon_{M3}(\%) = -0.343 \cdot Edad - 0.801 \cdot \log(Volumen) - 3.721$      | (4.27) |
| M4     | $\varepsilon_{M4}(\%) = -0.718 \cdot \log(Volumen) - 4.875$                         | (4.28) |
| M5     | $\varepsilon_{M5}(\%) = -0.001 \cdot Volumen - 2.925$                               | (4.29) |
| M6     | $\varepsilon_{M6}(\%) = 0.996 \cdot Edad - 0.741 \cdot \log(Volumen) - 5.572$       | (4.30) |
| M7     | $\varepsilon_{M7}(\%) = -0.976 \cdot Edad - 0.001 \cdot Volumen - 0.358$            | (4.31) |
| M8     | $\varepsilon_{M8}(\%) = -0.806 \cdot Edad + 0.001 \cdot Volumen - 0.982$            | (4.32) |
| M9     | $\varepsilon_{M9}(\%) = -0.917 \cdot Edad - 0.001 \cdot Volumen - 0.806$            | (4.33) |
| M10    | $\varepsilon_{M10}(\%) = -0.379 \cdot \log(Volumen) - 4.148$                        | (4.34) |
| M11    | $\varepsilon_{M11}(\%) = -1.049 \cdot Edad + 0.001 \cdot Volumen - 3.181$           | (4.35) |
| M12    | $\varepsilon_{M8}(\%) = -0.068 \cdot \log(Edad) + 0.001 \cdot Volumen - 1.829$      | (4.36) |





## 5 Comparativa del contador volumétrico frente al contador de chorro único

“¿Qué contador debo escoger para mi abastecimiento?” Esta simple pregunta, llevada a cabo por la mayoría de abastecimientos es el verdadero quebradero de cabeza para los gestores de la medición y telelectura de una empresa de gestión de agua. La decisión, que debe ser tomada a partir de un extenso análisis coste-beneficio no debe olvidar incluir en el análisis otro tipo de parámetros que puedan ser de importancia para la empresa en cuestión.

Con todo ello, la selección final de un modelo de contador vendrá asociada al consumidor y a sus características específicas. De hecho, un contador puede ser apropiado para la empresa pero sin embargo no así para el usuario en cuestión que va a ser medido. A modo de ejemplo, se da la situación de contadores que para garantizar unas condiciones de medición es necesaria su instalación en posición horizontal, mientras que otros no pueden soportar altas presiones o incluso bajas temperaturas.

Estas y otras consideraciones van a ser tenidas en cuenta con el fin de dar respuesta a la pregunta planteada.

### 5.1 Error de medición

El rasgo característico que marca la principal diferencia entre un contador de chorro único y un contador volumétrico es la curva de error. Esta, se representa en la Figura 5.1.

De la figura se observan dos zonas claramente diferenciadas:

- La zona de caudales altos (caudales superiores a 100l/h), donde independientemente del tipo de contador, las dos curvas se mantienen constantes, con variaciones mínimas y con un error muy cercano al 0%.

## 5. Comparativa del contador volumétrico frente al contador de chorro único

- La zona de caudales bajos (caudales inferiores a 100l/h), donde la curva del contador volumétrico se mantiene estable mientras que la curva del contador de chorro único decae de manera lineal hasta un error correspondiente con su caudal de arranque.

Dado que los errores de un contador varían según el rango de medición, la cantidad de agua no registrada por un contador depende no solo de la curva de error sino también de la forma en la que los usuarios consumen agua.

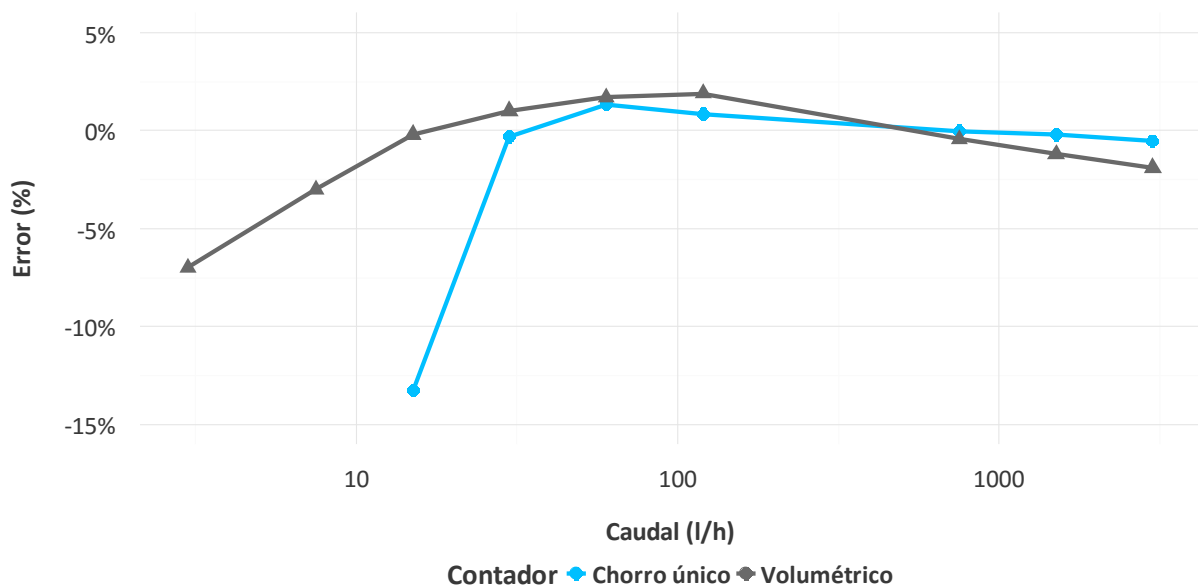


Figura 5.1. Curva de error de un contador de chorro único y un contador volumétrico (Edad: 0 años, Volumen=0m<sup>3</sup>)

Una representación visual de cómo afecta el patrón de consumo de los usuarios a las curvas de error se observa en la Figura 5.2. En ella se puede observar que en la zona donde los usuarios consumen más porcentaje de agua las curvas de error se encuentran cercanas al 0%. Sin embargo, se da la existencia de un rango inferior de caudal donde el contador de chorro único registraría menor cantidad de agua de la que realmente atraviesa el contador.

Como se ha visto en el capítulo anterior, la curva de error de un contador se va degradando con el paso del tiempo y del volumen trasegado. Si se aplica el mismo patrón de consumo anterior a un contador de chorro único y un contador volumétrico de 10 años de edad y 2000m<sup>3</sup> de volumen acumulado, el resultado sería el que muestra la Figura 5.3.

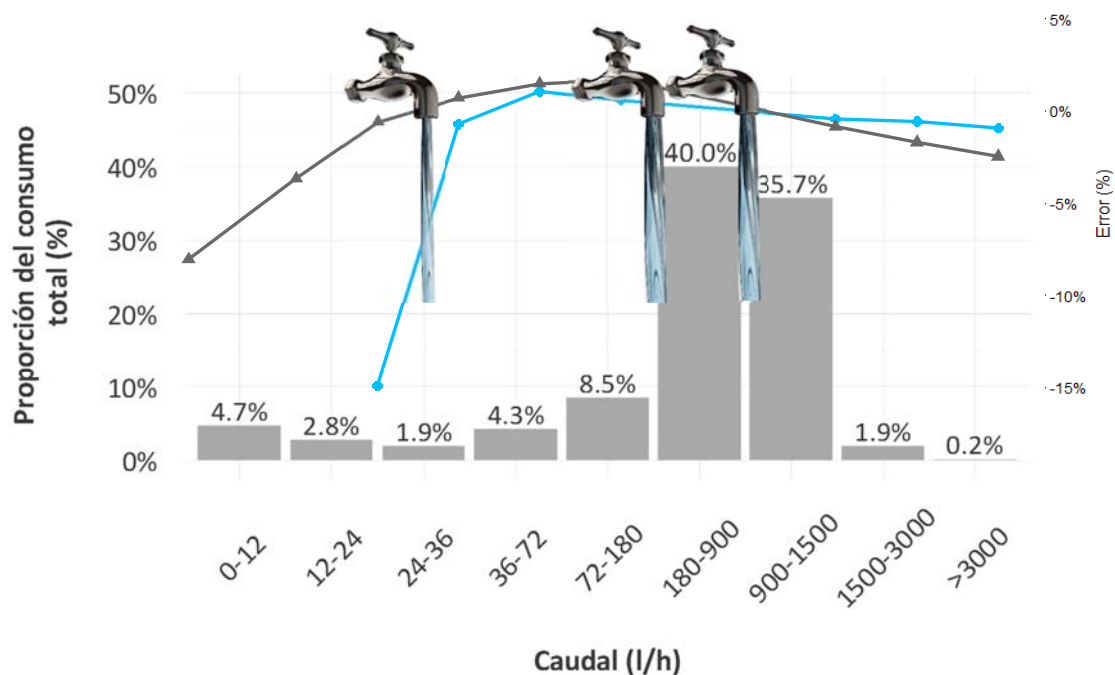


Figura 5.2. Curva de error de un contador de chorro único y un contador volumétrico (Edad: 0 años, volumen: 2000m<sup>3</sup>)

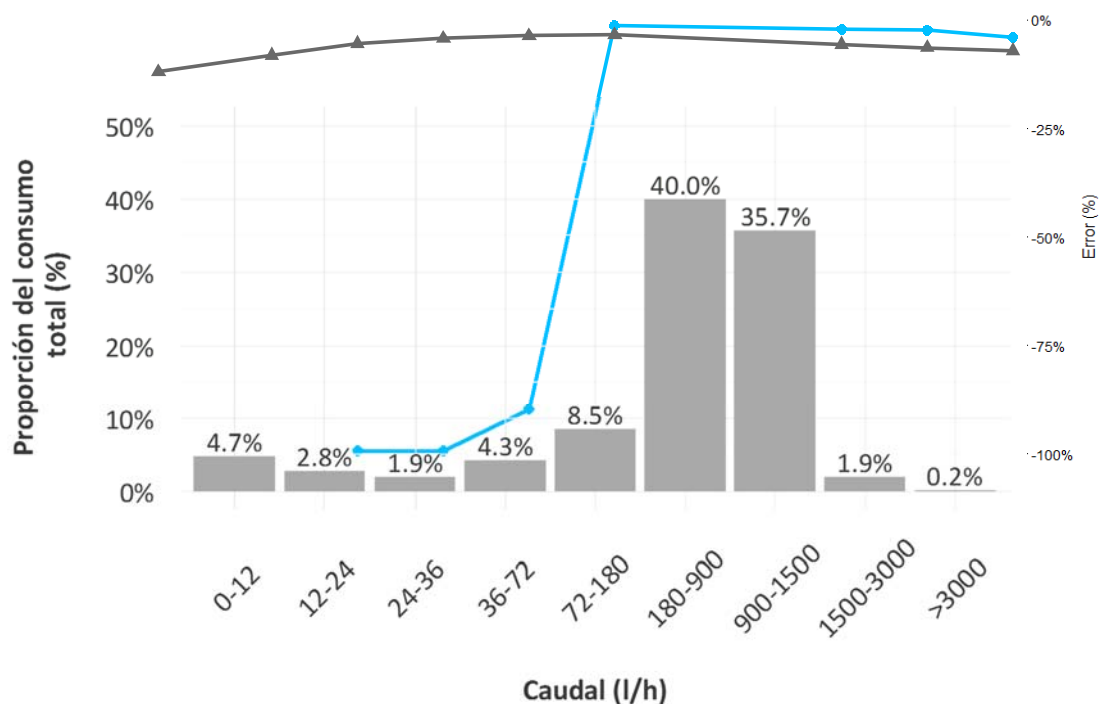


Figura 5.3. Curva de error de un contador de chorro único y un contador volumétrico (Edad: 10 años, volumen: 2000m<sup>3</sup>)

En la Figura 5.3 se observa que a partir de 100l/h las curvas mantienen un valor constante y cercano a un error del 0%. Sin embargo, para caudales inferiores a 100l/h las curvas de

## 5. Comparativa del contador volumétrico frente al contador de chorro único

error de ambos contadores se ven modificadas de manera que no son capaces de registrar una gran parte del volumen que atraviesa el contador.

Frente a la degradación de las curvas de error de los distintos tipos de contador, de (Arregui, et al., 2014) se extrae que mientras que la curva de error de un contador de chorro único puede evolucionar tanto hacia el sobrecontaje como al subcontaje, la curva de error de un contador volumétrico siempre tenderá al subcontaje, siendo la curva de error del contador recién salido de fábrica, el valor más positivo que puede tener esta curva a lo largo de toda su vida útil.

El razonamiento anterior se refleja en la Figura 5.5 donde se muestra la evolución del error de los caudales de ensayo de los modelos M2, M3 y M5 (analizados anteriormente) en función del volumen acumulado por el contador.

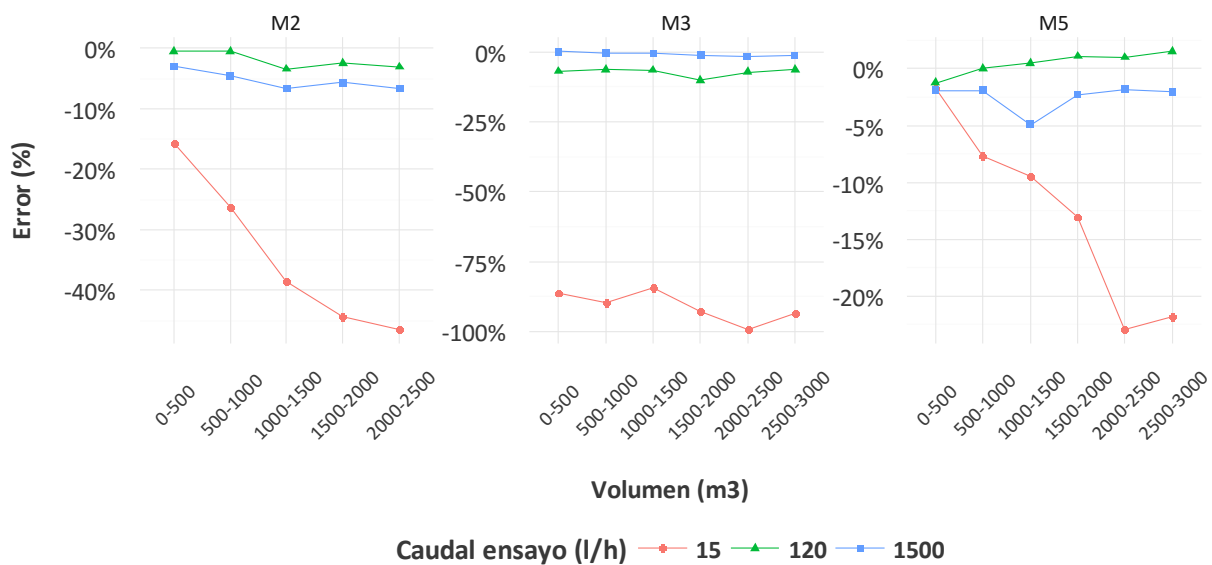


Figura 5.5. Evolución del error de los caudales de ensayos para diferentes volúmenes acumulados

De esta figura se pueden extraer varias conclusiones:

- El error de medición de los contadores volumétricos tiende hacia valores negativos.
- El error de medición a caudales bajos se ve más afectado que a caudales altos.
- A medida que aumenta el caudal, el error de medición se conserva mejor con la edad.

- La degradación del error a partir de 120l/h es muy similar.

Además, del análisis llevado a cabo en el capítulo 3 y del estudio llevado a cabo en (Arregui, et al., 2014) se pueden extraer las siguientes conclusiones respecto a los contadores volumétricos:

- Para un contador volumétrico nuevo y un patrón de consumo dado, la dispersión del error global es prácticamente despreciable. La selección de un modelo de contador debe ser llevada a cabo por parámetros alternativos más que por el error inicial del contador.
- El error global de un contador volumétrico nuevo siempre va a ser mejor que el de cualquier contador de chorro único nuevo.
- La razón por la que esta tecnología de contador no es la única en uso es debido a que los contadores volumétricos son muy sensibles a aguas de baja calidad y por tanto es más probable que queden bloqueados antes que cualquier contador de chorro único.

Este último punto es fundamental en el momento de la toma de decisiones. Además, si el porcentaje de consumo de los usuarios es alto a grandes caudales esto implicará que el contador se va a ver sometido a un volumen acumulado alto a lo largo de su vida útil. De ahí se desprende que para este tipo de usuarios probablemente sea más adecuado, tal y como indica el último punto, la instalación de un contador de chorro único, puesto que es más robusto frente a grande volúmenes.

## 5.2 Velocidad de degradación

Un cálculo similar al de este trabajo pero asociado a los contadores de chorro único se llevó a cabo en (O., et al., 2014) para los contadores de la muestra correspondiente a ese estudio. Los contadores correspondían a contadores usados, todos pertenecientes a un mismo modelo y abastecimiento y estratificados de acuerdo a su edad o volumen acumulado. El número de contadores ensayados en este proyecto fue de 820.

## 5. Comparativa del contador volumétrico frente al contador de chorro único

Una estimación adecuada se pudo llevar a cabo sobre la velocidad de degradación del error en función de la edad (Figura 5.6).y del volumen acumulado (Figura 5.7).

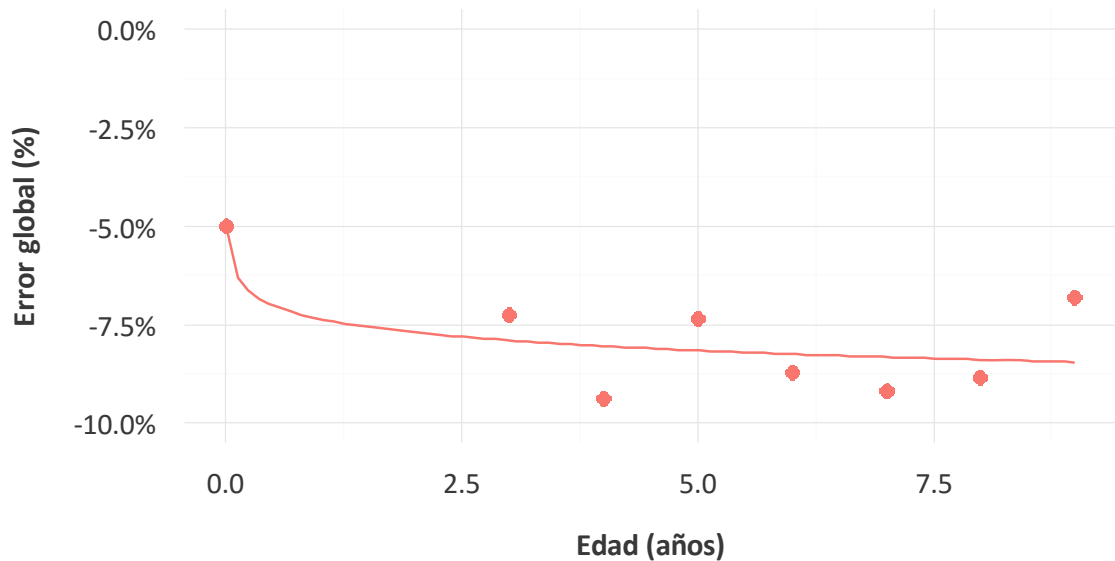


Figura 5.6. Velocidad de degradación de un contador de chorro único en función de la edad

Una afirmación típica que se suele realizar es la de asociar que el error global de contadores domésticos se degrada linealmente a partir de un valor inicial. Sin embargo, según los resultados de la Figura 5.6 la degradación de los contadores de chorro único con la edad no presenta una tendencia lineal de manera que el error evoluciona con el tiempo. De hecho, parece que hay una primera degradación inicial más rápida mientras que a medida que aumenta la edad la tendencia presenta una pendiente mucho menor.

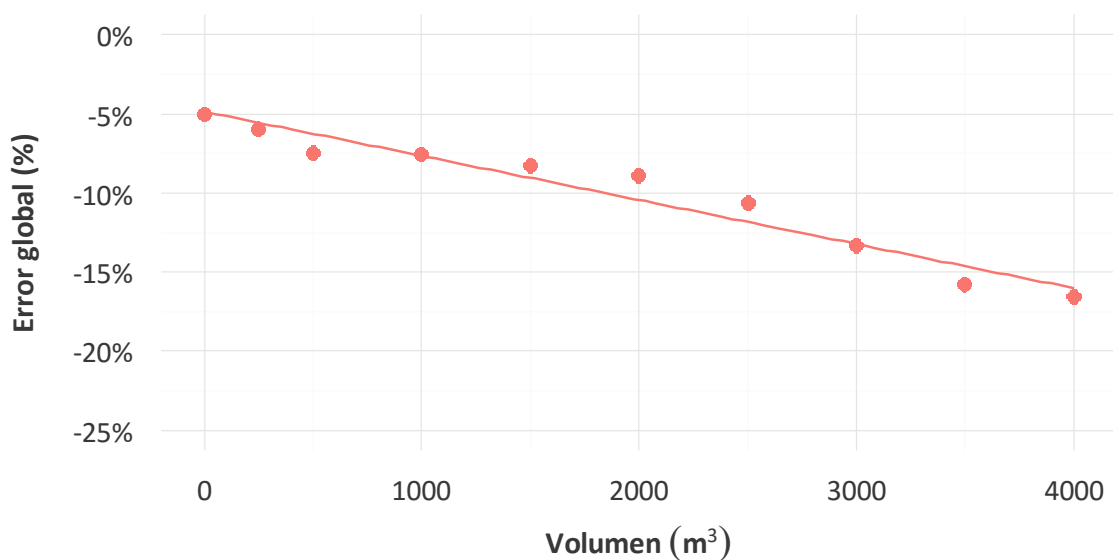


Figura 5.7. Velocidad de degradación de un contador de chorro único en función del volumen

La Figura 5.7 representa la evolución del error global en función del volumen acumulado. Cuando se observa esta figura, se debe tener en cuenta que la mayoría de contadores se engloban en edades de tres a ocho años.

Tabla 5.1. Parámetros estadísticos de la regresión simple

| Variable | Regresión   | a       | b         | R-Cuadrado | F      | P-valor |
|----------|-------------|---------|-----------|------------|--------|---------|
| Edad     | Logarítmica | -7.352% | -0.499%   | 0.57       | 8.01   | 0.03    |
| Volumen  | Lineal      | -4.861% | -0.00279% | 0.97       | 123.73 | 0.00    |

Considerando que en función de la edad el error global de la mayoría de contadores fluctúa entre -8 y -9%, si se tiene en cuenta el volumen acumulado el error comenzaría a tener efecto a partir de los 1000m<sup>3</sup>. Es decir, se produce una degradación logarítmica y a partir de este valor, el error evoluciona de manera lineal.

Las ecuaciones de los modelos son las que se muestran a continuación:

$$\varepsilon(\%) = -0.499 \cdot \log(\text{Edad}) - 7.352 \quad (5.1)$$

$$\varepsilon(\%) = -0.00279 \cdot \text{Volumen} - 4.861 \quad (5.2)$$

Con ello, los parámetros estadísticos y la ecuación obtenida tras una regresión múltiple englobando tanto la variable edad como la variable volumen acumulado es la que se muestra en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Parámetros estadísticos de la regresión múltiple

| Regresión            | a       | b       | c       | R-Cuadrado | F     | P-valor |
|----------------------|---------|---------|---------|------------|-------|---------|
| Logarítmica - Lineal | -5.697% | -0.004% | -0.002% | 0.69       | 28.98 | 0.00    |

Una vez conocida la ecuación de degradación del error global de un contador de chorro único se pueden establecer diferentes comparativas entre los modelos analizados en el capítulo 4.

$$\varepsilon(\%) = -5.697 - 0.0039 \cdot \log(\text{Edad}) - 0.0024 \cdot \text{Volumen} \quad (5.3)$$

## 5. Comparativa del contador volumétrico frente al contador de chorro único

En las siguientes figuras se muestra la representación de las ecuaciones obtenidas, tanto en el capítulo 4 como la extraída del trabajo mencionado anteriormente para un contador de chorro único.

Debido al elevado número de modelos de contador y con el fin de ver una representación clara de los valores, los gráficos se han representado en varias partes. La Figura 5.8, Figura 5.9 y Figura 5.10 muestran la degradación del contador de chorro único frente a los modelos M1, M2, M3 y M6 para un volumen acumulado de 500, 2000 y 4000m<sup>3</sup>. Por otro lado, la Figura 5.11, Figura 5.12, y Figura 5.13 muestran la degradación del contador de chorro único frente a los modelos M7, M8, M9 y M10 para los mismos volúmenes mencionados anteriormente.

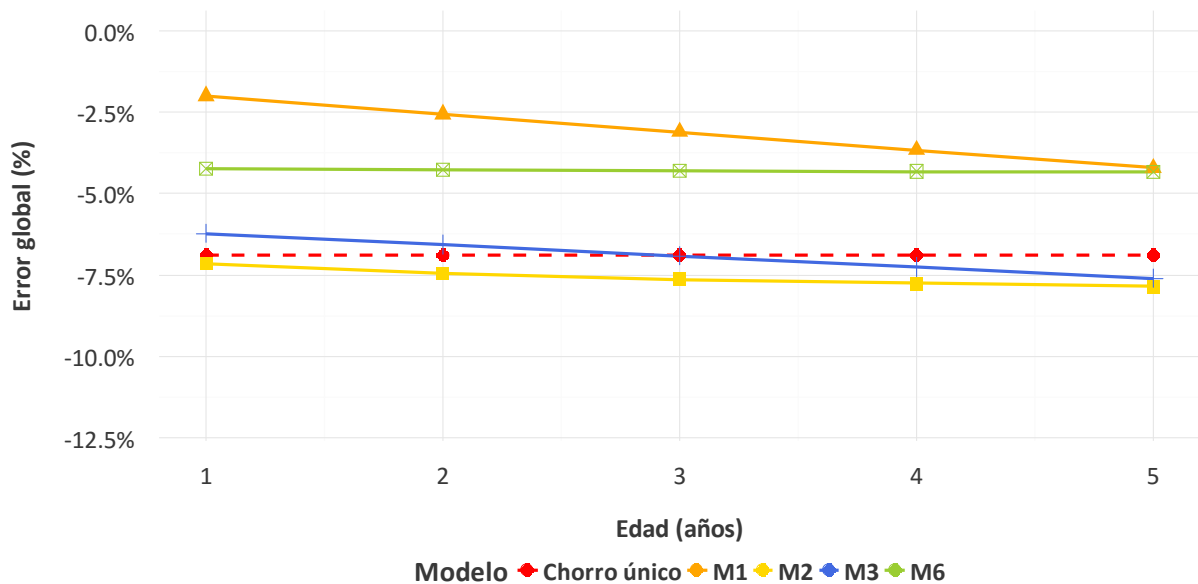


Figura 5.8. Degradación del error global en función de la edad para contadores con un volumen de 500m<sup>3</sup>

En la Figura 5.8 se observa la degradación de los diferentes modelos de contador en función de la edad y que poseen un volumen acumulado de 500m<sup>3</sup>. Esta representación únicamente se ha llevado a cabo para los primeros cinco años pues no tendría gran sentido encontrar un contador que con 500m<sup>3</sup> de volumen tuviera más de cinco años.

En el modelo M2 se observa la degradación logarítmica para los primeros años a la que se ve sometido el contador. El contador de chorro único, pese a que comienza con un error



más negativo que el resto de contadores, se estabiliza con el paso del tiempo, llegando a tomar mejores valores que los modelos M2 y M3 con el paso del tiempo.

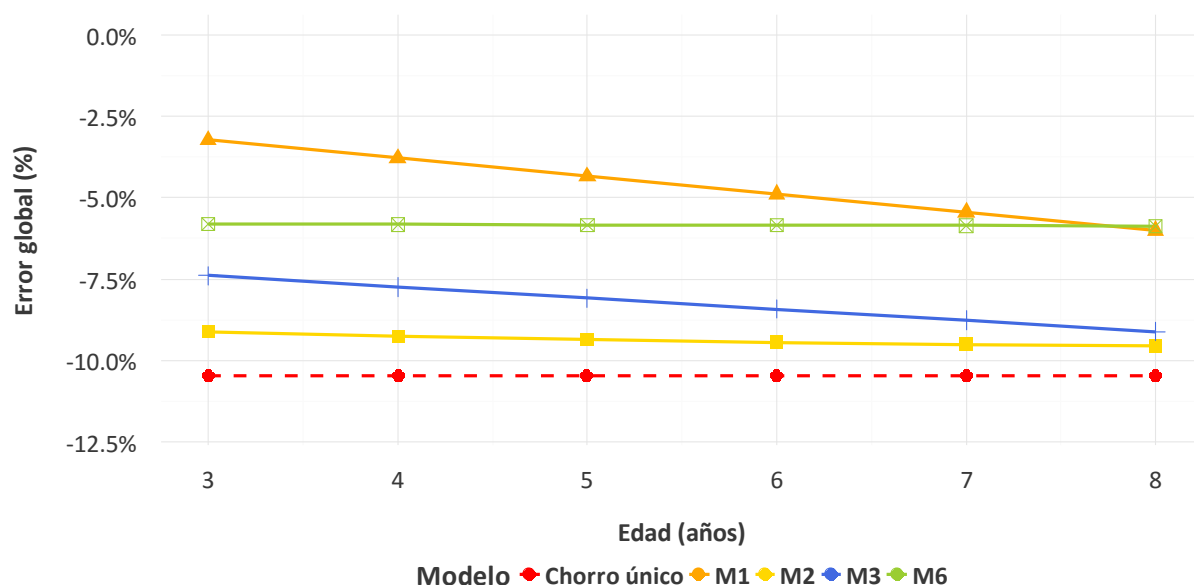


Figura 5.9. Degradación del error global en función de la edad para contadores con un volumen de 2000m<sup>3</sup>

Para un volumen de 2000m<sup>3</sup> se observan diferencias más aparentes entre los diferentes modelos. El modelo M1 sigue mostrando valores bastante aceptables llegando a tener un error del -7% para 8 años de edad, así como para el modelo M6.

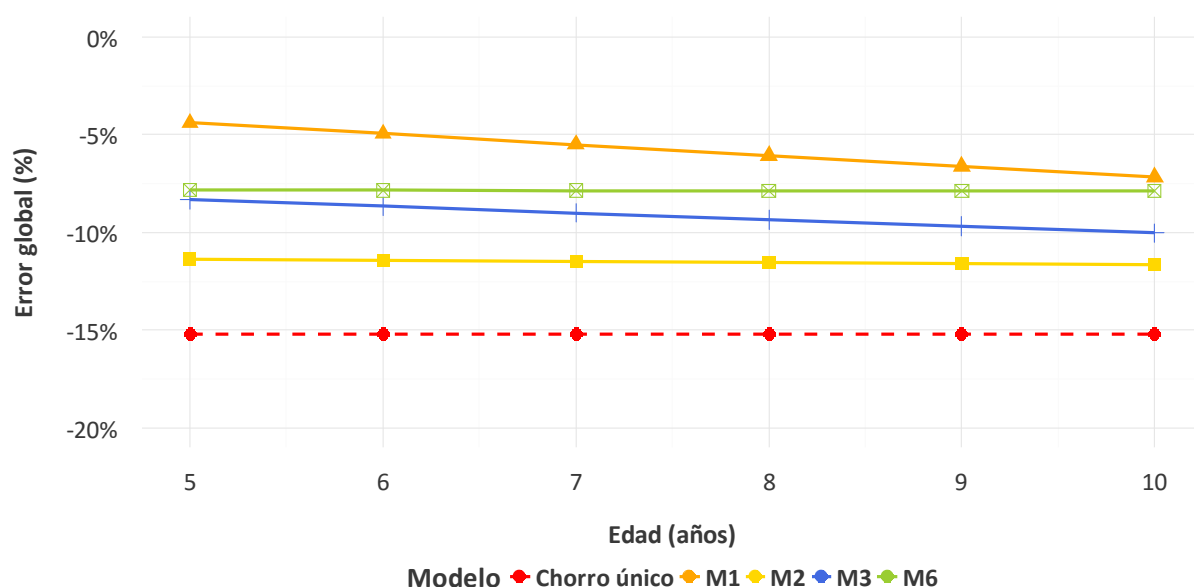


Figura 5.10. Degradación del error global en función de la edad para contadores con un volumen de 4000m<sup>3</sup>

## 5. Comparativa del contador volumétrico frente al contador de chorro único

Por otra parte, los modelos M2 y M3 acusan más el volumen acumulado y el paso de los años llegando a marcar valores muy similares al contador de chorro único.

Por último, para 4000m<sup>3</sup>, los contadores siguen su degradación llegando a marcar valores de -8% de error para los valores de M1 y M6 y -10 y -12% para los modelos M2 y M3. Por su parte, el contador de chorro único alcanza un valor de -15%, un valor nada interesante para las empresas de abastecimiento las cuales suelen fijar un límite de alrededor del -10, -12% para optar por la renovación del contador. Es interesante recordar que un error del -15% implicaría que de cada 100 litros que pasa por el contador, este estaría dejando de registrar 15 litros.

Por lo que respecta al resto de modelos, estos se encuentran representados en las siguientes figuras.

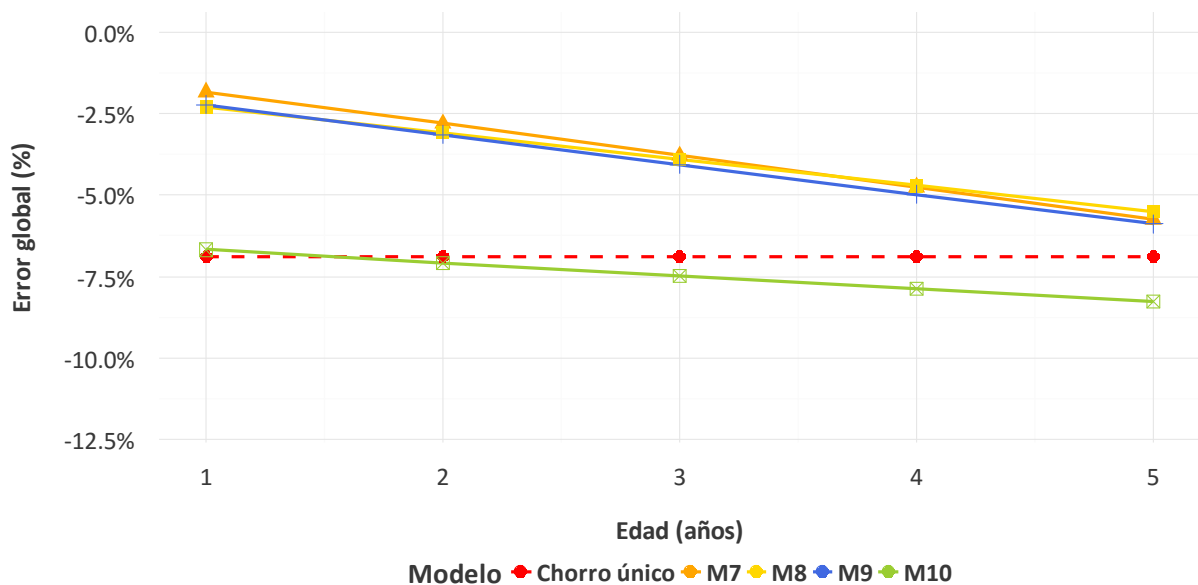


Figura 5.11. Degradación del error global en función de la edad para un contador con volumen de 500m<sup>3</sup>

En la Figura 5.11 se observa que los modelos M7, M8 y M9 presentan una degradación del error global muy similar con una pendiente bastante acusada, llegando a un error del -5.5% para una edad de 5 años. Por otro lado, el modelo M10 presenta una menor pendiente que el resto de modelos pero peores valores de error.

A medida que aumenta el volumen acumulado, y a diferencia del resto de modelos, las diferencias son menores llegando a alcanzar todos los modelos un error cercano al -10% para una edad de 8 años y un volumen acumulado de 2000m<sup>3</sup>.

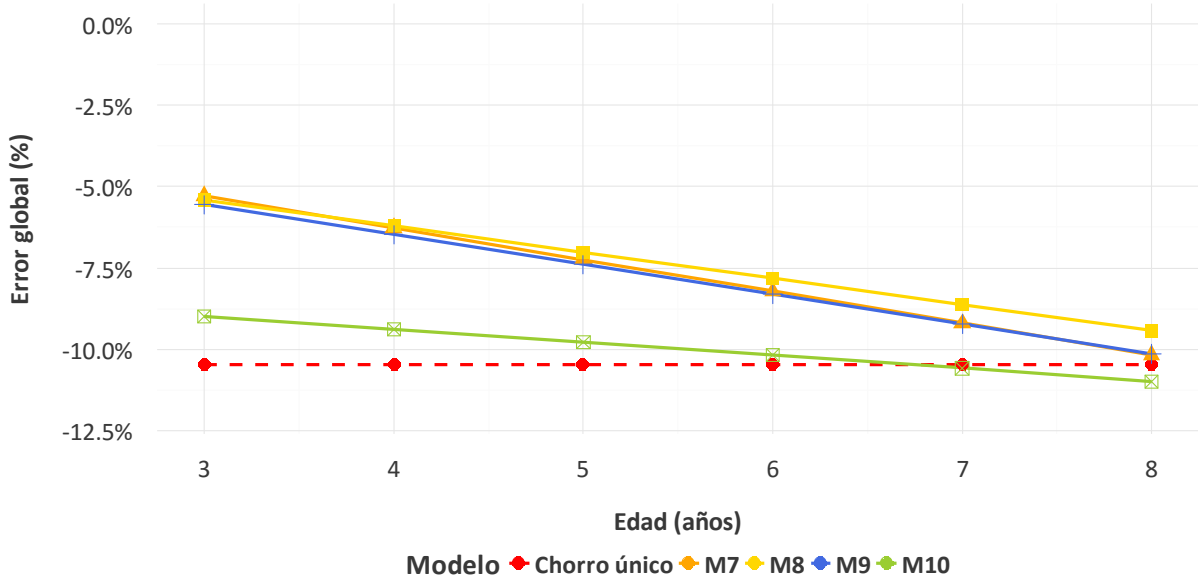


Figura 5.12. Degradación del error global en función de la edad para un contador con volumen de 2000m<sup>3</sup>

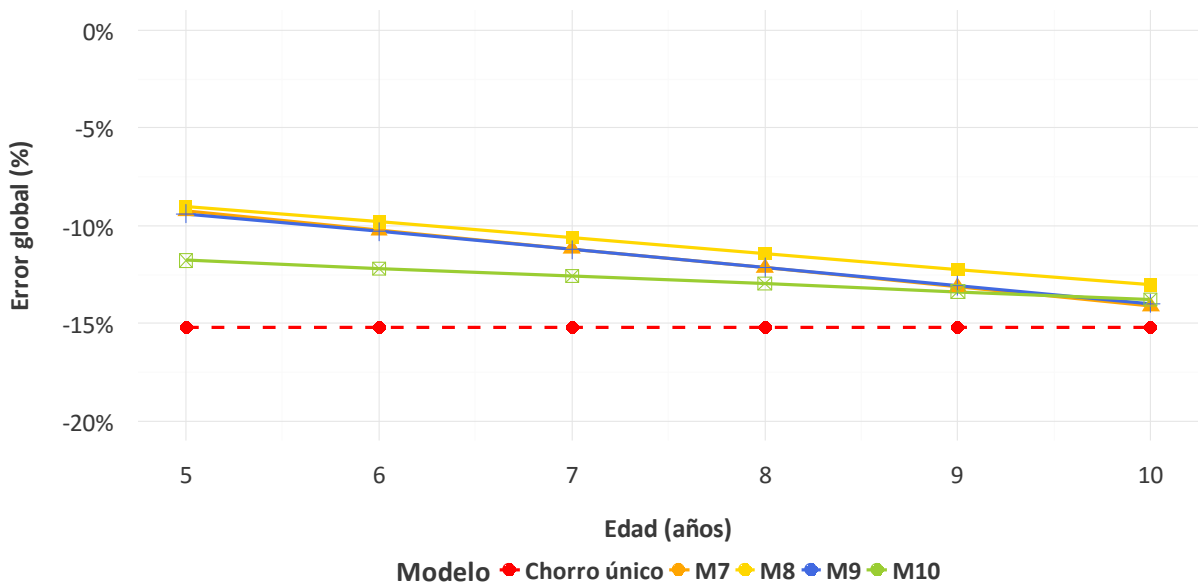


Figura 5.13. Degradación del error global en función de la edad para un contador con volumen de 4000m<sup>3</sup>

Por último, para un volumen acumulado del contador de 4000m<sup>3</sup> los valores son más similares. De hecho, mientras que para 500 m<sup>3</sup> la diferencia entre el modelo M10 y el resto de modelos era de más de un 5% del error, para volúmenes altos, esta diferencia se acorta

en gran medida. Para una edad de 10 años, los valores de error se sitúan alrededor del -15% para todos los modelos.

### 5.3 Estudio económico

Una vez determinada la velocidad de degradación de los diferentes modelos de contador, la pregunta es “¿Cuándo debería reemplazar el contador?”, “¿Vale la pena adquirir un contador que muestre un mejor valor de error global independientemente de su precio?”

La respuesta a estas preguntas no es sencilla. La afirmación de que el envejecimiento hace que los contadores se vuelvan menos precisos lleva a la hipótesis de que la pérdida de ingresos es debida a que el consumo de agua no se registra de manera perfecta. Sin embargo, reemplazar contadores que todavía proporcionan lecturas precisas es una pérdida de recursos y una carga económica adicional para la empresa de abastecimiento.

Entre ambos enfoques, existe un punto que justifica económicamente el periodo óptimo del contador. El objetivo principal de este punto es tratar de proporcionar un valor de renovación para los diferentes modelos de contador en función de su tasa de degradación del error.

#### 5.3.1 Consideraciones generales

Antes del cálculo de la frecuencia óptima de renovación es importante conocer los factores que envuelven el modelo económico usado para obtener el periodo óptimo de renovación de un contador.

- *Costes iniciales*: que incluye el coste de adquisición de un contador, el coste de instalación y el coste administrativo, relacionado con el reemplazo del contador. A diferencia de los costes debidos a agua no registrada, los costes iniciales se desembolsan cuando se compran e instalan los contadores.
- *Costes distribuidos*: las pérdidas monetarias sufridas por la empresa de abastecimiento son proporcionales al volumen de agua no registrada y al precio de

venta del agua. Una de las principales causas del agua no registrada es la imprecisión en los contadores. Estos errores de medición, de diferente magnitud dependiendo de la tecnología del contador, están presentes desde el momento de la instalación del contador, es por ello que los costes del agua no registrada deben estar presentes a lo largo de toda la vida útil del contador.

- *Curva de error del contador:* como se ha visto en los anteriores capítulos, los errores de medición dependen de los caudales a los que se consume agua y están definidos por la curva de error de un contador. Dado que los errores varían a lo largo de un rango de medición, la cantidad de agua no registrada por un contador depende no solo de la forma de la curva de error sino también de la forma en la que los usuarios consumen agua. Ambos parámetros necesitan ser combinados para calcular el error global de un contador.
- *Perfil de consumo del usuario:* el consumo de agua de un usuario, expresado como un porcentaje del volumen total, es representado frente al caudal al que este volumen es consumido.
- *Error global:* La importancia del error de un contador a un caudal dado dependerá de cuánta agua es consumida a ese caudal específico. Si el volumen de agua consumido a cierto caudal es pequeño, su importancia será menor que si el volumen consumido es mayor. Con el objetivo de tener en cuenta esto, el error global de un contador se define como el error combinado a diferentes caudales considerando el porcentaje de agua que se consume a cada caudal.
- *Precio de venta del agua:* es la estructura necesaria para poder transformar el volumen de agua no registrada en costes distribuidos. Resulta fundamental a la hora de evaluar los costes o ingresos que genera un contador.
- *Tasa de actualización:* con el fin de evaluar de manera adecuada el coste total del agua no registrada, las pérdidas económicas futuras deben actualizarse a un valor actual. Para esa conversión, la tasa de actualización nominal,  $r$ , es empleada. En este proyecto, con el fin de corregir el efecto de la inflación,  $s$ , la tasa de actualización real,  $r'$ , será considerada, en lugar de la tasa de actualización nominal.

$$r' = \frac{1+r}{1+s} - 1 \quad (5.4)$$

Los contadores de agua constituyen una inversión de renovación o reemplazo. Esto es, que a final de su vida útil, los contadores son una inversión que deben reemplazarse para que la empresa pueda continuar su actividad. Para ello, uno de los procedimientos más utilizados para la selección de bienes de equipo es el Valor Actual Neto.

Para el cálculo del VAN debe obtenerse el número de flujos de caja futuros originados por la inversión. Posteriormente, se actualizan todos los flujos de caja futuros al año inicial de la inversión y se suman. Es evidente que a esta suma se le debe descontar el desembolso inicial de la inversión de manera que si el resultado final es positivo, esto es señal de que el proyecto es una inversión realizable. Sin embargo, si el resultado final es negativo, el proyecto debería desestimarse.

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversas metodologías para este cálculo, destacando entre ellas las de Allender (1996), Arregui (1999), Male et al. (1985), Planells et al. (1987), Taborda y Anunciação (1997), Yee (1999). El cálculo de este capítulo está basado en la metodología propuesta en (Arregui, et al., 2007). En todos los casos, los modelos propuestos se basan en evaluar el coste total que supone el instrumento de medida a la empresa de abastecimiento durante su vida útil.

En el caso en el que se opte por analizar los ingresos que aporta cada contador, el planteamiento sería el siguiente:

$$\text{Ingresos} = -C_{\text{compra}} - C_{\text{inst}} - C_{\text{adm}} + \sum_{i=1}^n V_i \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \frac{C_{\text{agua}}}{(1+r')^{(i-1)}} \quad (5.5)$$

Donde

- $C_{\text{agua}}$ : precio de venta del agua
- $V_i$ : volumen promedio consumido por un usuario típico en el año  $i$
- $\varepsilon_i$ : error de medición promedio en el año  $i$
- $r'$ : tasa de actualización real

La primera parte abarca los costes de compra, instalación y gastos administrativos y de mantenimiento de los contadores. Por lo que respecta a los contadores domésticos, debido a que poseen un diámetro pequeño, su mantenimiento es prácticamente nulo, por lo que se puede simplificar el problema a los tres costes mostrados en la Ecuación (5.5).

La segunda parte de la ecuación abarca los ingresos debido al agua consumida por el usuario pero no contabilizada debido a errores de medición. Los costes correspondientes a este concepto, al ocurrir en un espacio temporal prolongado, deben corregirse con la tasa de actualización real para poder trasladarlos al presente.

Para las empresas de abastecimiento, la gran dificultad de la ecuación anteriormente planteada radica en conocer la evolución del error global para poder de esta manera obtener los ingresos generados por cada modelo en función del tiempo que llevan instalados.

Para el cálculo del VAN se pueden dar dos situaciones:

- Frecuencia de renovación fija: en el caso de que debido a un reglamento de servicios, o a cualquier otra normativa, la frecuencia de renovación venga fijada de antemano, el modelo de contador a seleccionar será aquel que maximice los ingresos para las restricciones fijadas.
- Frecuencia de renovación no fija: en el caso de que no se dé la existencia de ningún reglamento que exija una renovación en el parque de contadores, la vida útil de un contador será aquella que reporte el mayor beneficio a la empresa de abastecimiento.

A modo de ejemplo, los parámetros que definen un abastecimiento son los siguientes:

*Tabla 5.3. Parámetros para definir el modelo económico de un abastecimiento*

|  |      |
|--|------|
| <i>Consumo medio anual por usuario (m<sup>3</sup>)</i> | 120  |
| <i>Tasa de actualización nominal (%)</i>               | 5    |
| <i>Inflación (%)</i>                                   | 2    |
| <i>Tasa de actualización real (%)</i>                  | 2.90 |
| <i>Precio del agua (€/m<sup>3</sup>)</i>               | 1.5  |

### 5.3.2 Frecuencia de renovación fija

En el caso de que la frecuencia de renovación esté fijada de antemano, la elección del contador más adecuado radica únicamente en aquel que maximice la ecuación definida anteriormente, es decir, que maximice los ingresos para las restricciones fijadas. Para ello, a modo de ejemplo, se toman los valores mostrados en la Tabla 5.4.

*Tabla 5.4. Opciones para los diferentes modelos de contador*

|                                   | <i>Chorro único</i> | <i>M1-M12</i> |
|-----------------------------------|---------------------|---------------|
| <i>Precio compra (€)</i>          | 15                  | 25            |
| <i>Coste instalación (€)</i>      | 12                  | 12            |
| <i>Gastos administrativos (€)</i> | 3                   | 3             |

Mientras que para un contador de chorro único, los costes iniciales suponen un valor de 30€, para los contadores volumétricos ensayados estos suponen un valor de 40€, es decir, 10€ más por cada contador.

A raíz de las ecuaciones obtenidas en el capítulo 4 y de la ecuación (5.5) se obtiene el Valor Actual Neto total de los ingresos tanto para el contador de chorro único como para los modelos analizados. El resultado del cálculo se muestra en la Tabla 5.5.

*Tabla 5.5. Valor Actual Neto y error global para diferentes modelos de contador*

|                     | <i>VAN (€)</i> | <i>Error (%)</i> |
|---------------------|----------------|------------------|
| <i>Chorro único</i> | 1424.00        | -8.58%           |
| <i>M1</i>           | 1460.00        | -7.07%           |
| <i>M2</i>           | 1402.82        | -8.86%           |
| <i>M3</i>           | 1407.59        | -9.62%           |
| <i>M6</i>           | 1455.81        | -5.08%           |
| <i>M7</i>           | 1436.55        | -11.32%          |
| <i>M8</i>           | 1439.56        | -10.24%          |
| <i>M9</i>           | 1433.98        | -11.18%          |
| <i>M10</i>          | 1395.03        | -10.98%          |

En ella se muestra el Valor Actual Neto para cada modelo de contador para un periodo de renovación fijo de diez años. Además, también se muestra el error global que poseería el contador para una degradación de 10 años y un volumen acumulado de 1200m<sup>3</sup> (se considera un consumo constante durante los diez años de 120m<sup>3</sup> anuales).



En la Tabla 5.5 se observa que para un periodo de renovación de diez años el modelo que proporciona mayores beneficios es el modelo M1, seguido del modelo M6. Además, el modelo M6 es el que menor valor de error presenta (-5.08%) mientras que los modelos con peor error son el M7 (-11.32%) y M9 (-11.18%), debido a la acusada pendiente que marca su recta de regresión. Por su parte, el modelo M10 sería aquel que presenta menores beneficios para la empresa.

A pesar de los valores que se muestran en la tabla, es importante hacer hincapié en el precio del agua, que corresponde a 1.5€/m<sup>3</sup>. Sin embargo, este valor no es el valor que marca la empresa de abastecimiento puesto que realmente el 80% de este precio corresponde a impuestos destinados a otro tipo de acciones. Es por ello que si en lugar de considerar este precio del agua se considerara un precio de 0.3€/m<sup>3</sup> que correspondería con el valor del beneficio real de la empresa de abastecimiento, el resultado que se muestra en la Tabla 5.6 es diferente al anterior.

*Tabla 5.6. Valor Actual Neto y error global para diferentes modelos de contador y un precio del agua de 0.3€/m<sup>3</sup>*

|                     | VAN (€) | Error (%) |
|---------------------|---------|-----------|
| <i>Chorro único</i> | 260.74  | -8.58%    |
| <i>M1</i>           | 260.00  | -7.07%    |
| <i>M2</i>           | 248.56  | -8.86%    |
| <i>M3</i>           | 249.52  | -9.62%    |
| <i>M6</i>           | 259.16  | -5.08%    |
| <i>M7</i>           | 255.31  | -11.32%   |
| <i>M8</i>           | 255.91  | -10.24%   |
| <i>M9</i>           | 254.80  | -11.18%   |
| <i>M10</i>          | 247.01  | -10.98%   |

De los resultados de la tabla anterior se pueden extraer varias conclusiones.

- El error de un contador a los diez años de vida útil con un volumen constante de 120m<sup>3</sup> por año posee un error global alrededor del -10%. A pesar de esto, algunos modelos presentan mejor valores de error como es el caso del modelo M6.

## 5. Comparativa del contador volumétrico frente al contador de chorro único

---

- No siempre el contador volumétrico va a arrojar mejores valores de error que el contador de chorro único. De hecho, para volúmenes acumulados mayores, el contador de chorro único presenta mejores resultados.
- Si disminuye el coste del agua, disminuye la importancia de las pérdidas debidas al volumen de agua no registrado y el contador de chorro único gana importancia.
- Si la frecuencia de renovación está fijada de antemano y el coste del agua es bajo, los beneficios en un contador volumétrico son, de media, inferiores a los beneficios en un contador de chorro único, ya que la inversión inicial en un contador volumétrico es mayor.

La elección del contador más adecuado depende de diversos factores pero uno de los principales corresponde con el precio del metro cúbico. En cualquier caso, una vez calculado el VAN para cada modelo de contador en el periodo de tiempo establecido, se selecciona aquel que mayores beneficios proporciona.

Es importante destacar una vez más que no se han representado los modelos M4, M5, M11 y M12 debido a que los resultados arrojados por las regresiones eran valores que carecían de sentido y donde haría falta un mayor número de muestra para analizar estos modelos.

Por último, y acorde al capítulo 2.3 Normativa y legislación, es digno de mención que el RD 889/2006 se ha visto derogado por el RD 244/2016. El borrador de este RD marcaba ciertos parámetros relacionados con la verificación de contadores en uso, asociando una frecuencia de renovación según marca la Tabla 5.7.

*Tabla 5.7. Frecuencia de renovación según el tipo de contador acorde al RD 244/2016*

| <i>Frecuencia de renovación</i> | <i>Tipo de contador</i>              |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| 8 años                          | Mecánico                             |
| 10 años                         | Mecánico con totalizador electrónico |
| 12 años                         | Electrónico                          |

Ya se ha visto en el modelo económico obtenido anteriormente que para una frecuencia de renovación de 10 años y con un precio del agua alrededor de 0.3€/m<sup>3</sup> se reportan

mayores beneficios con un contador de chorro único debido a su degradación y menor coste de compra. Es por ello, que si esta renovación se reduce a ocho años, tendría menos sentido aún recurrir a un contador volumétrico puesto que este contador no se amortizaría en ningún caso.

Además, observando la evolución del error de un contador de chorro único, donde el error comienza una degradación más acusada los primeros años y se mantiene estable para el resto del tiempo, la vida útil del contador de chorro único podría alargarse incluso a los 12 años.

A pesar de esto, el borrador no quedó en más que eso, y el RD 244/2016 no incluye estas exigencias relativas a la frecuencia de renovación.

### 5.3.3 Frecuencia de renovación no fija

Si la frecuencia de renovación no está fijada de antemano la vida útil del contador queda definida como aquella que mayores beneficios suponga a la empresa de abastecimiento. Por ello, para determinar el tiempo que puede seguir en servicio un determinado modelo de contador no es válido el cálculo del Valor Actual Neto simple ya que se ha de tener en cuenta que existen diversas opciones con diferentes vidas útiles. En este caso, se recurre a la aproximación del VAN de una Cadena de Renovaciones (VANC).

$$\begin{aligned}
 VANC &= VAN + \frac{VAN}{(1+r')^n} + \frac{VAN}{(1+r')^{2n}} + \frac{VAN}{(1+r')^{3n}} + \dots = \\
 &= VAN \cdot \left[ 1 + \frac{1}{(1+r')^n} + \frac{1}{(1+r')^{2n}} + \frac{1}{(1+r')^{3n}} + \dots \right] \\
 & \qquad \qquad \qquad (5.6) \\
 VANC &= \frac{(1+r')^n}{(1+r')^n - 1} \cdot VAN = m \cdot VAN
 \end{aligned}$$

Este procedimiento se encuentra descrito en (Arregui, et al., 2007) y consiste en obtener el VAN correspondiente a una sucesión infinita de renovaciones. Esta sucesión de

## 5. Comparativa del contador volumétrico frente al contador de chorro único

renovaciones se puede obtener matemáticamente a partir de la Ecuación (5.6), donde  $r'$  es la tasa de actualización real y  $n$  el periodo de renovación de los contadores.

Con dicha ecuación se calcula el VANC que corresponde a los ingresos que genera el contador y donde la frecuencia óptima de renovación será aquella que proporcione el mayor VANC. La Tabla 5.8 muestra, para un precio del agua de  $0.3\text{€/m}^3$ , los diferentes valores del VANC y de la frecuencia óptima de renovación de los diferentes modelos.

Desde un punto de vista económico, el modelo de contador que más beneficios podría generar en un abastecimiento sería el modelo M6. A pesar de esto, su frecuencia óptima de renovación, la cual maximizaría los ingresos, no resultaría razonable puesto que no es conveniente desde el punto de vista de la gestión mantener un contador instalado durante 30 años. Si esto se llevara a cabo, se encontraría un número muy elevado de contadores parados.

Tabla 5.8. VANC y Frecuencia Óptima de Renovación para los diferentes modelos de contador

|                     | VANC (€) | FOR |
|---------------------|----------|-----|
| <i>Chorro único</i> | 1077.27  | 27  |
| M1                  | 1074.93  | 22  |
| M2                  | 1061.87  | 30  |
| M3                  | 1045.44  | 28  |
| M6                  | 1108.25  | 30  |
| M7                  | 1034.73  | 16  |
| M8                  | 1042.19  | 17  |
| M9                  | 1034.29  | 16  |
| M10                 | 1025.63  | 23  |

Por otro lado, los modelos que maximizan el Valor Actual Neto para un periodo de 16 años son los modelos M7 y M9 y 17 años para el modelo M8, siendo los modelos con menor frecuencia de renovación.

Para el caso del contador de chorro único, la frecuencia de renovación debería alargarse a los 27 años para producir mayores beneficios.

Por otro lado, si se considerara un aumento del precio del agua, de nuevo a 1.5€/m<sup>3</sup>, los resultados serían los que arroja la Tabla 5.9.

*Tabla 5.9. VANC y Frecuencia Óptima de Renovación para los diferentes modelos de contador*

|                     | VANC (€) | FOR |
|---------------------|----------|-----|
| <i>Chorro único</i> | 5701.10  | 9   |
| <i>M1</i>           | 5857.07  | 8   |
| <i>M2</i>           | 5591.29  | 30  |
| <i>M3</i>           | 5635.97  | 10  |
| <i>M6</i>           | 5823.17  | 30  |
| <i>M7</i>           | 5819.87  | 6   |
| <i>M8</i>           | 5809.58  | 7   |
| <i>M9</i>           | 5801.43  | 6   |
| <i>M10</i>          | 5590.77  | 9   |

El hecho de aumentar el precio del agua da lugar a un claro aumento de los beneficios en todos los modelos y por tanto unas menores frecuencias óptimas de renovación. De nuevo, los modelos M7, M8 y M9 son los que alcanzan los beneficios en un periodo de tiempo menor.

Los modelos M2 y M6, debido a la tasa de degradación de su error global, no ven afectados prácticamente su frecuencia óptima de renovación, resultado, que como se ha indicado anteriormente, no tendría mucho sentido desde el punto de vista de la gestión de un parque de contadores.

Es importante destacar que mientras que para una frecuencia de renovación fija los beneficios en un contador de chorro único dan lugar a un mayor valor que para los contadores volumétricos, en el caso de una frecuencia de renovación no fijada previamente, no sucede igual y no es el contador de chorro único del cual se obtienen los mayores beneficios.

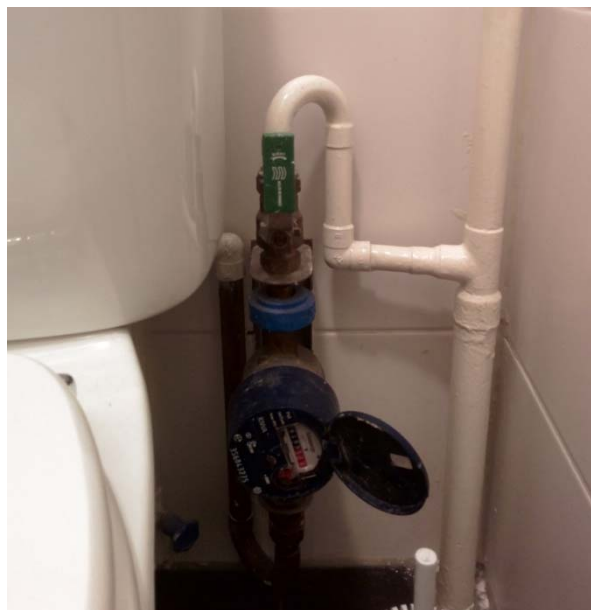
A pesar de esto, los VANC de los contadores volumétricos se obtienen para frecuencias de edad elevadas, donde es posible que el contador volumétrico pueda ver modificado su comportamiento ya que, como se ha visto, este tipo de contador no trabaja bien para grandes volúmenes acumulados.

## 5.4 Otras consideraciones

### 5.4.1 Ruido

Uno de los motivos de queja de muchos usuarios sobre algunos modelos de contador volumétrico es el ruido que los contadores producen cuando circula agua por la conducción a caudales altos. Este ruido, provocado por el pistón al golpear en las paredes de la cámara de medición, se ve agravado si el caudal circulante supera los 1000l/h.

Pese a que la mayoría de contadores se encuentran instalados en las plantas bajas de los edificios y en el cuarto correspondiente a tal fin, no es despreciable el número de viviendas que posee el contador dentro de casa, en la entrada o en un cuarto de baño.



*Figura 5.14. Contador volumétrico instalado en el interior de una vivienda*

La mejora en los materiales de fabricación y calidades de acabado es un factor donde los fabricantes han incidido mucho en los últimos años para hacer frente a las quejas planteadas por los usuarios.

En cuanto a los contadores de chorro único, debido a que la turbina no golpea ninguna parte fija de la carcasa del contador (o al menos no debería), el ruido que se genera prácticamente es mínimo y únicamente asociado al paso de agua a grandes caudales.

#### 5.4.2 Sensibilidad a la calidad del agua

Los contadores de chorro único poseen una buena resistencia a los sólidos en suspensión en general. De hecho, son instrumentos que se utilizan de manera frecuente para aguas duras o para aguas que posean una gran cantidad de partículas en suspensión.



*Figura 5.15. Obstrucción parcial del filtro de un contador de chorro único (izquierda), filtro en un contador volumétrico (derecha) y pistón de un contador volumétrico (centro)*

A medio plazo se pueden producir acumulaciones de cal que hagan aumentar el par de giro de la turbina y bloqueen dicho giro temporalmente, hasta que algún transitorio provoque esfuerzos que la libere. También se puede producir una obturación parcial o total del filtro que dé lugar a errores en la medición. Estos efectos tienen su repercusión más directa en los caudales bajos puesto que es donde tendrá una mayor influencia el aumento del par de giro de la turbina.

Por otro lado, muchas empresas de abastecimiento son todavía reacias a la instalación de contadores volumétricos debido a que las partículas en suspensión que arrastra el agua pueden alterar notablemente la curva de error de dichos contadores.

La instalación de filtros es una acción prácticamente obligatoria para la fabricación de estos contadores pero esto puede no llegar a ser suficiente. Con todo esto, los filtros requieren un mantenimiento adecuado, del cual se desprenden una serie de gastos asociados mayores que el de otros tipos de contador.

### 5.4.3 Sensibilidad a la distorsión del flujo

Es importante tener en cuenta que los contadores de chorro único son contadores de velocidad. Esto implica que su perfil de velocidades puede verse distorsionado y con ello, se pueden producir alteraciones en su curva de error. La instalación de una válvula o incluso de un codo aguas arriba podría modificar dicho error.

A pesar de esto, la metrología no se ve afectada por este efecto de manera apreciable debido a dos motivos:

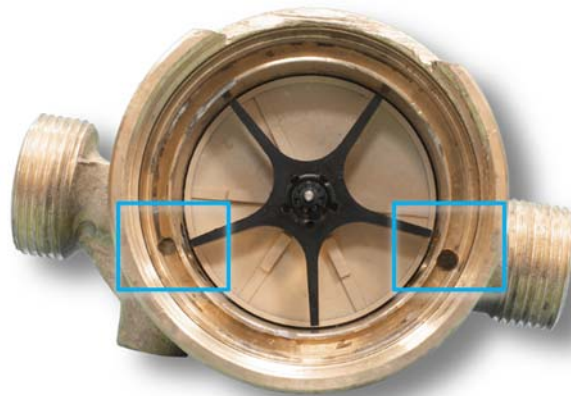
- La tobera de entrada a la cámara de la turbina tiene una forma ligeramente convergente. Con ello se consigue acelerar el flujo y regularizar el perfil de velocidades antes de entrar a la cámara de medición.
- De una manera u otra, los contadores de chorro único distorsionan el perfil de velocidades en la entrada del contador por cambios de dirección y sección de paso. Dichas alteraciones en el flujo permiten que perturbaciones anteriores no tengan un efecto importante sobre la curva de error (Arregui, et al., 2007).

Por otro lado, debido al funcionamiento de los contadores volumétricos, estos no muestran ningún tipo de variación al perfil de velocidades y por tanto la instalación de elementos perturbadores aguas arriba del contador no tiene ninguna influencia sobre su curva de error.



#### 5.4.4 Uniformidad en la calidad de fabricación

Una parte esencial de la fabricación de los contadores de chorro único pasa por la calibración de la curva de error de los contadores. Esta puede realizarse de dos formas diferentes. Por un lado, mediante pestañas situadas en la parte superior de la cámara de la turbina, de esta manera su error a penas se desplaza hacia valores positivos. Por otro, mediante un circuito en paralelo (donde el agua que entra al cuerpo del contador puede continuar o por la cámara de medición o por una derivación) con el riesgo de que dicho circuito se obture de manera que los errores a caudales medios y altos se trasladen a la zona de sobrecontaje (puesto que el volumen registrado por el circuito en paralelo comienza a registrarla la turbina). A caudales bajos, la regulación mediante un circuito en by-pass está sometido a errores de subcontaje debido al aumento del par resistente que produce el desgaste de las piezas móviles, sin embargo, la obstrucción del by-pass provoca un mayor paso de cuadal por la turbina, desplazando la curva de error hacia la zona de errores positivos. En cualquier caso, el ajuste de la curva de error va a introducir cierto error (ya sea mayor o menor) en este tipo de contadores.



*Figura 5.16. Carcasa de un contador de chorro único con circuito en derivación (Arregui, et al., 2007)*

Los contadores volumétricos, debido a su funcionamiento (llenado y vaciado de una cámara de volumen conocido) no poseen el problema de los contadores de chorro único puesto que la exactitud de este tipo de contadores depende de los ajustes entre la cámara y el pistón, ya que los errores de medición tienen origen en las fugas que se producen entre

ambos elementos. Es por ello que la fase de crítica de los contadores volumétricos pasa por el dimensionado tanto del pistón como de la cámara. Si el desgaste de las partes móviles es excesiva, se producirán pequeñas fisuras que darán lugar a errores de subcontaje, sin embargo, si el espacio disponible en la cámara de medición es menor debido a las incrustaciones, se podría impedir el giro del pistón y por ende, el del contador.

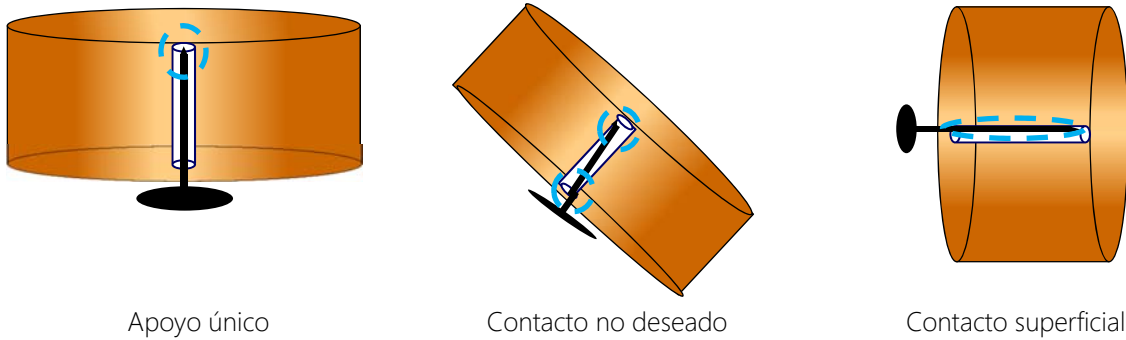
### 5.4.5 Posición de instalación

Normalmente, los contadores de chorro único están fabricados para trabajar de manera horizontal de manera que el eje donde se sostiene la turbina se sitúe de forma vertical. Además, es la única forma de que la turbina apoye en un único punto y evite así un mayor rozamiento. De esta manera, con un menor rozamiento se evite que la turbina apoye en más de un punto y se pueda reducir así el error del contador a caudales bajos.

Si la turbina apoya únicamente en el extremo del eje, el deterioro de esta y del pivote también es menor puesto que estos materiales son diseñados a conciencia por los fabricantes para garantizar una mayor resistencia al desgaste.

El hecho de que el contador de chorro único se instale de forma inclinada da lugar a que el rozamiento de la turbina sea mayor en zonas que no han sido diseñadas para resistir este rozamiento. Con ello, la turbina se mueve de manera más lenta debido al incremento del par resistente y por tanto para un volumen consumido la turbina girará menos vueltas. Es decir, de esta manera el contador tiende al subcontaje.

El caso más desfavorable se da cuando el contador se instala de manera vertical ya que de esta manera la turbina apoya en todo el eje. El rozamiento en esta posición aumenta de manera considerable los errores a caudales bajos (Figura 5.17).



*Figura 5.17. Contactos entre la turbina y los apoyos (Arregui, et al., 2007)*

Es importante destacar que este problema alcanza su punto álgido a caudales bajos, ya que es cuando la energía que el agua transfiere a la turbina es pequeña y cualquier modificación en esta fuerza afecta a la velocidad de giro de la turbina.



*Figura 5.18. Contadores de chorro único instalados en posición vertical (Arregui, et al., 2007)*

En (Arregui, et al., 2007) se llevaron a cabo una serie de experimentos sobre diversos contadores de Clase B (de entre 6 a 9 años de edad). El resultado de los ensayos arrojó que el caudal de arranque promedio aumentó de 24 a 34l/h al inclinar el contador 45°.

Sin embargo, así como los contadores de velocidad se ven seriamente afectados por la posición de instalación, los contadores volumétricos se muestran impasibles frente a estas condiciones y mantienen prácticamente la misma curva de error independientemente de la posición o inclinación. De hecho, en las recomendaciones de instalación de los fabricantes se permite el montaje de los contadores en cualquier orientación sin perder la clase metrológica para la cual han sido homologados.



Figura 5.19. Marcado de un contador de chorro único (izquierda) y un contador volumétrico (derecha).

### 5.4.6 Pérdida de carga y bloqueo

Los contadores volumétricos registran el consumo a partir del número de llenados y vaciados de una cámara de la cual se conoce su volumen. La parte móvil está formada por un pistón que gira de manera excéntrica alrededor del eje de la cámara de medición. Esto se produce debido a la mayor presión aguas arriba del contador, el pistón gira dirigido por un rodillo y orientado por la presencia de un plato de división. La única forma que podría dar lugar a errores de sobrecontaje sería debido a la reducción del volumen de la cámara de medición por incrustaciones transportadas en el agua. Esto es imposible, puesto que si así se diera la situación el contador se pararía instantáneamente.

Este hecho por un lado es positivo puesto que de esta manera la curva de error de estos contadores siempre va a tender hacia la zona de subcontaje y jamás se podría dar una situación de sobrecontaje. Sin embargo, el bloqueo del pistón puede impedir el paso del agua y producir una elevada pérdida de carga en el sistema que afecte a toda la instalación. Es por ello que muchos fabricantes, con el fin de evitar el corte de suministro, perforan el pistón para comunicar la entrada y salida de la cámara de medición y asegurar un caudal mínimo de suministro.

Por su parte, los contadores de chorro único pueden ver bloqueada la turbina de manera temporal debido a deposiciones y acumulaciones calcáreas hasta que algún transitorio

provoque esfuerzos que la libere. Finalmente, se llegaría a un momento en el que la turbina se bloquearía definitivamente.

#### 5.4.7 Caudal circulante en bloqueo

Este punto queda totalmente relacionado con el punto anterior. En el caso de que el pistón de un contador volumétrico se bloquee se puede dar la situación de que entre los orificios de la cámara de medición se produzcan fisuras que liberen un caudal muy bajo, del orden de 20 o 30l/h. Este caudal se mantendría constante a lo largo del día lo que podría dar lugar a un volumen consumido diario de 700 litros sin haber sido prácticamente apreciado por el usuario.

#### 5.4.8 Normativa

El cumplimiento de la normativa es un aspecto en el que se ha hecho hincapié en el capítulo 3. Es muy común que los fabricantes ensayen los contadores a tres o cuatro caudales como máximo, es decir, caudal mínimo, caudal nominal y caudal máximo.

Sin embargo, como se muestra en la Figura 5.20, la zona situada entre  $Q_2$  y  $Q_3$  no se ensaya, sino que se intuye, y es esta zona donde los valores de la curva de error pueden incumplir la normativa.

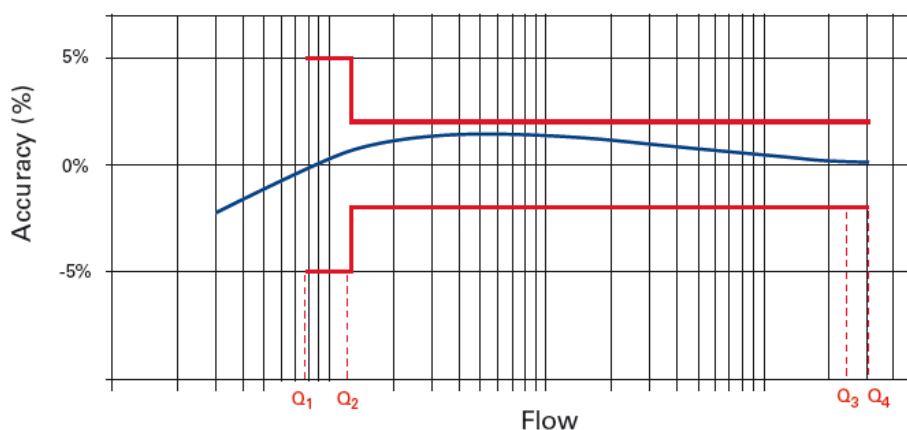


Figura 5.20. Curva de error de un contador volumétrico obtenida del catálogo de un fabricante

## 5. Comparativa del contador volumétrico frente al contador de chorro único

La Figura 5.21 muestra un ejemplo de la curva de error (correspondiente al modelo N3 del capítulo 3 de este trabajo) de un contador volumétrico que corresponde con el contador al que hace alusión la Figura 5.20 obtenida del catálogo del fabricante.

En ella se observa que existe una zona (sombreada en rojo) que se encuentra en el límite del error marcado por la normativa. Esta zona, que abarca un caudal de entre 60 a 100l/h, no es ensayada por los fabricantes y por lo tanto no se puede saber con exactitud si se encuentra dentro de los límites marcados por la norma a menos que se sometan a un ensayo de verificación al salir de fábrica.

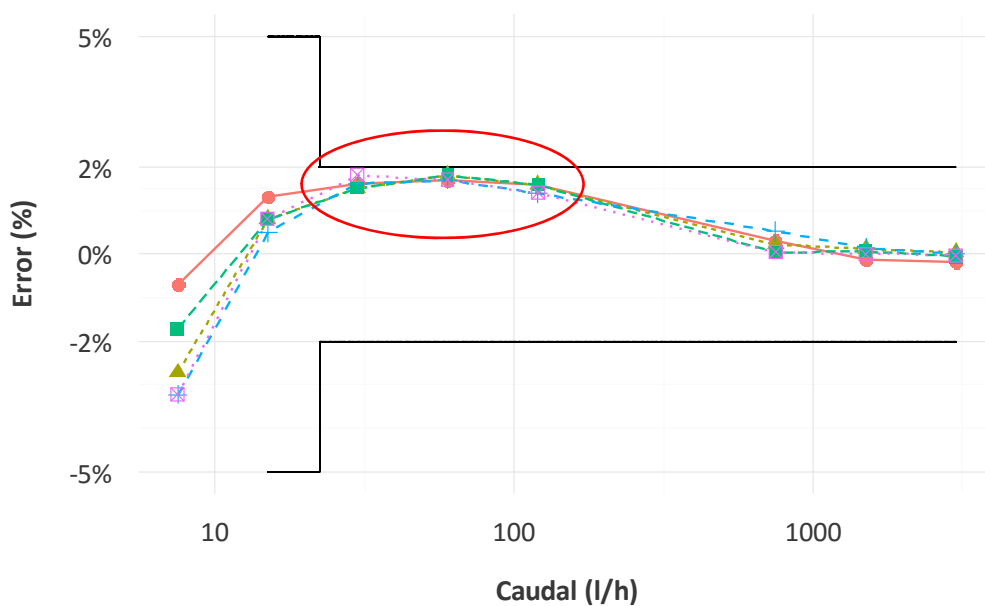


Figura 5.21. Curva de error de un contador volumétrico salido de fábrica

## 6 Conclusiones

El trabajo llevado a cabo pretende aportar información válida sobre el comportamiento que se puede esperar de un contador volumétrico de pistón rotativo tanto nuevo como en uso. Los errores de medición y el envejecimiento de un contador son parte responsable de las pérdidas aparentes de agua en el sistema y con ello de un impacto negativo en el balance económico de la empresa de abastecimiento. Además, la complejidad de los fenómenos físicos asociados tanto a los errores de medición como a su envejecimiento no permite una frecuencia de renovación de los contadores fija y guiada por parámetros aislados. El presente estudio considera los parámetros más influyentes como pueden ser la edad del contador, el volumen acumulado o el tipo de contador.

### 6.1 Conclusiones relativas a los contadores nuevos

El capítulo 3 de este trabajo presenta dos objetivos importantes. Por un lado, pretende ser un compendio de la literatura asociada al análisis de contadores volumétricos de nuevo uso y por otro utilizar esta literatura para establecer una comparativa entre una serie de modelos analizados en laboratorio.

De los análisis llevados a cabo, se pueden extraer diferentes conclusiones. Por un lado, se confirma la hipótesis de que la curva de error de un contador nuevo es única y por tanto no se puede establecer una curva de error teórica global para todo el parque de contadores, pese a que sí se pueden establecer límites para esta. Es por ello que es fundamental ensayar contadores nuevos previos a su instalación en campo con el fin de detectar lotes o partidas defectuosos que puedan causar pérdidas económicas considerables.

En general, la evolución de la curva de error de un contador volumétrico nuevo tiene forma convexa donde alcanza un máximo alrededor de 120l/h. Este valor se encuentra en el límite de la normativa, llegando a veces incluso a sobrepasarla. A pesar de esto, los fabricantes

no ensayan sus contadores a dicho caudal. Con todo esto, una mayor dispersión en los errores de ensayo de un modelo lleva a pensar que la calidad de fabricación es inferior que en aquellos modelos donde la dispersión es mínima.

Además, tanto los hábitos de consumo de los usuarios como la cantidad de agua que consumen van a marcar la manera de degradarse de un contador en una vivienda y propiciará una retirada más o menos tardía de dicho medidor. Es por ello que es fundamental conocer el patrón de consumo de los usuarios para así conocer el error final de un contador.

El error global de un contador, que define el rendimiento de un contador y es función tanto de la curva de error de este como del patrón de consumo, se sitúa en un valor alrededor del -1% según los análisis llevados a cabo llegando incluso a valores de -2%. Una mayor dispersión en los errores de ensayo implica una mayor diferencia en el error global para diferentes patrones de consumo (N3). Esto confirma estudios anteriores llevados a cabo (Arregui, et al., 2014) y discrepa con otros estudios (Bowen, et al., 1991) y (Barfus, et al., 2011). A pesar de esto, una mayor muestra es requerida para corroborar dicho análisis

Los patrones de consumo que dan más importancia a caudales bajos propician errores globales más negativos mientras que aquellos que priorizan el consumo a caudales altos dan lugar a errores más positivos. En cualquier caso, si los errores de un contador son pequeños, la diferencia en el error global para diferentes patrones de consumo también lo será.

*Tabla 6.1. Error global para diferentes modelos y patrones de consumo*

| <i>Patrón</i>   | <i>N1</i> | <i>N2</i> | <i>N3</i> | <i>N4</i> |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Tipo I</i>   | -0.17%    | -1.05%    | -1.93%    | -0.95%    |
| <i>Tipo II</i>  | -0.85%    | -2.59%    | -4.81%    | -1.71%    |
| <i>AWWA</i>     | -0.69%    | -1.25%    | -1.29%    | -1.74%    |
| <i>SEQREUS</i>  | 0.12%     | -0.46%    | -0.34%    | -0.66%    |
| <i>Promedio</i> | -0.40%    | -1.34%    | -2.09%    | -1.26%    |



Por último, se puede concluir que el error global de un contador volumétrico nuevo es muy similar para todos los modelos y esta variable no resulta significativa para la elección de un modelo de contador u otro.

## 6.2 Conclusiones relativas a la idoneidad

El principal aporte de este trabajo es la comparación del contador volumétrico frente al contador de chorro único, mayormente utilizado por las empresas de abastecimiento. Esta comparativa se ha llevado a cabo en el capítulo 5 a raíz de un análisis exhaustivo en el capítulo anterior de la velocidad de degradación del contador volumétrico.

Elegir un contador frente a otro no es una tarea sencilla puesto que pese a que el contador volumétrico parte con la ventaja de su capacidad para detectar caudales bajos tiene otra serie de inconvenientes que pueden llevar a rechazar su uso. La Tabla 6.2 trata de reflejarlos de manera resumida.

*Tabla 6.2. Comparación de variables entre un contador de pistón rotativo y un contador de chorro único*

| <i>Variable/Contador</i>                                       | <i>Pistón rotativo</i>   | <i>Chorro único</i>  |
|--|--|--|
| <i>Degradación</i>   | Error inicial menor. Mayor pendiente de degradación.                         | Error inicial mayor. Menor degradación con edad y volumen. |
| <i>Ruido</i>   | Elevado. Molestias en el usuario   | Mínimo.  |
| <i>Calidad del agua</i>  | Muy sensibles. Necesidad de filtro y mantenimiento.                          | Poco sensibles.  |
| <i>Distorsión flujo</i>  | No sensibles.  | Muy sensibles (no afecta a la metrología).                 |
| <i>Calidad de fabricación</i>                                  | Más precisa. Ajuste entre cámara de medición y pistón                        | Mayor dificultad. Necesidad de ajustar la curva error.     |
| <i>Posición</i>  | Cualquier posición   | Generalmente horizontal                                    |
| <i>Pérdida de carga y bloqueo.</i><br><i>Caudal circulante</i> | Bloqueo del pistón. Caída de presión en la red. Caudal mínimo circulante.    | Bloqueo de la turbina. No caudal circulante.               |
| <i>Económica</i>   | Mayor precio adquisición.  | Menor precio adquisición                                   |
| <i>Funcionamiento discontinuo</i>                              | No. Desgaste de componentes por aire obstruido que aumenta el caudal fugado. | Sí   |

Del capítulo 5 se puede extraer que la curva de error de un contador volumétrico es completamente diferente a la de un contador de chorro único. Mientras que la primera tiene forma convexa y a medida que aumenta el volumen acumulado y la edad esta se desplaza hacia valores negativos, la segunda crece de manera lineal para caudales bajos llegando a estabilizarse en un error cercano al 0% para un caudal próximo al caudal de transición y su evolución es difícil de prever.

Por lo que respecta a la velocidad de degradación, mientras que el contador volumétrico posee un error inicial menor su pendiente generalmente es mayor que la del contador de chorro único. Esto es, si el consumo del usuario es elevado, la robustez del contador de chorro único es mayor que la de un contador volumétrico que se ve afectado en mayor medida por la edad y por el volumen acumulado.

Por todo lo anterior la frecuencia de renovación de ambos contadores va a verse directamente relacionada con los parámetros asociados a cada abastecimiento. En el caso de que la frecuencia de renovación esté fijada de antemano, el precio de adquisición del contador volumétrico va a resultar un aspecto negativo pues la inversión de estos contadores es elevada mientras que como se ha visto, a los 10 años un contador de chorro único sigue trabajando en buen estado. En cualquier caso, el precio del agua va a resultar una variable determinante pues si este es elevado ( $1.7\text{€/m}^3$ ), se obtienen mayores beneficios con un contador volumétrico mientras que si este es bajo ( $0.3\text{€/m}^3$ ) se obtendrán mayores beneficios con un contador de chorro único.

|                     | Precio Agua ( $\text{€/m}^3$ ) | VAN (€) |
|---------------------|--------------------------------|---------|
| <i>Chorro único</i> | 1.5                            | 1424    |
| <i>Volumétrico</i>  | 1.5                            | 1429    |
| <i>Chorro único</i> | 0.3                            | 261     |
| <i>Volumétrico</i>  | 0.3                            | 254     |

*Figura 6.1. VAN función del tipo de contador para una frecuencia de renovación de 10 años*

Por otro lado, si la frecuencia de renovación no está fijada previamente, se puede sacar mayor partido a los contadores volumétricos puesto que se puede rentabilizar su inversión

con el paso del tiempo. En el caso de que el precio del agua sea elevado, los contadores volumétricos obtienen un mayor beneficio en un periodo de tiempo inferior a un contador de chorro único mientras que si el precio del agua es bajo, los contadores de chorro único pueden obtener un mayor beneficio con una vida útil mayor. En cualquier caso, como ya se ha dicho, desde el punto de vista de la gestión de un parque de contadores, no es factible mantener 27 años instalado un contador.

|                     | <i>Precio Agua (€/m<sup>3</sup>)</i> | <i>FOR (años)</i> | <i>VANC (€)</i> |
|---------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------------|
| <i>Chorro único</i> | 1.5                                  | 9                 | 5701            |
| <i>Volumétrico</i>  | 1.5                                  | 8                 | 5741            |
| <i>Chorro único</i> | 0.3                                  | 27                | 1077            |
| <i>Volumétrico</i>  | 0.3                                  | 20                | 1054            |

*Figura 6.2. Frecuencia de renovación que maximiza el VANC en función del tipo de contador*

En definitiva, la elección final del contador es una decisión marcada por un gran número de variables en juego y por ello, no se puede emitir una respuesta genérica frente a la pregunta de qué contador utilizar en un abastecimiento. En cualquier caso, este trabajo trata de esclarecer las situaciones donde cada contador trabaja de manera óptima con el fin de facilitar una adecuada gestión del parque de contadores de un abastecimiento.

## 6.3 Futuras líneas de investigación

El análisis estadístico sobre la evolución del error de un contador de agua tiene una capacidad de mejora significativa. La degradación de un contador está sometida a una serie de fenómenos físicos complejos que no deben tomarse de manera individual sino más bien de manera conjunta.

En este trabajo se han analizado las dos variables más significativas que caracterizan a un contador como son el año de instalación o el volumen acumulado, sin embargo, muchas otras variables están en juego tal y como pueden ser la presión en la red o el material de fabricación de los diferentes contadores.

Por otro lado, las curvas de error, dibujadas a partir de puntos obtenidos mediante ensayo en laboratorio, se presuponen con una evolución lineal, principalmente por su simplicidad. Sin embargo, queda una puerta abierta al estudio para analizar si esa evolución tiene una tendencia diferente a la linealidad mencionada.

Por último, el modelo económico parte de establecer diferentes precios de compra, instalación y gastos administrativos, sin embargo, no se ha considerado el coste de sustitución de dicho contador ni los gastos asociados a dicho cambio. Una cuestión a plantearse para la empresa de abastecimiento y objeto de estudio debe ser, ¿Es más económica la sustitución de un contador al final de su vida útil o es más rentable aprovechar dicho coste de sustitución para retirar un mayor número de estos? Este tipo de cuestiones podrían ser empleadas perfectamente para el desarrollo de una tesis doctoral.

## 7 Referencias

### 7.1 Referencias bibliográficas

Anon., s.f. *www.iagua.es/blog*. [En línea].

Arregui F. J., Cabrera E., García-Serra J., 2005. *Keys factors affecting water meter accuracy*. Halifax, Canada., International Water Association (IWA)..

Arregui F. J., García-Serra J., López G., Martínez J., 1998. Metodología para la evaluación del error de medición de un parque de contadores.. *Ingeniería del Agua*, 5(4).

Arregui F. J., García-Serra J., Palau C. V., Gascón L., 2004. *Evaluación y control de pérdidas en redes urbanas. Metodología para la evaluación de un parque de contadores*. s.l.:Instituto Tecnológico del Agua. Universidad Politécnica de Valencia..

Arregui F. J., Martínez B., Soriano J., Parra J. C., 2009. *Tools for improving decision making in water meter management*. Ciudad del Cabo, Sudáfrica., s.n.

Arregui F. J., Palau C. V., Gascón L., Peris O., 2003. Evaluating domestic water meter accuracy. A case study. Pumps, electromechanical devices and systems. Applied to urban water management.. En: s.l.:Balkema., pp. 343-352..

Arregui F. J., 1999. *Propuesta de una metodología para el análisis y gestión del parque de contadores de agua*. s.l.:Universidad Politécnica de Valencia..

Arregui F. J., 2002. *Cálculo de la incertidumbre en la estimación del error del parque de contadores*. s.l.: Universidad Politécnica de Valencia..

Arregui F. J., 2006. *Informe sobre el estado del parque de contadores de Castellón de la Plana*. s.l.: Instituto Tecnológico del Agua. Universidad Politécnica de Valencia..

Arregui F. J., s.f. *Balances hídricos en redes de agua*. s.l.:Instituto Tecnológico del Agua. Universidad Politécnica de Valencia..

Arregui F.J., Balaguer M., Soriano J., García-Serra J., 2014. Quantifying measuring error of new residential water meters considering different customer consumption patterns. *Taylor&Francis*.

Arregui, F. J., E., C. & R., C., 2007. *Gestión Integral de contadores de agua*. s.l.:IWA Publishing..

Balaguer M., Arregui F. J., Soriano J., 2012. *Desarrollo de una herramienta para la evaluación preliminar de la gestión técnica de un parque de contadores doméstico. Aplicación en el abastecimiento de Aranda del Duero*. s.l.:Universidad Politécnica de Valencia..

Barfus, S., Johnson, M. C. & Neilsen, M. A., 2011. Accuracy of In-Service Water Meters at Low and High Flow Rates.

Bowen, Harp, J., Hendricks, J. & Shoeleh, M., 1991. *Evaluating residential meter performance*. Denver: s.n.

Bowen, P. H. J. B. J. a. S. R., 1993. Residential water use patterns. *American Water Works Association Research Foundation*.

Colado M., Arregui F. J., Soriano J., 2012. *Evaluación del error global de medición de contadores domésticos nuevos..* s.l.:Universidad Politécnica de Valencia..

M.A., N., S.L., B. & M.C., J., 2011. Off-the-shelf accuracies of residential water meters. *Journal of the American Water Works Association*.

Montero García A., Añón Almazán J., 2013. *Contadores de agua*. Instituto Aragonés del Agua. [En línea].

O., V., R., B. & F.J., A., 2014. *Análisis experimental y estadístico de la fiabilidad de contadores de agua de pequeño calibre en abastecimientos de la costa mediterránea. Optimización del mantenimiento y criterios de renovación del parque de contadores*. Valencia: UPV.

Palau Esteban C., 2005. *Aportaciones a la gestión de los sistemas de medición de caudal en redes de distribución de agua a presión..* s.l.:Universidad Politécnica de Valencia..

Soto, C., s.f. *Anfagua*. [En línea]  
Available at: [www.anfagua.org](http://www.anfagua.org)

## 7.2 Referencias legislativas

- *Orden Ministerial de 28 de diciembre de 1988, por la que se regulan los contadores de agua fría y aplica la Directiva 75/33/CEE de 17.12.74 (BOE N° 55, de 6.3.1989).*
- *Real Decreto 889/2006, de 21 de julio, por el que se regula el control metrológico del Estado sobre instrumentos de medida.*
- *Real Decreto 1284/2010, de 15 de octubre, por el que se modifica el Real Decreto 889/2006, de 21 de julio, por el que se regula el control metrológico del Estado sobre instrumentos de medida.*
- *Real Decreto 244/2016, de 3 de junio, por el que se desarrolla la Ley 32/2014, de 22 de diciembre, de Metrología. Este Real Decreto deroga el RD 889/2006.*
- *Directiva 2004/22/CE del parlamento europeo y del consejo de 31 de marzo de 2004 relativa a los instrumentos de medida.*

- *Directiva 2014/32/UE del parlamento europeo y del consejo de 26 de febrero de 2014 sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de comercialización de instrumentos de medida (refundición). Esta directiva deroga la antigua Directiva 2004/22/CE.*
- *Orden ITC/279/2008, de 31 de enero, por la que se regula el control metrológico del Estado de los contadores de agua fría, tipos A y B.*





# Anexo A Cálculos y figuras

## Anexo A.1 Descripción de la muestra

### Abastecimiento A

#### Modelo M1

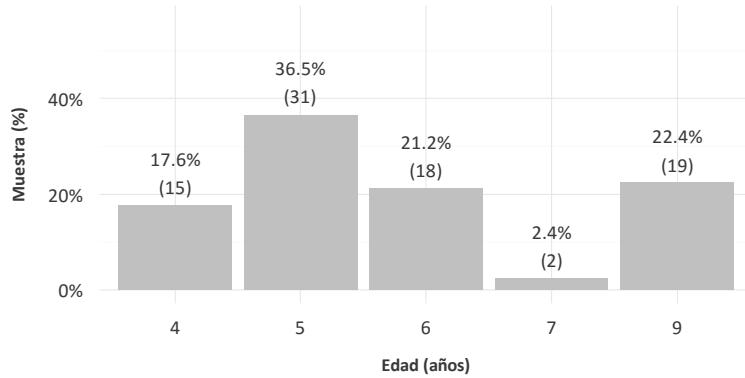


Figura A.1. Distribución de la muestra de contadores del modelo M1 en función de la edad

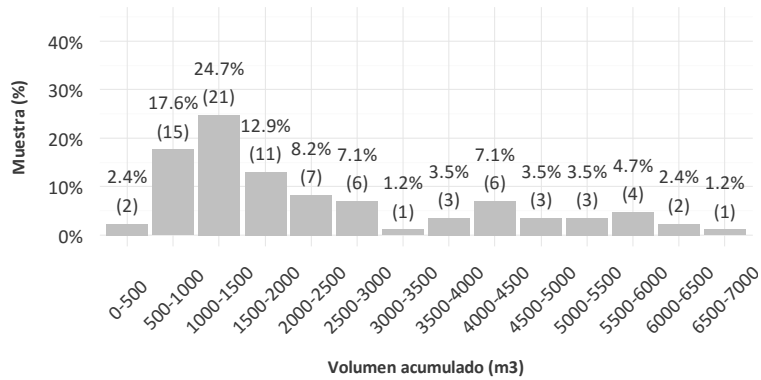


Figura A.2. Distribución de la muestra de contadores del modelo M1 en función del volumen

#### Modelo M2

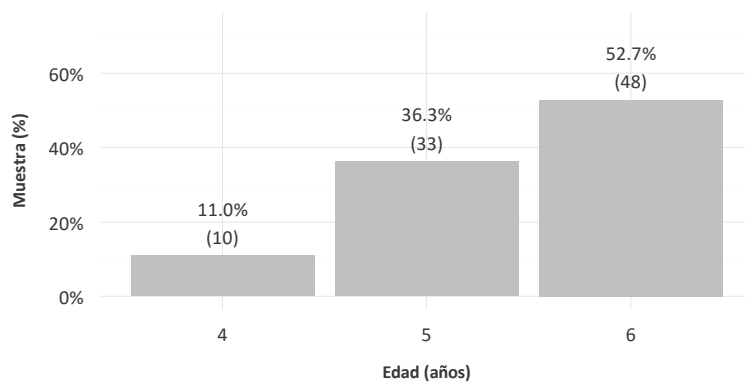


Figura A.3. Distribución de la muestra de contadores del modelo M2 en función de la edad

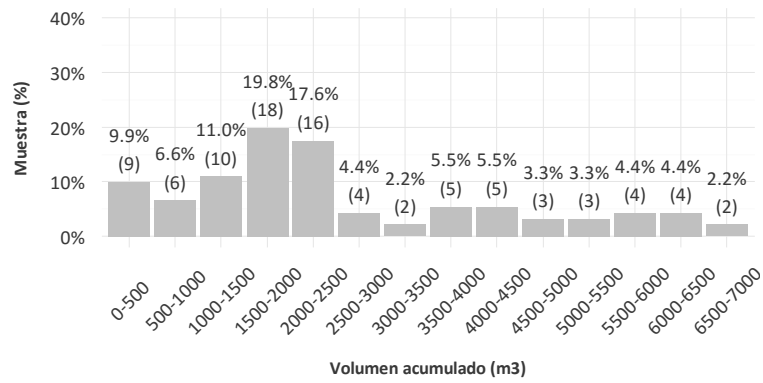


Figura A.4. Distribución de la muestra de contadores del modelo M2 en función del volumen

Abastecimiento B

Modelo M3

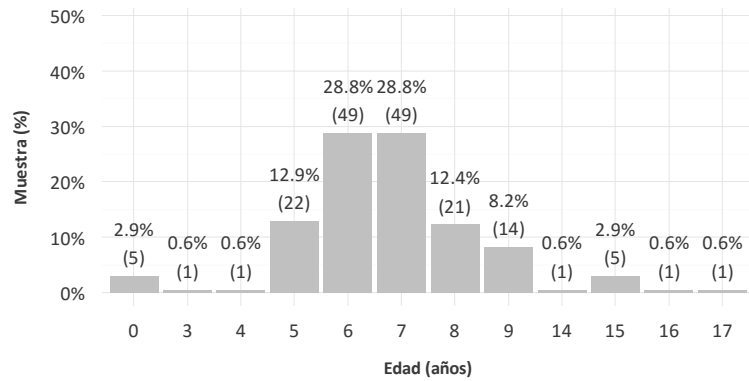


Figura A.5. Distribución de la muestra de contadores del modelo M3 en función de la edad

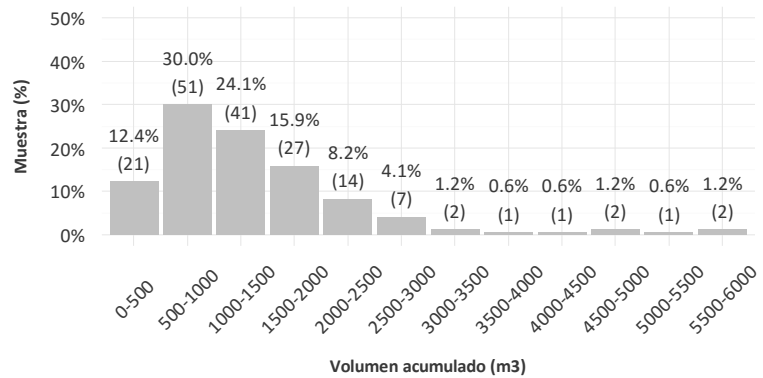


Figura A.6. Distribución de la muestra de contadores del modelo M3 en función del volumen

Modelo M4

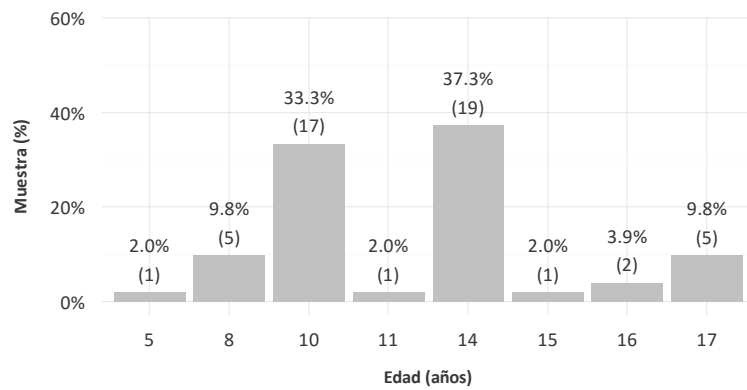


Figura A.7. Distribución de la muestra de contadores del modelo M4 en función de la edad

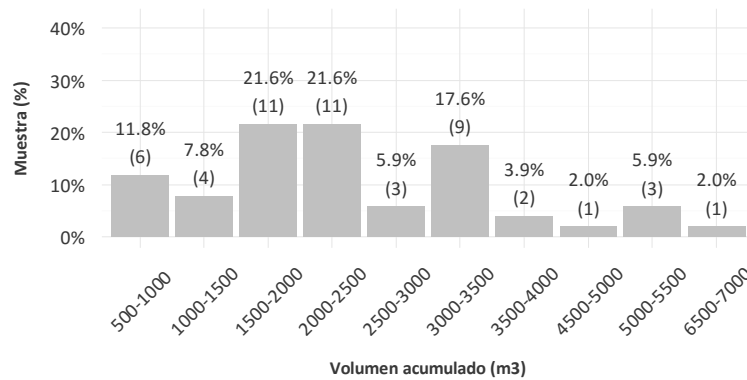


Figura A.8. Distribución de la muestra de contadores del modelo M4 en función del volumen

Abastecimiento C

Modelo M5

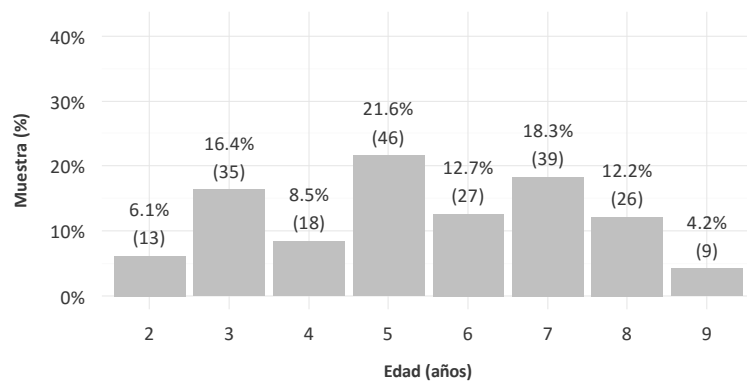


Figura A.9. Distribución de la muestra de contadores del modelo M5 en función de la edad

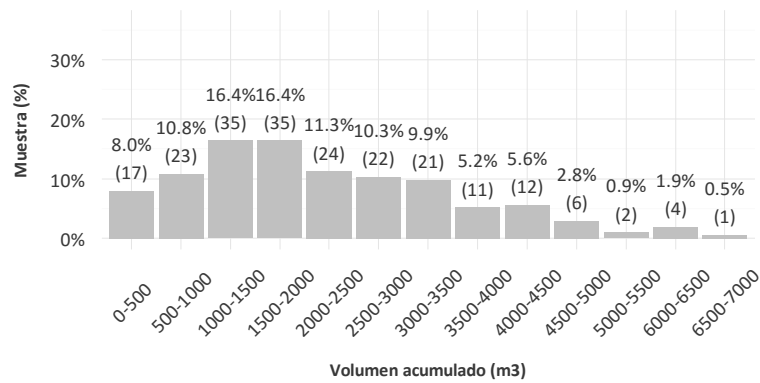


Figura A.10. Distribución de la muestra de contadores del modelo M5 en función del volumen

Modelo M6

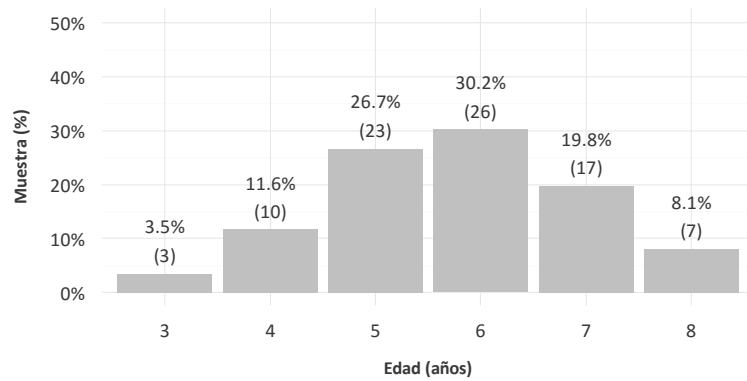


Figura A.11. Distribución de la muestra de contadores del modelo M6 en función de la edad

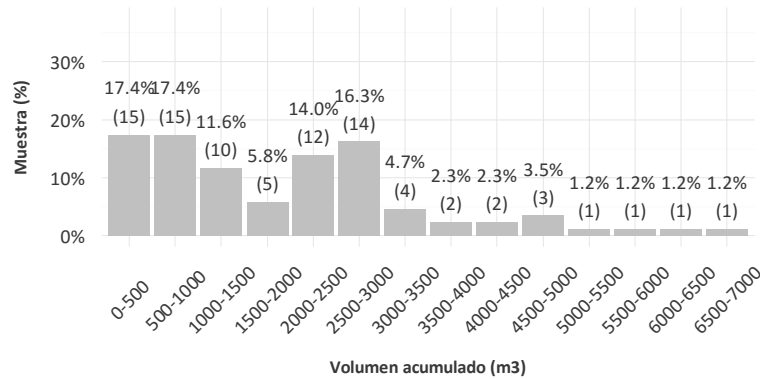


Figura A.12. Distribución de la muestra de contadores del modelo M6 en función del volumen

Abastecimiento D

Modelo M7

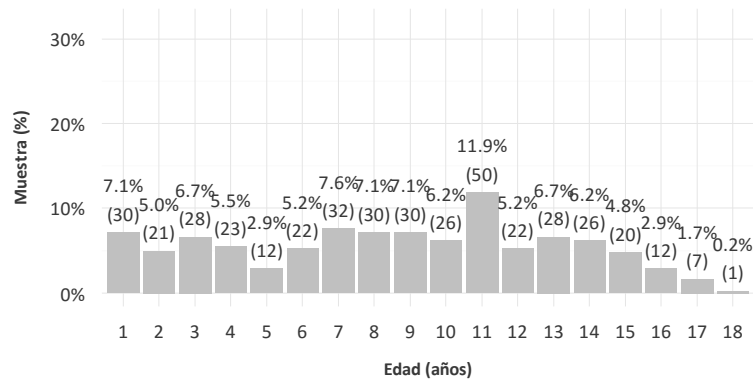


Figura A.13. Distribución de la muestra de contadores del modelo M7 en función de la edad

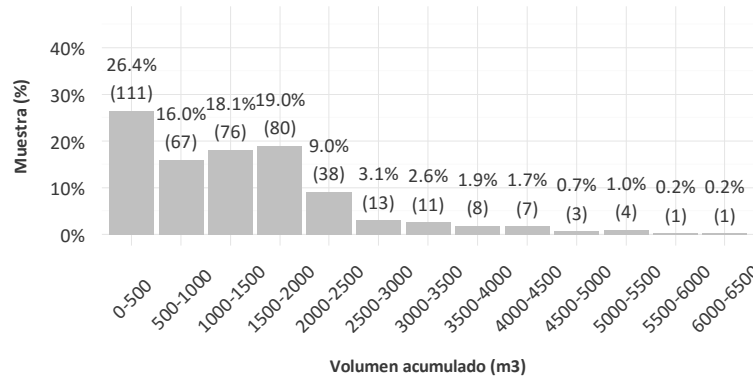


Figura A.14. Distribución de la muestra de contadores del modelo M7 en función del volumen

Modelo M8

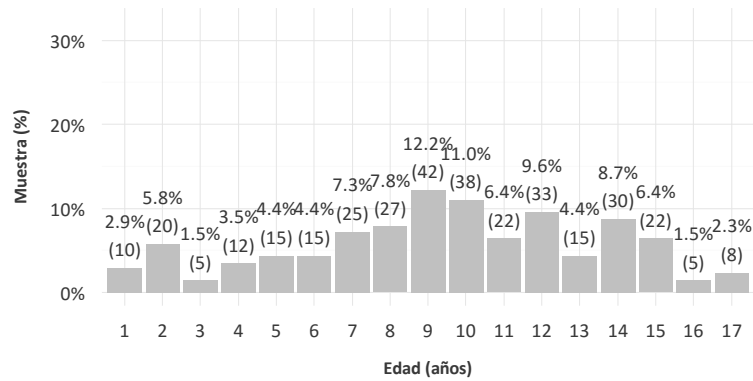


Figura A.15. Distribución de la muestra de contadores del modelo M8 en función de la edad

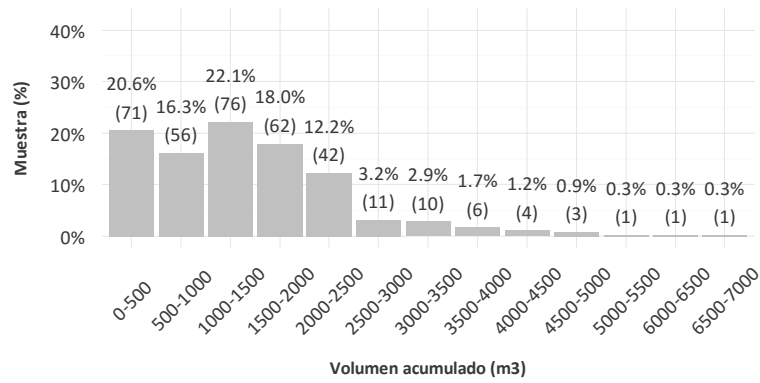


Figura A.16. Distribución de la muestra de contadores del modelo M8 en función del volumen

Modelo M9

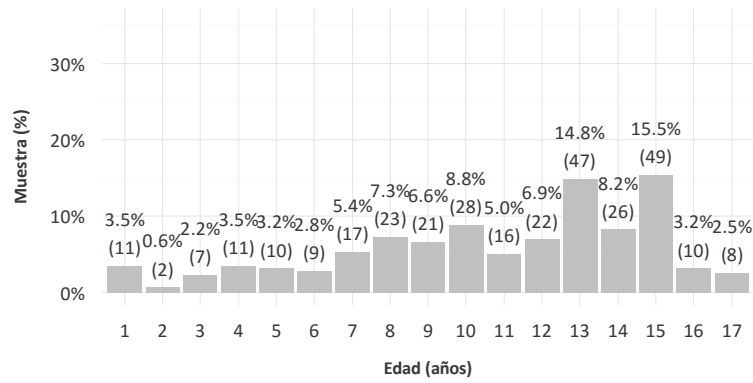


Figura A.17. Distribución de la muestra de contadores del modelo M9 en función de la edad

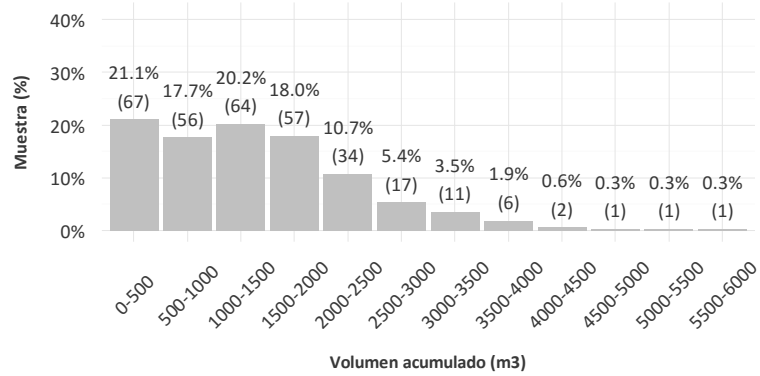


Figura A.18. Distribución de la muestra de contadores del modelo M9 en función del volumen

Modelo M10

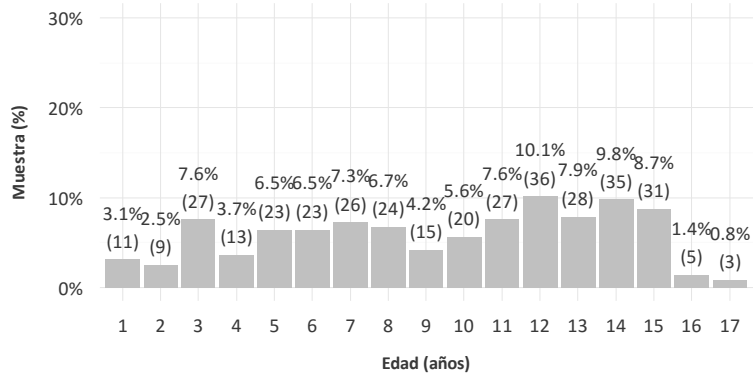


Figura A.19. Distribución de la muestra de contadores del modelo M10 en función de la edad

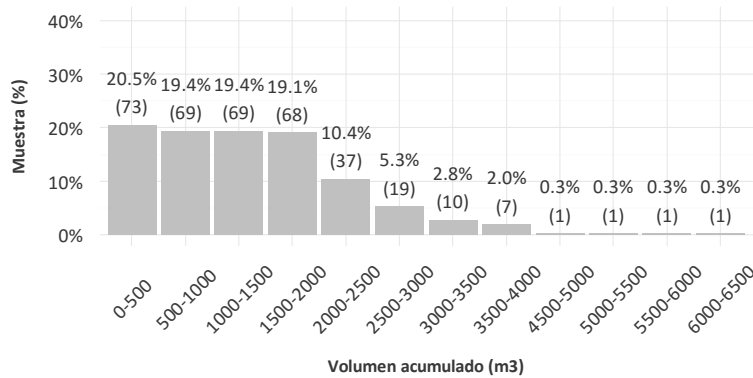


Figura A.20. Distribución de la muestra de contadores del modelo M10 en función del volumen

Modelo M11

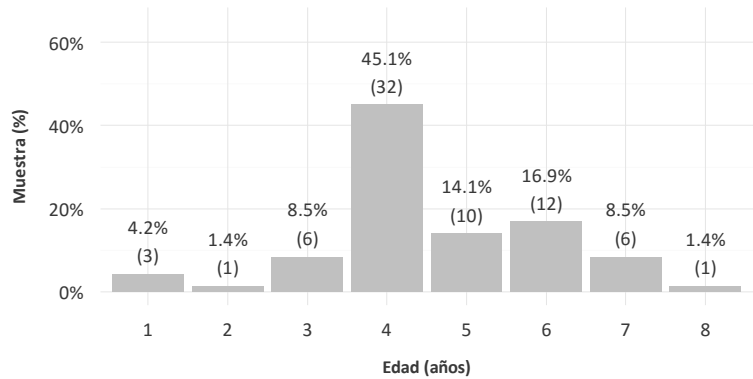


Figura A.21. Distribución de la muestra de contadores del modelo M11 en función de la edad

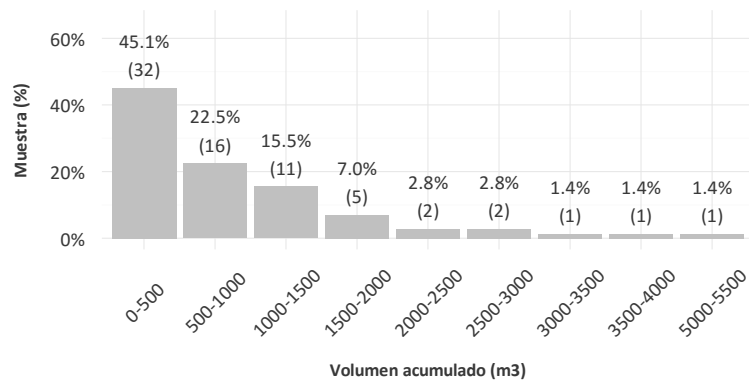


Figura A.22. Distribución de la muestra de contadores del modelo M11 en función del volumen

Modelo M12

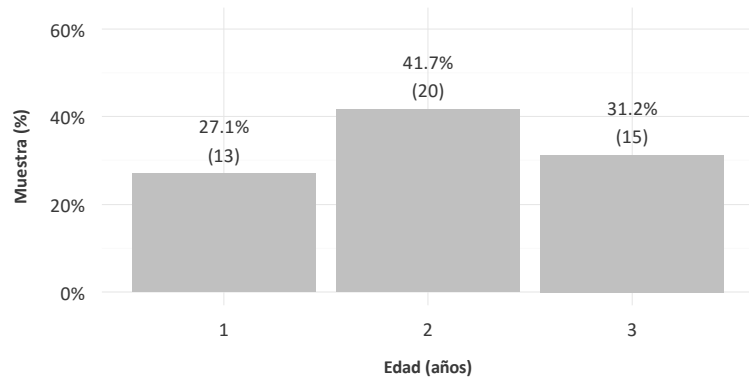


Figura A.23. Distribución de la muestra de contadores del modelo M12 en función de la edad

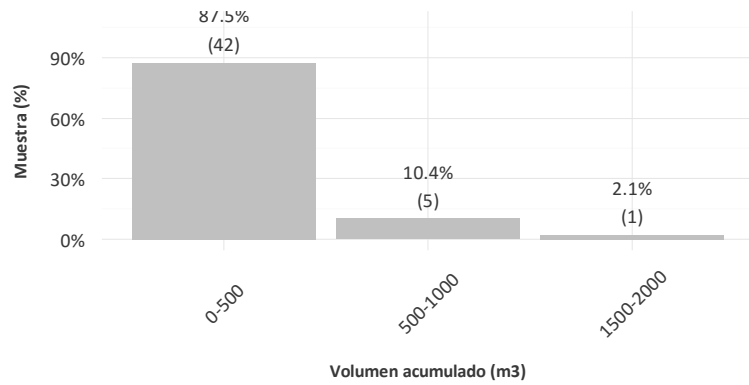


Figura A.24. Distribución de la muestra de contadores del modelo M12 en función del volumen



## Anexo A.2 Curvas de error

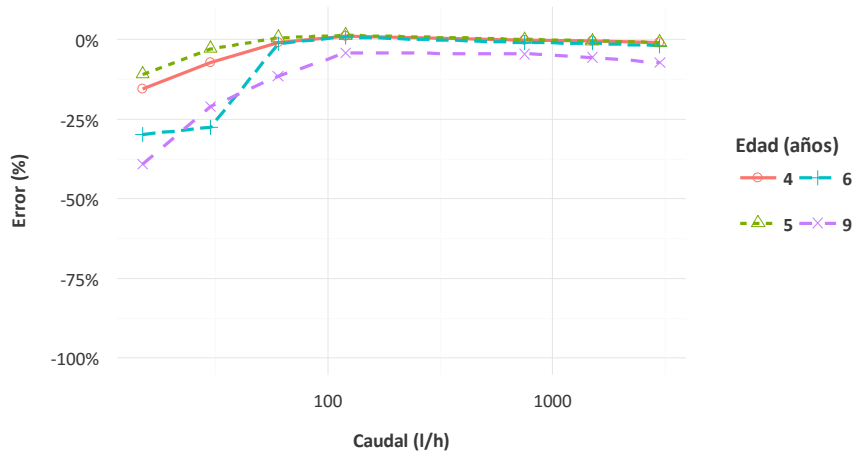


Figura A.25. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M1

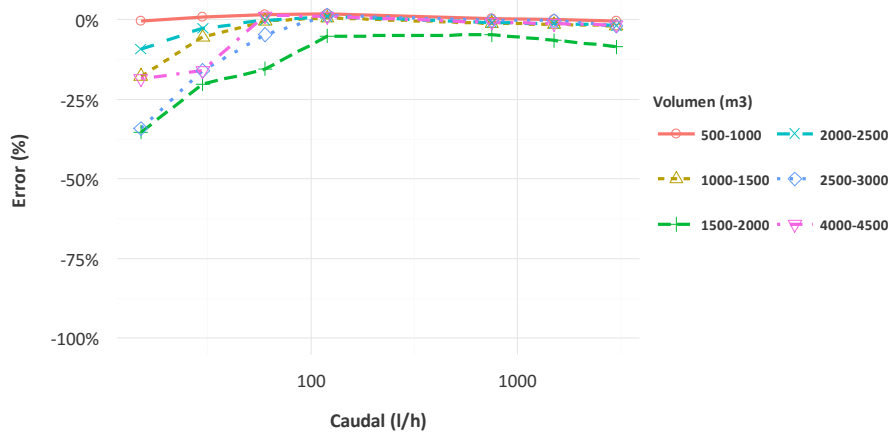


Figura A.26. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M1

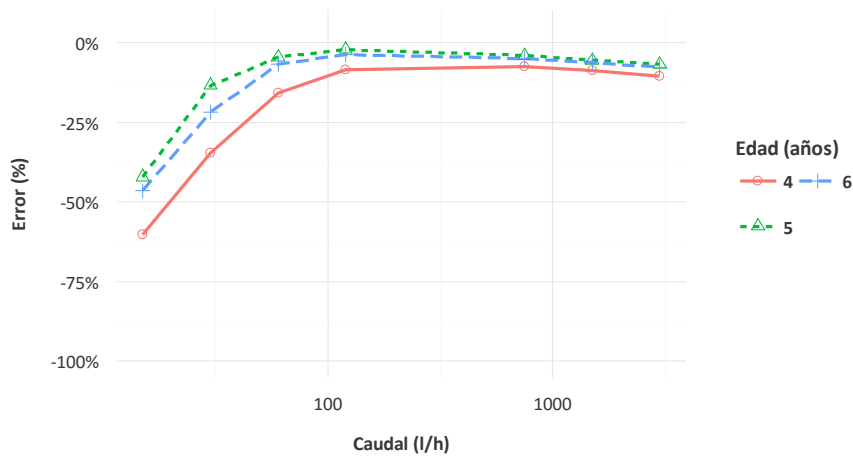


Figura A.27. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M2

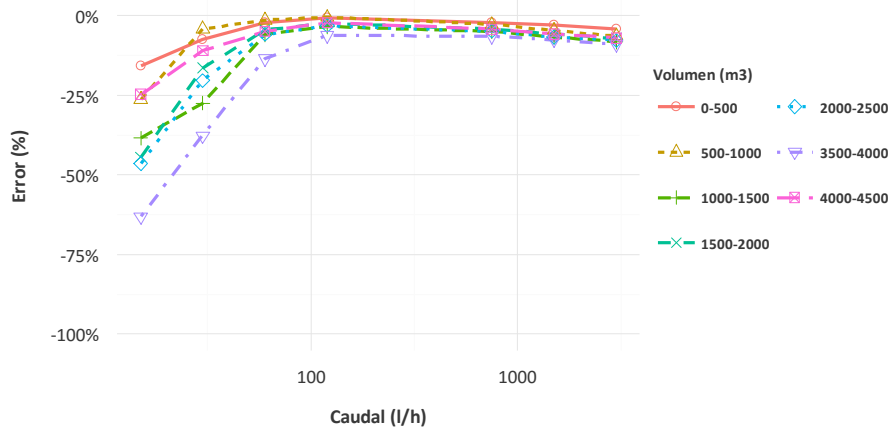


Figura A.28. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M2

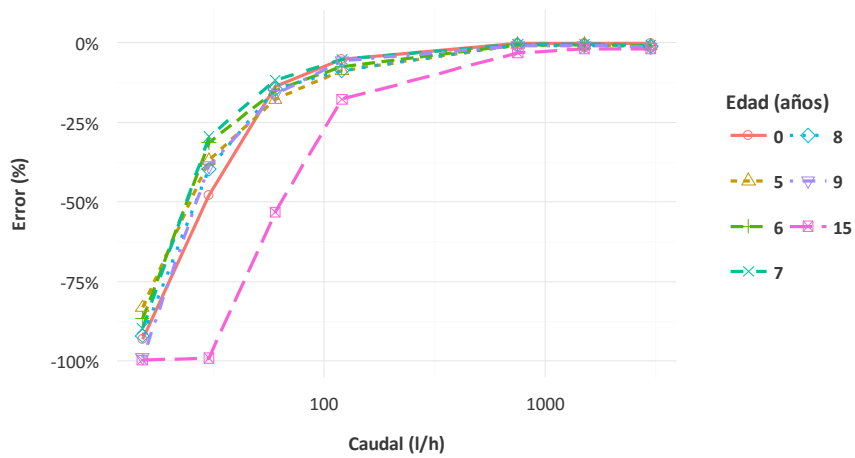


Figura A.29. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M3

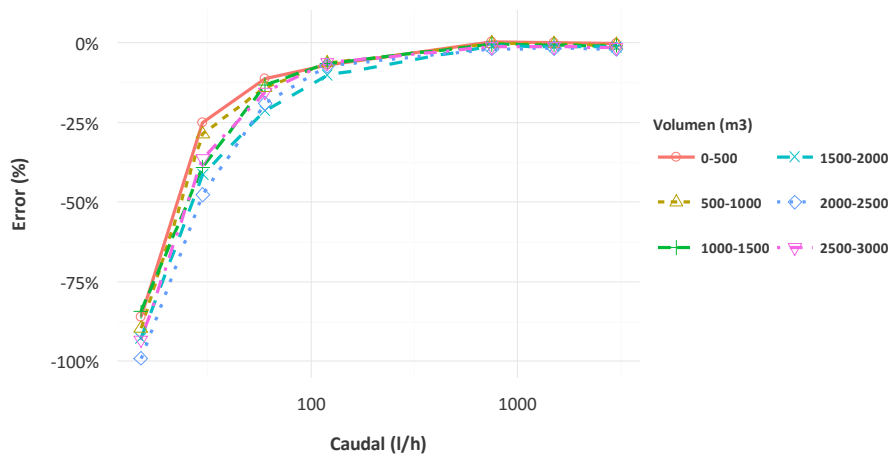


Figura A.30. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M3

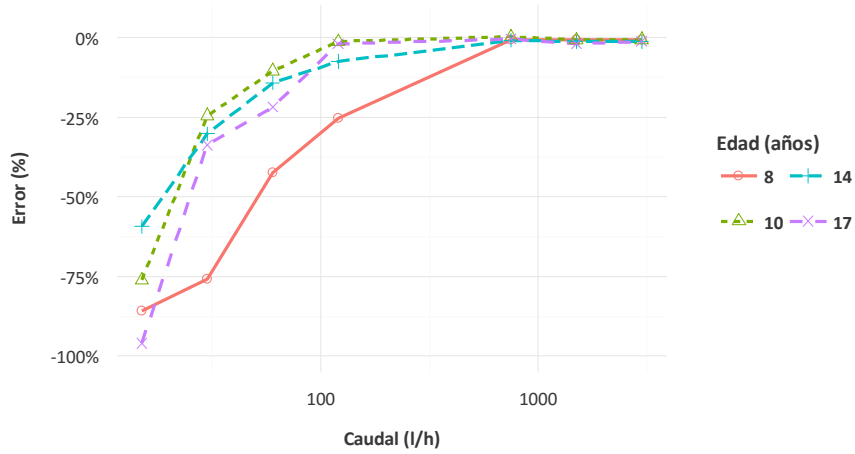


Figura A.31. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M4

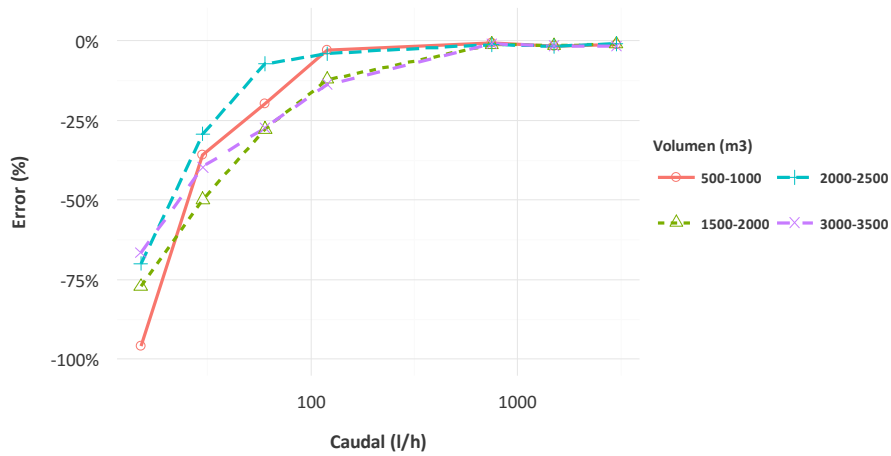


Figura A.32. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M4

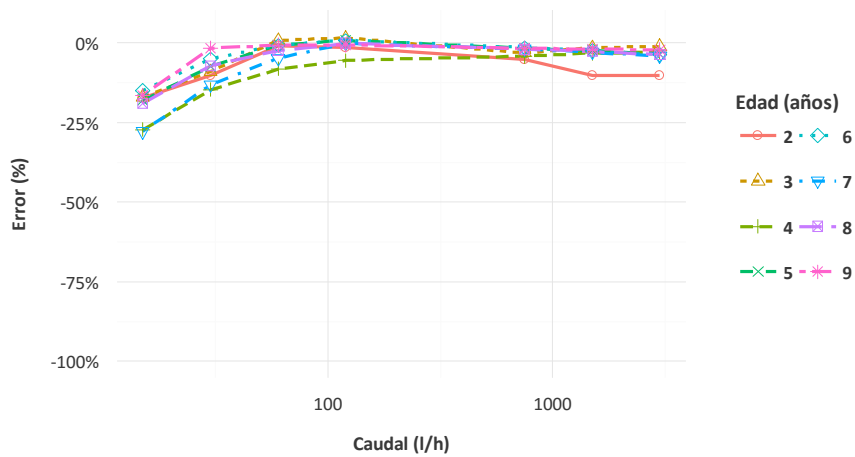


Figura A.33. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M5

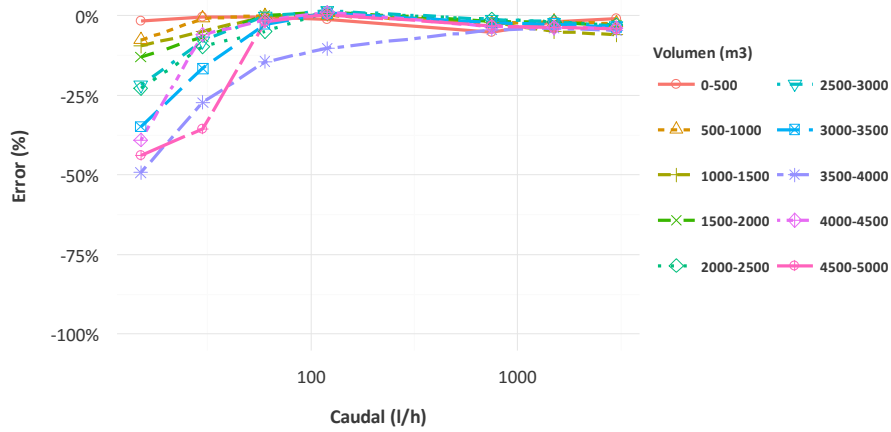


Figura A.34. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M5

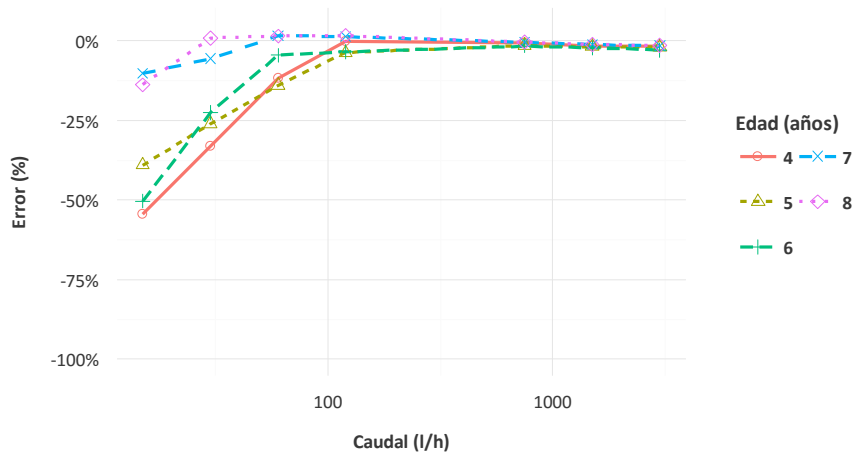


Figura A.35. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M6

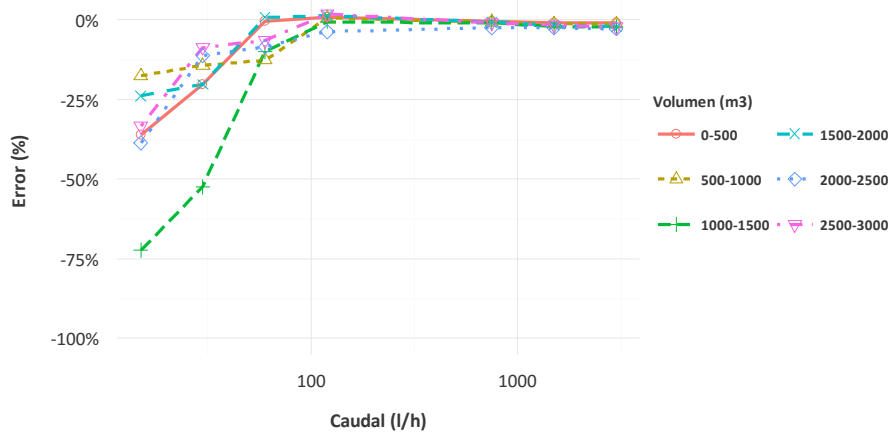


Figura A.36. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M6

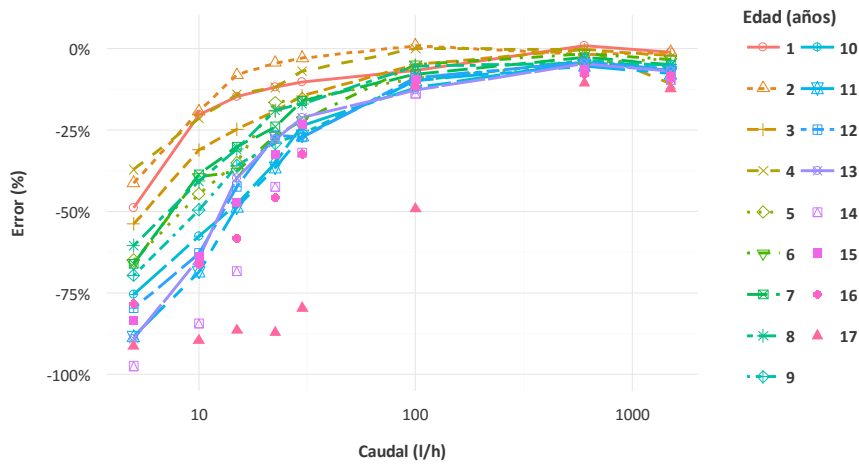


Figura A.37. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M7

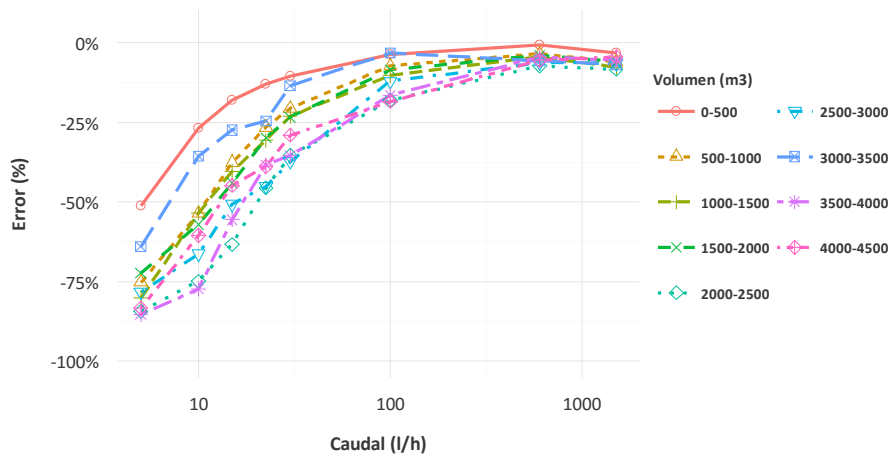


Figura A.38. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M7

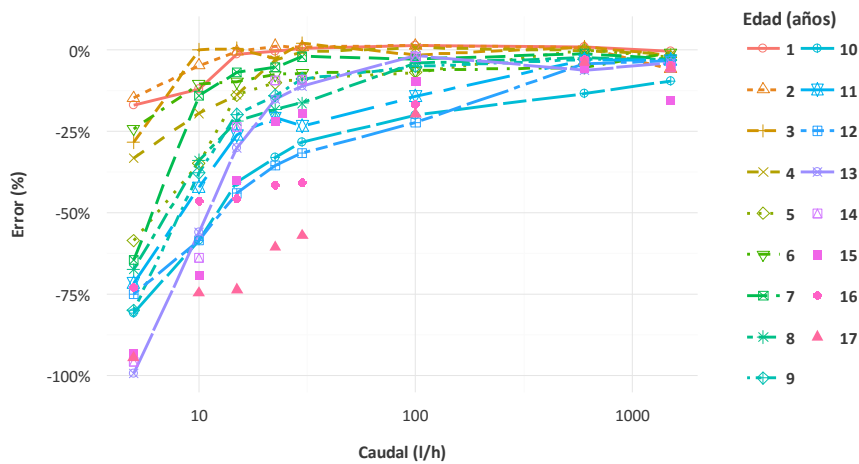


Figura A.39. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M8

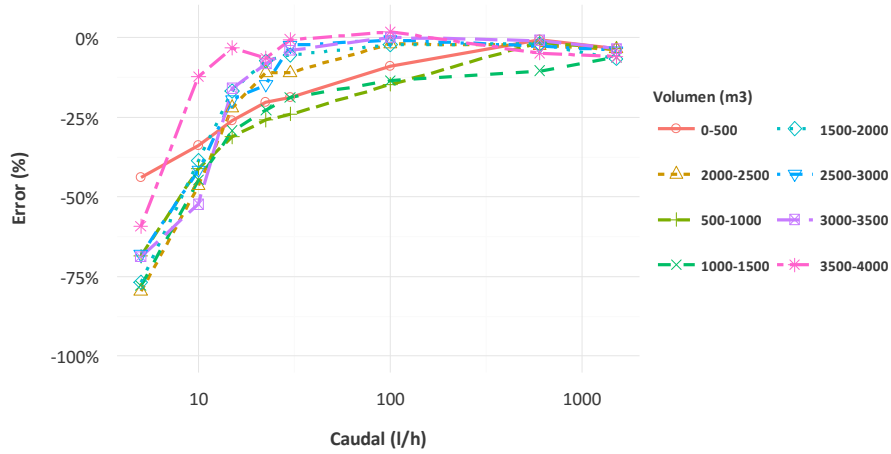


Figura A.40. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M8

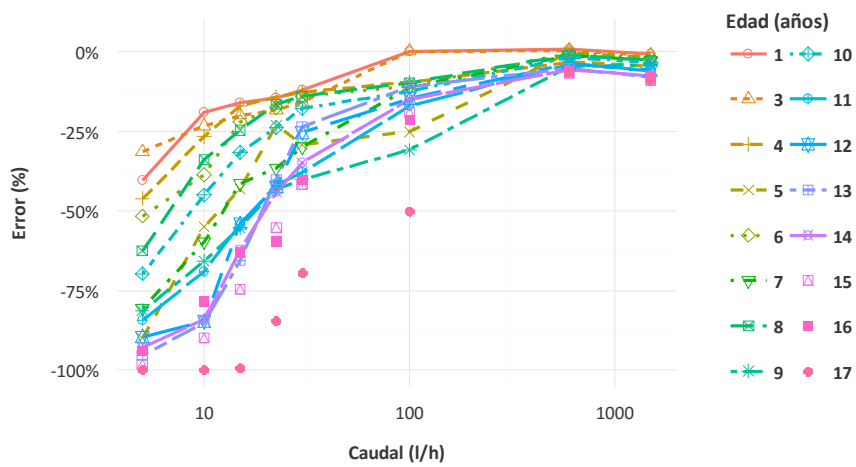


Figura A.41. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M9

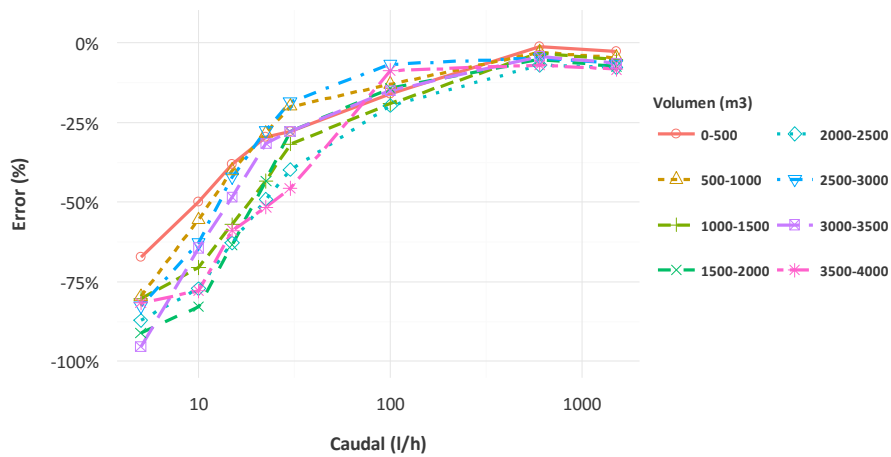


Figura A.42. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M9

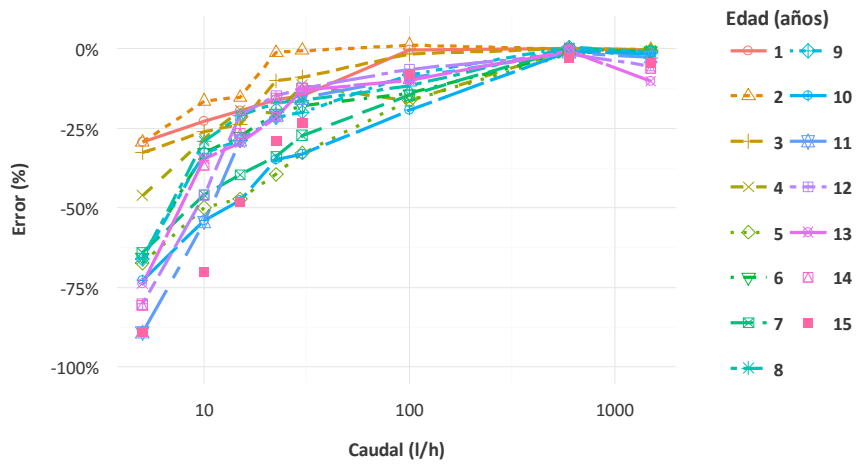


Figura A.43. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M10

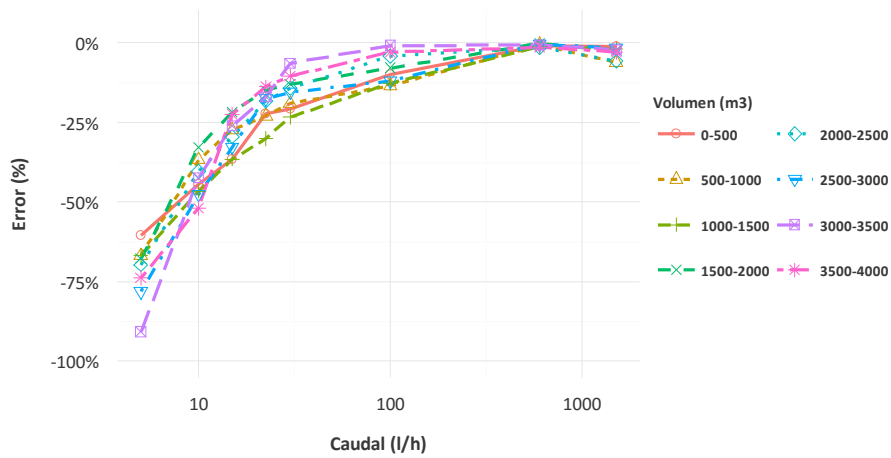


Figura A.44. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M10

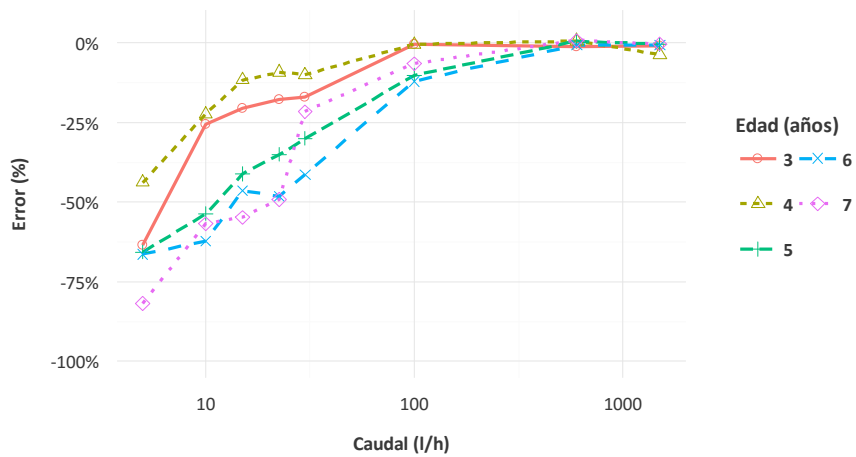


Figura A.45. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M11

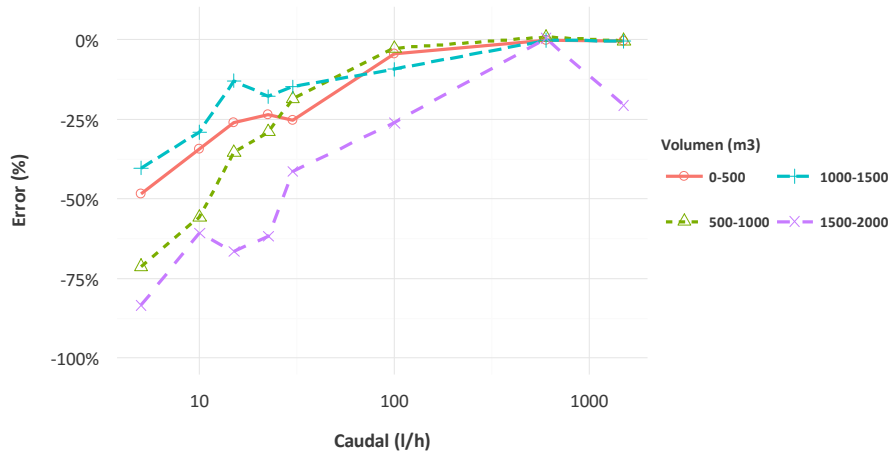


Figura A.46. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M11

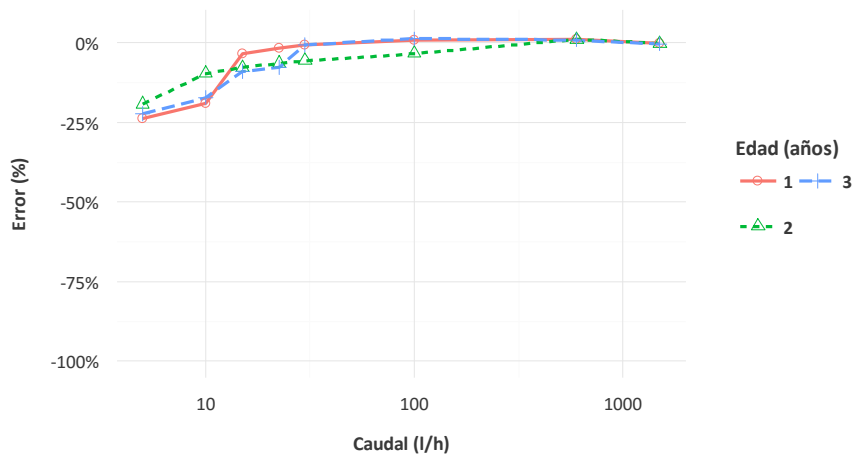


Figura A.47. Curva de error promedio en función de la edad para el modelo M12

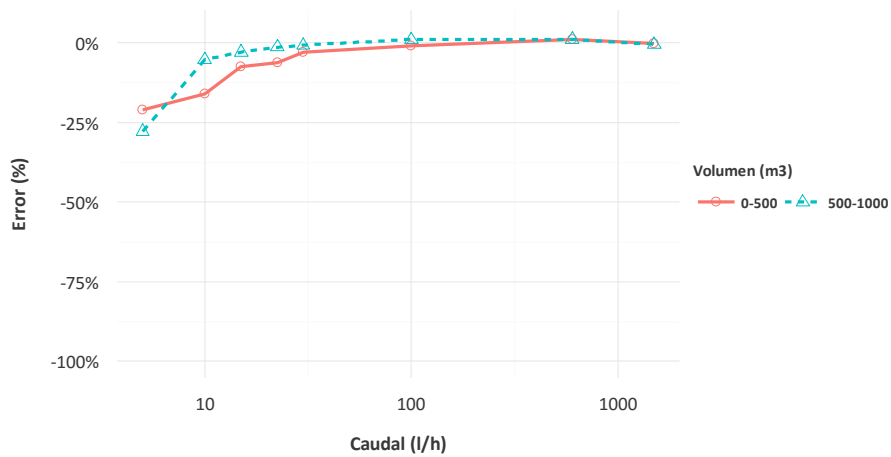


Figura A.48. Curva de error promedio en función del volumen para el modelo M12



## Anexo A.3 Velocidades de degradación

### Anexo A.3.1 Grupos de edad

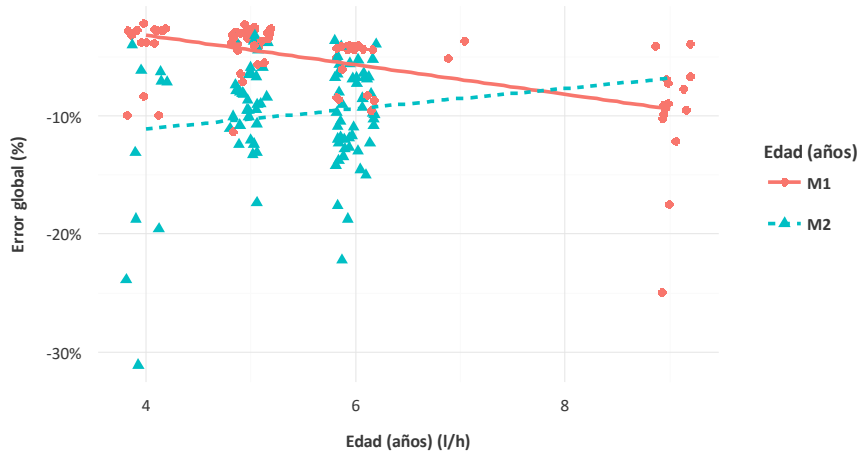


Figura A.49. Degradación lineal del error global en función de la edad para el abastecimiento A

Tabla A.1. Parámetros estadísticos de la regresión (M1, M2)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F     | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|-------|-----|----------|
| 1    | M1     | Lineal      | 0.3238     | 39.31 | 79  | 1.79E-08 |
|      |        | Polinómica  | 0.3387     | 21.49 | 79  | 3.68E-08 |
|      |        | Logarítmica | 0.2964     | 34.7  | 79  | 8.95E-08 |
| 2    | M2     | Lineal      | 0.004      | 1.368 | 89  | 2.45E-01 |
|      |        | Polinómica  | 0.07466    | 4.631 | 89  | 1.22E-02 |
|      |        | Logarítmica | 0.0089     | 1.811 | 89  | 1.82E-01 |

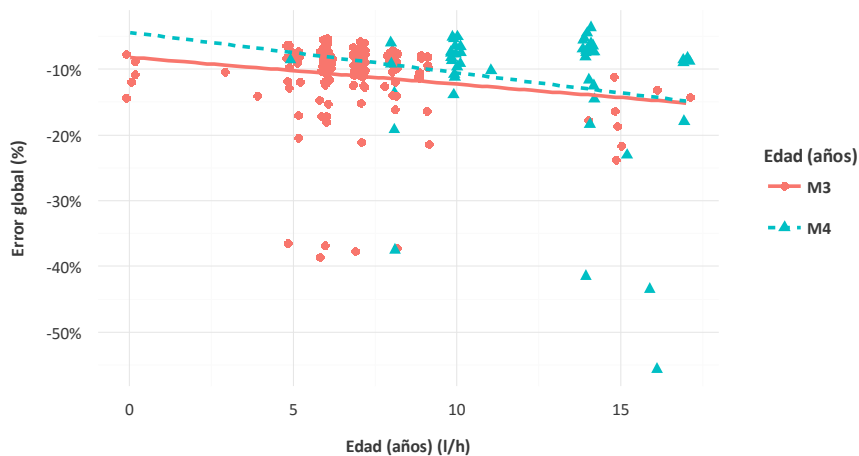


Figura A.50. Degradación lineal del error global en función de la edad para el abastecimiento B

Tabla A.2. Parámetros estadísticos de la regresión (M3, M4)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F      | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|--------|-----|----------|
| 3    | M3     | Lineal      | 0.0246     | 4.992  | 157 | 2.69E-02 |
|      |        | Polinómica  | 0.0379     | 4.117  | 157 | 1.81E-02 |
|      |        | Logarítmica | -0.0046    | 0.275  | 157 | 6.00E-01 |
| 4    | M4     | Lineal      | 0.00905    | 1.448  | 48  | 2.35E-01 |
|      |        | Polinómica  | 0.02948    | 1.744  | 48  | 1.86E-01 |
|      |        | Logarítmica | 0.3274     | 0.9789 | 48  | 3.27E-01 |

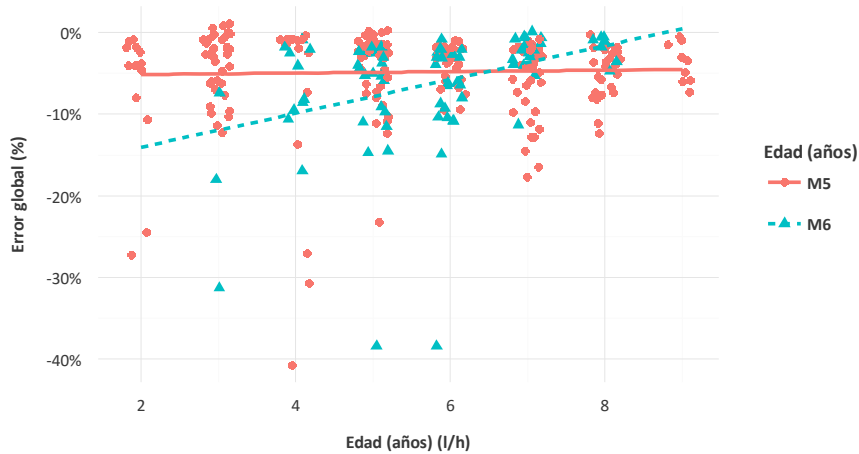


Figura A.51. Degradación lineal del error global en función de la edad para el abastecimiento C

Tabla A.3. Parámetros estadísticos de la regresión (M5, M6)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F      | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|--------|-----|----------|
| 5    | M5     | Lineal      | -0.00378   | 0.2021 | 211 | 6.54E-01 |
|      |        | Polinómica  | -0.006     | 0.3674 | 211 | 6.93E-01 |
|      |        | Logarítmica | -0.0027    | 0.4229 | 211 | 5.16E-01 |
| 6    | M6     | Lineal      | 0.1205     | 12.37  | 82  | 7.00E-04 |
|      |        | Polinómica  | 0.1106     | 6.162  | 82  | 3.20E-03 |
|      |        | Logarítmica | 0.1248     | 12.84  | 82  | 5.00E-04 |

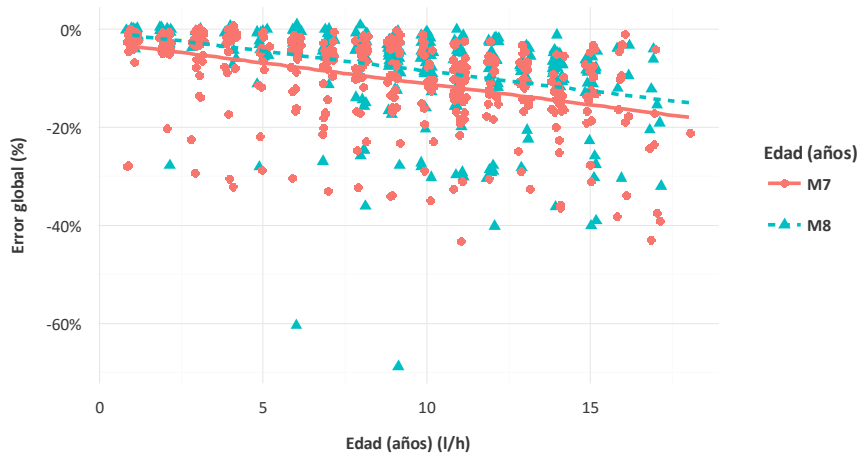


Figura A.52. Degradación del error global en función de la edad para el abastecimiento D

Tabla A.4. Parámetros estadísticos de la regresión (M7, M8)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F     | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|-------|-----|----------|
| 7    | M7     | Lineal      | 0.1936     | 97.75 | 402 | 0.00E+00 |
|      |        | Polinómica  | 0.1929     | 49.15 | 402 | 0.00E+00 |
|      |        | Logarítmica | 0.1631     | 79.51 | 402 | 0.00E+00 |
| 8    | M8     | Lineal      | 0.114      | 41.31 | 312 | 0.00E+00 |
|      |        | Polinómica  | 0.111      | 20.63 | 312 | 0.00E+00 |
|      |        | Logarítmica | 0.102      | 36.58 | 312 | 0.00E+00 |

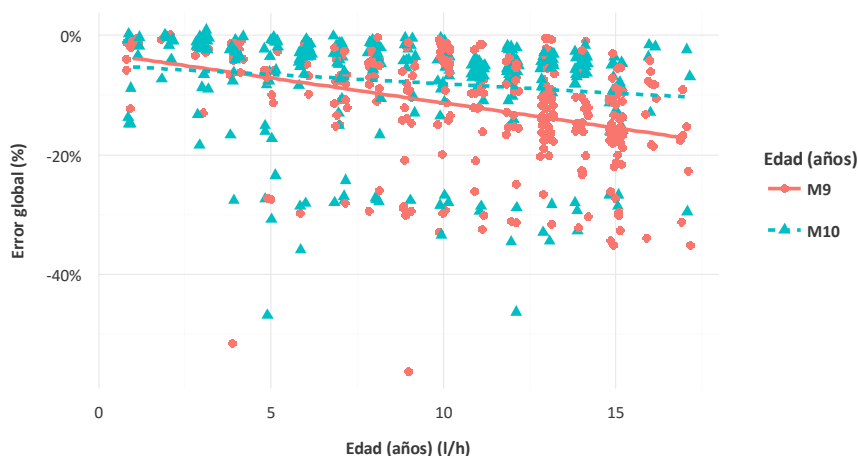


Figura A.53. Degradación del error global en función de la edad para el abastecimiento D

Tabla A.5. Parámetros estadísticos de la regresión (M9, M10)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F     | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|-------|-----|----------|
| 9    | M9     | Lineal      | 0.13       | 47.64 | 306 | 0.00E+00 |
|      |        | Polinómica  | 0.129      | 23.74 | 306 | 0.00E+00 |
|      |        | Logarítmica | 0.119      | 42.31 | 306 | 0.00E+00 |
| 10   | M10    | Lineal      | 0.0187     | 7.053 | 316 | 8.32E-03 |
|      |        | Polinómica  | 0.0166     | 3.686 | 316 | 2.62E-02 |
|      |        | Logarítmica | 0.01987    | 7.427 | 316 | 6.78E-03 |

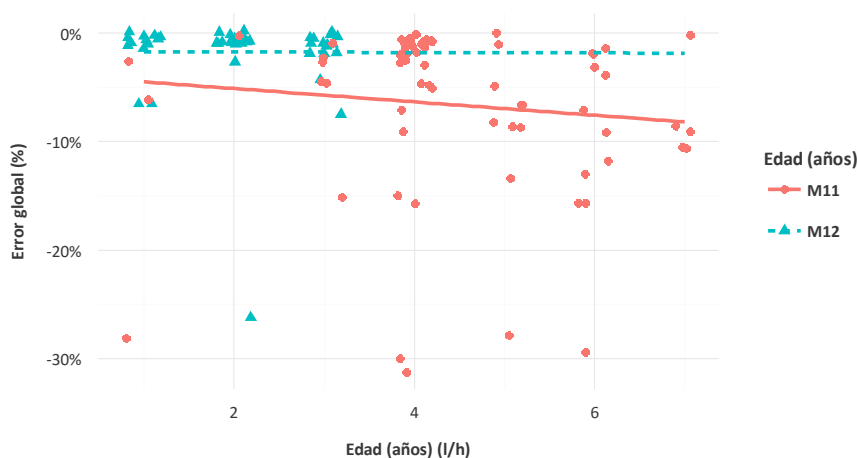


Figura A.54. Degradación del error global en función de la edad para el abastecimiento D

Tabla A.6. Parámetros estadísticos de la regresión (M11, M12)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F      | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|--------|-----|----------|
| 11   | M11    | Lineal      | -0.0034    | 0.7684 | 67  | 3.83E-01 |
|      |        | Polinómica  | 0.0169     | 1.587  | 67  | 2.12E-01 |
|      |        | Logarítmica | -0.0143    | 0.0391 | 67  | 8.44E-01 |
| 12   | M12    | Lineal      | -0.0217    | 0      | 46  | 9.76E-01 |
|      |        | Polinómica  | -0.041     | 0.074  | 46  | 9.28E-01 |
|      |        | Logarítmica | -0.0215    | 0.0089 | 46  | 9.25E-01 |

Anexo A.3.2 Grupos de volumen acumulado

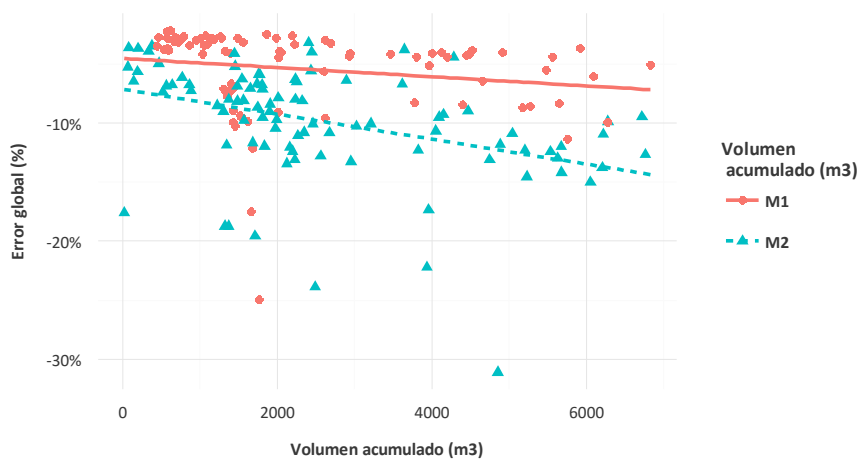


Figura A.55. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento A

Tabla A.7. Parámetros estadísticos de la regresión (M1, M2)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F     | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|-------|-----|----------|
| 13   | M1     | Lineal      | 0.02283    | 2.869 | 79  | 9.43E-02 |
|      |        | Polinómica  | 0.02983    | 2.23  | 79  | 1.14E-01 |
|      |        | Logarítmica | 0.05408    | 5.574 | 79  | 2.07E-02 |
| 14   | M2     | Lineal      | 0.1441     | 16.15 | 89  | 0.00E+00 |
|      |        | Polinómica  | 0.1481     | 8.825 | 89  | 0.00E+00 |
|      |        | Logarítmica | 0.093      | 10.19 | 89  | 2.00E-03 |

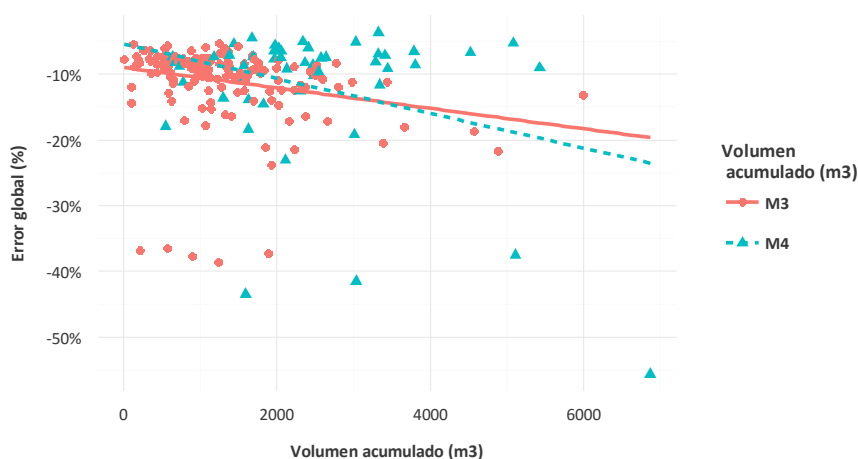


Figura A.56. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento B

Tabla A.8. Parámetros estadísticos de la regresión (M3, M4)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F     | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|-------|-----|----------|
| 15   | M3     | Lineal      | 0.05155    | 9.587 | 157 | 2.30E-03 |
|      |        | Polinómica  | 0.0454     | 4.765 | 157 | 9.80E-03 |
|      |        | Logarítmica | 0.0255     | 5.138 | 157 | 2.48E-02 |
| 16   | M4     | Lineal      | 0.08649    | 5.639 | 48  | 2.16E-02 |
|      |        | Polinómica  | 0.2517     | 9.24  | 48  | 4.00E-04 |
|      |        | Logarítmica | 0.1699     | 1.942 | 48  | 1.70E-01 |

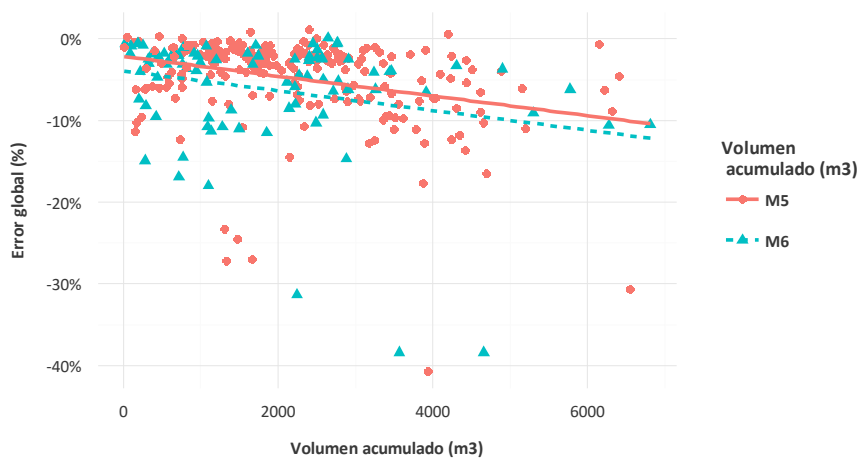


Figura A.57. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento C

Tabla A.9. Parámetros estadísticos de la regresión (M5, M6)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F     | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|-------|-----|----------|
| 17   | M5     | Lineal      | 0.0873     | 21.28 | 211 | 6.88E-06 |
|      |        | Polinómica  | 0.0967     | 12.35 | 211 | 8.50E-06 |
|      |        | Logarítmica | 0.0392     | 9.666 | 211 | 2.10E-03 |
| 18   | M6     | Lineal      | 0.0524     | 5.589 | 82  | 2.04E-02 |
|      |        | Polinómica  | 0.0407     | 2.761 | 82  | 6.92E-02 |
|      |        | Logarítmica | 0.044      | 4.831 | 82  | 3.07E-02 |

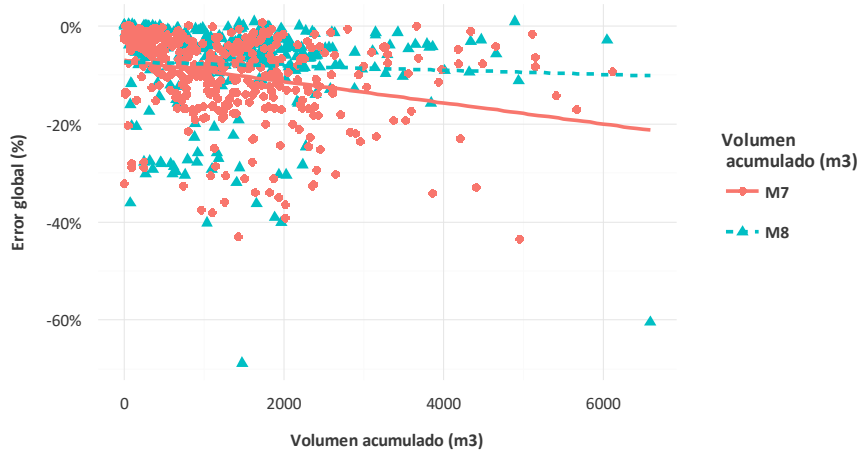


Figura A.58. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento D

Tabla A.10. Parámetros estadísticos de la regresión (M7, M8)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F      | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|--------|-----|----------|
| 19   | M7     | Lineal      | 0.0717     | 32.21  | 403 | 0.00E+00 |
|      |        | Polinómica  | 0.1017     | 23.87  | 403 | 0.00E+00 |
|      |        | Logarítmica | 0.08       | 36.16  | 403 | 0.00E+00 |
| 20   | M8     | Lineal      | -0.001     | 0.6657 | 312 | 4.15E-01 |
|      |        | Polinómica  | 0.01       | 2.62   | 312 | 7.44E-02 |
|      |        | Logarítmica | 0          | 1.174  | 312 | 2.80E-01 |

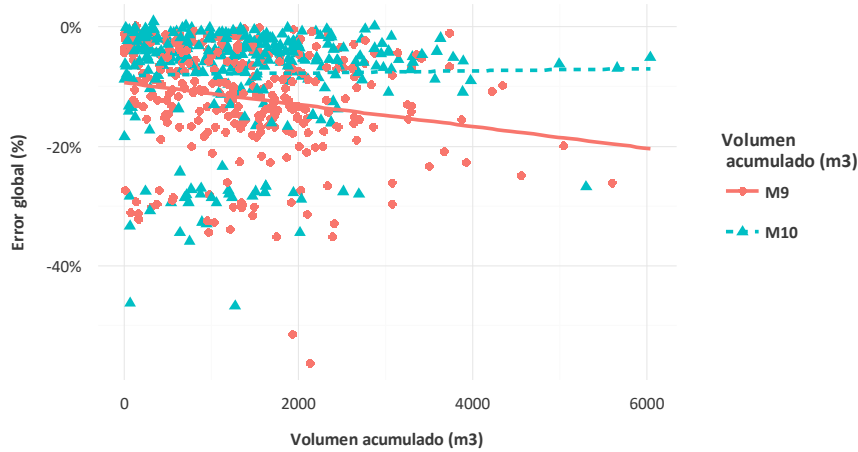


Figura A.59. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento D

Tabla A.11. Parámetros estadísticos de la regresión (M9, M10)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F      | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|--------|-----|----------|
| 21   | M9     | Lineal      | 0.0364     | 12.6   | 306 | 4.00E-04 |
|      |        | Polinómica  | 0.0371     | 6.923  | 306 | 1.10E-03 |
|      |        | Logarítmica | 0.043      | 14.92  | 306 | 1.40E-04 |
| 22   | M10    | Lineal      | -0.003     | 0.1464 | 316 | 7.02E-01 |
|      |        | Polinómica  | -0.0055    | 0.1385 | 316 | 8.71E-01 |
|      |        | Logarítmica | -0.0015    | 0.5152 | 316 | 4.73E-01 |

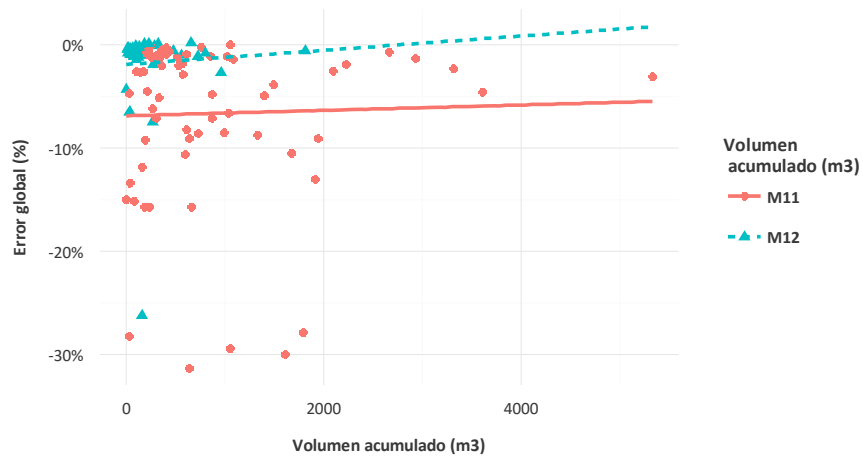


Figura A.60. Degradación del error global en función del volumen acumulado para el abastecimiento D

Tabla A.12. Parámetros estadísticos de la regresión (M11, M12)

| Comb | Modelo | Regresión   | R-Cuadrado | F      | Gl. | P-valor  |
|------|--------|-------------|------------|--------|-----|----------|
| 23   | M11    | Lineal      | -0.01384   | 0.0717 | 67  | 7.90E-01 |
|      |        | Polinómica  | -0.01738   | 0.4193 | 67  | 6.59E-01 |
|      |        | Logarítmica | -0.0063    | 0.5719 | 67  | 4.52E-01 |
| 24   | M12    | Lineal      | -0.0186    | 0.1406 | 46  | 7.09E-01 |
|      |        | Polinómica  | -0.0412    | 0.0695 | 46  | 9.33E-01 |
|      |        | Logarítmica | -0.02      | 0.0473 | 46  | 8.29E-01 |

## Anexo A.4 Regresiones

| Comb. | Modelo | Regresión            | a        | b       | c       | R-Cuadrado | F     | P-valor |
|-------|--------|----------------------|----------|---------|---------|------------|-------|---------|
| 25    | M1     | Lineal - Lineal      | -0.639%  | -0.629% | 0.000%  | 0.31       | 6.09  | 0.02    |
| 26    | M1     | Lineal - Logarítmica | -0.909%  | -0.554% | -0.200% | 0.23       | 3.99  | 0.10    |
| 27    | M1     | Logarítmica - Lineal | -3.248%  | -0.549% | 0.000%  | 0.21       | 3.50  | 0.20    |
| 28    | M1     | Log - Log            | -1.573%  | 0.375%  | -0.599% | 0.15       | 2.40  | 0.73    |
| 29    | M2     | Lineal - Lineal      | -5.314%  | -0.517% | -0.001% | 0.28       | 5.06  | 0.31    |
| 30    | M2     | Lineal - Logarítmica | -6.493%  | 1.242%  | -1.367% | 0.47       | 11.59 | 0.07    |
| 31    | M2     | Logarítmica - Lineal | -6.651%  | -1.004% | -0.001% | 0.36       | 7.36  | 0.04    |
| 32    | M2     | Log - Log            | 0.743%   | 2.541%  | -2.001% | 0.51       | 13.48 | 0.02    |
| 33    | M3     | Lineal - Lineal      | -7.330%  | -0.370% | -0.001% | 0.31       | 8.96  | 0.02    |
| 34    | M3     | Lineal - Logarítmica | -3.721%  | -0.343% | -0.801% | 0.36       | 10.84 | 0.02    |
| 35    | M3     | Logarítmica - Lineal | -8.966%  | -0.502% | -0.001% | 0.24       | 6.29  | 0.16    |
| 36    | M3     | Log - Log            | -4.595%  | -0.091% | -1.038% | 0.26       | 6.95  | 0.83    |
| 37    | M4     | Lineal - Lineal      | -5.809%  | -0.390% | -0.001% | 0.04       | 0.50  | 0.43    |
| 38    | M4     | Lineal - Logarítmica | -4.634%  | -0.199% | -0.685% | 0.06       | 0.67  | 0.73    |
| 39    | M4     | Logarítmica - Lineal | -7.887%  | -1.384% | 0.000%  | 0.05       | 0.65  | 0.35    |
| 40    | M4     | Log - Log            | -6.959%  | -0.780% | -0.442% | 0.05       | 0.63  | 0.85    |
| 41    | M5     | Lineal - Lineal      | -3.115%  | 0.063%  | -0.001% | 0.09       | 2.51  | 0.86    |
| 42    | M5     | Lineal - Logarítmica | -1.287%  | 0.207%  | -0.700% | 0.05       | 1.29  | 0.59    |
| 43    | M5     | Logarítmica - Lineal | -2.713%  | -0.064% | -0.001% | 0.08       | 2.50  | 0.94    |
| 44    | M5     | Log - Log            | 1.596%   | 1.574%  | -1.269% | 0.06       | 1.87  | 0.24    |
| 45    | M6     | Lineal - Lineal      | -6.494%  | 0.476%  | -0.001% | 0.20       | 3.79  | 0.13    |
| 46    | M6     | Lineal - Logarítmica | -5.572%  | 0.996%  | -0.741% | 0.28       | 5.88  | 0.01    |
| 47    | M6     | Logarítmica - Lineal | -3.732%  | -0.149% | -0.001% | 0.14       | 2.47  | 0.75    |
| 48    | M6     | Log - Log            | -0.533%  | 1.462%  | -1.005% | 0.15       | 2.62  | 0.13    |
| 49    | M7     | Lineal - Lineal      | -0.358%  | -0.976% | -0.001% | 0.31       | 23.90 | 0.00    |
| 50    | M7     | Lineal - Logarítmica | 5.467%   | -0.913% | -1.281% | 0.30       | 22.76 | 0.00    |
| 51    | M7     | Logarítmica - Lineal | -2.398%  | -3.770% | -0.001% | 0.20       | 13.14 | 0.00    |
| 52    | M7     | Log - Log            | -2.077%  | -3.634% | -0.358% | 0.17       | 10.96 | 0.00    |
| 53    | M8     | Lineal - Lineal      | -0.982%  | -0.806% | 0.001%  | 0.32       | 22.37 | 0.00    |
| 54    | M8     | Lineal - Logarítmica | -2.768%  | -0.836% | 0.419%  | 0.32       | 22.25 | 0.00    |
| 55    | M8     | Logarítmica - Lineal | -2.744%  | -3.060% | 0.001%  | 0.20       | 12.10 | 0.00    |
| 56    | M8     | Log - Log            | -10.512% | -4.705% | 1.800%  | 0.28       | 18.61 | 0.00    |
| 57    | M9     | Lineal - Lineal      | -0.806%  | -0.917% | -0.001% | 0.31       | 22.20 | 0.00    |
| 58    | M9     | Lineal - Logarítmica | 2.084%   | -0.881% | -0.786% | 0.29       | 19.92 | 0.00    |
| 59    | M9     | Logarítmica - Lineal | -2.555%  | -3.606% | -0.001% | 0.22       | 13.73 | 0.00    |
| 60    | M9     | Log - Log            | -4.917%  | -3.918% | 0.167%  | 0.19       | 11.48 | 0.00    |
| 61    | M10    | Lineal - Lineal      | -5.778%  | -0.400% | -0.001% | 0.10       | 4.94  | 0.01    |
| 62    | M10    | Lineal - Logarítmica | -5.969%  | -0.381% | 0.202%  | 0.07       | 3.47  | 0.01    |
| 63    | M10    | Logarítmica - Lineal | -6.153%  | -1.695% | 0.001%  | 0.09       | 4.21  | 0.01    |



|    |     |                      |          |         |        |      |      |      |
|----|-----|----------------------|----------|---------|--------|------|------|------|
| 64 | M10 | Log - Log            | -9.582%  | -2.332% | 0.892% | 0.09 | 4.04 | 0.01 |
| 65 | M11 | Lineal - Lineal      | -3.181%  | -1.049% | 0.001% | 0.31 | 4.23 | 0.03 |
| 66 | M11 | Lineal - Logarítmica | -3.123%  | -1.136% | 0.335% | 0.17 | 1.93 | 0.07 |
| 67 | M11 | Logarítmica - Lineal | -6.459%  | -1.194% | 0.001% | 0.24 | 3.07 | 0.08 |
| 68 | M11 | Log - Log            | -11.966% | -3.722% | 1.657% | 0.25 | 3.10 | 0.02 |
| 69 | M12 | Lineal - Lineal      | -1.675%  | -0.062% | 0.001% | 0.55 | 2.42 | 0.75 |
| 70 | M12 | Lineal - Logarítmica | -1.463%  | -0.064% | 0.042% | 0.06 | 0.12 | 0.88 |
| 71 | M12 | Logarítmica - Lineal | -1.829%  | -0.068% | 0.001% | 0.59 | 2.84 | 0.52 |
| 72 | M12 | Log - Log            | -2.944%  | -0.628% | 0.336% | 0.31 | 0.91 | 0.28 |