



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**ESTUDIO SOBRE LAS LEYES DE  
DEPENDENCIA DE LAS FUGAS CON LA  
PRESIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN  
URBANA, Y SU VERIFICACIÓN  
EXPERIMENTAL.**

AUTOR: Ricardo Alberola Zorrilla

TUTOR: Fernando Martínez Alzamora

COTUTORA: Pilar Conejos Fuertes

**Curso Académico: 2017-18**



*Este trabajo está dedicado a todas las personas que,  
directa o indirectamente, lo han hecho posible.*





**Título:** Estudio sobre las leyes de dependencia de las fugas con la presión en redes de distribución de agua, y su verificación experimental.

**Títol:** Estudi sobre les lleis de dependència de les fugues amb la pressió en xarxes de distribució d'aigua, i la seua verificació experimental.

**Title:** Study on the laws of leaks dependence with pressure in water distribution networks, and its experimental verification.

**Palabras clave:** fugas, dependencia con la presión, rotura, fugas latentes, ensayos, régimen laminar, monitorización fugas, distribución fugas, sectorización.

**Paraules clau:** fugues, dependència amb la pressió, ruptura, fugues latents, assajos, règim laminar, monitorització fugues, distribució fugues, sectorització.

**Key words:** leakage, dependence on pressure, rupture, latent leakage, tests, laminar regime, leakage monitoring, leakage distribution, sectorization.

## Castellano

En los últimos años se han publicado diversos trabajos sobre la dependencia de las fugas con la presión en las redes de distribución de agua urbanas, observándose importantes discrepancias respecto a la ley potencial de exponente 0,5 propuesta por Torricelli para representar las descargas directas a la atmósfera. Al aplicar la ley potencial a redes reales, se han reportado en la bibliografía casos en los que el exponente varía desde 0,18 hasta 2,3 sin poder dar razones claras de las causas que provocan dicha variación tan importante.

En este TFM se pretende estudiar las diferentes leyes que determinan el comportamiento de las pérdidas de agua en las redes urbanas, soportado por ensayos experimentales.

Para ello, y mediante un montaje de laboratorio preparado específicamente para la realización de ensayos de fugas, tanto provocadas como reales, se ha caracterizado el comportamiento de algunos tipos de grietas y roturas usuales frente a la presión. Se podrán medir valores del caudal y la presión y relacionarse con la velocidad de circulación, recorrido de la fuga, material de la conducción, edad, desgaste, etc. a fin de obtener un conjunto experimental más amplio que pueda dar soporte a nuevas teorías.

El trabajo se ha completado con la medida experimental del comportamiento de las fugas reales en un pequeño sector de la red de agua potable de la ciudad de Valencia.

Finalmente se propondrá una metodología para distribuir las fugas entre los diferentes nudos de un sector de la red de agua potable de Valencia, basada en las conclusiones extraídas de los nuevos modelos.

Un mejor entendimiento del comportamiento de las fugas con la presión puede conducir a una política óptima para regular las presiones en redes sectorizadas, o para mejorar los sistemas de detección de fugas, lo que finalmente conducirá a un ahorro de los costes económicos, y un mayor cuidado del medio ambientales y de salud pública.

## **Valencià:**

En els últims anys s'han publicat diversos treballs sobre la dependència de les fugues en la pressió en les xarxes de distribució d'aigua urbanes, observant-se importants discrepàncies respecte a la llei potencial d'exponent 0,5 proposat per Torricelli per a representar les descarregues directes a l'atmosfera. A l'aplicar la llei potencial a xarxes reals, s'han reportat en la bibliografia casos en els que l'exponent varia des de 0,18 fins 2,3 sense poder donar raons clares de les causes que provoquen dita variació tan important.

En aquest TFM es pretén estudiar les diferents lleis que determinen el comportament de les pèrdues d'aigua en les xarxes urbanes, suportat per assajos experimentals.

Per a això, i mitjançant un muntatge de laboratori preparat específicament per a la realització d'assajos de fugues, tant provocades com reals, s'ha caracteritzat el comportament dels diferents tipus d'esquerdes i trencaments usuals en front de la pressió. Es podran mesurar valors de cabal i la pressió i es relacionaran amb la velocitat de circulació, recorregut de les fugues, material de la circulació, edat, desgast, etc. a fi d'obtenir un conjunt experimental més ample que puga donar suport a noves teories.

El treball s'ha completat en la mesura experimental del comportament de les fugues reals en un menut sector de la xarxa d'aigua potable de la ciutat de València.

Finalment se proposarà una metodologia per a distribuir les fugues entre els diferents nusos d'un sector de la xarxa d'aigua potable de València, basada en les conclusions extretes dels nous models.

Un millor enteniment del comportament de les fugues amb la pressió pot conduir a una política òptima per regular les pressions en xarxes sectoritzades, o per millorar els sistemes de detecció de fugues, el que finalment conduirà a un estalvi dels costos econòmics, i un major cuidat mediambiental i de la salut pública.

## English

In recent years, several studies have been published on the dependence of leakage and pressure on urban water distribution networks, with important discrepancies regarding the potential law of exponent 0,5 proposed by Torricelli to represent direct discharges to the atmosphere. When applying the potential law to real networks, cases have been reported in the literature in which the exponent varies from 0,18 to 2,3 without being able to give clear reasons for the causes that cause such a significant variation.

This TFM aims to study the different laws that determinate the behavior of water losses in urban networks, supported by experimental tests.

To do this, and by means of a laboratory assembly prepared specifically for conducting leak tests, both provoked and real, the behavior of some types of cracks and breaks has been characterized against pressure. Flow and pressure values can be measured and related to the flow velocity, leakage, path, conduction material, age, etc. in order to obtain a broader experimental set that can support new theories.

The work has been completed with the experimental measurement of the behavior of real leaks in a small sector of the drinking water network of the city of Valencia.

Finally, a methodology will be proposed to distribute leaks between the different nodes of a sector of the Valencia drinking water network, based on the conclusions drawn from the new models.

A better understanding of the behavior of leakage with pressure can lead to an optimal policy to regulate the pressures in sectorized networks, or to improve leak detection systems, which will ultimately lead to savings in economic costs, and a greater care of the environmental and public health.

## Índice

1.	Memoria descriptiva de la beca de colaboración.....	- 9 -
1.1	Marco contextual .....	- 9 -
1.2	Motivación .....	- 9 -
1.3	Objetivos del presente trabajo .....	- 10 -
1.4	Planteamiento del resto del Trabajo de Fin de Máster .....	- 10 -
2	Estado del arte .....	- 11 -
2.1	Introducción .....	- 11 -
2.2	Definiciones.....	- 13 -
2.3	Revisión bibliográfica.....	- 16 -
2.3.1	Métodos directos de detección de fugas.....	- 16 -
2.3.2	Elementos finitos y FAVAD.....	- 18 -
2.3.3	Localización de fugas y ubicación de sensores .....	- 21 -
2.3.4	Ensayos experimentales.....	- 24 -
2.3.5	Modelos de calidad del agua .....	- 27 -
2.3.6	Otras contribuciones.....	- 29 -
2.4	Biblioteca de publicaciones para consulta .....	- 31 -
2.5	Conclusiones de la revisión bibliográfica .....	- 32 -
3	Construcción de un banco de pruebas para el estudio de las fugas.....	- 34 -
3.1	Introducción .....	- 34 -
3.2	Objetivos del banco de ensayos .....	- 35 -
3.3	Esquema básico de la instalación.....	- 36 -
3.4	Selección de componentes.....	- 40 -
3.5	Funciones de transmisión de datos .....	- 57 -
3.6	Ensayos de calibración.....	- 58 -
3.6.1	Conceptos a usar en los ensayos del banco de pruebas .....	- 58 -
3.6.2	Ensayo de calibración de calderín .....	- 59 -
3.6.3	Ensayo de calibración de los caudalímetros .....	- 61 -
3.6.4	Calibración del segundo caudalímetro.....	- 64 -
3.7	Protocolos de actuación.....	- 65 -
3.7.1	Ensayo de grandes caudales con caudal pasante .....	- 65 -
3.7.2	Ensayo sin caudal pasante en el que los caudalímetros entran en rango de medida.....	- 67 -
3.7.3	Ensayo sin caudal pasante en el que los caudalímetros no entran en rango de medida.....	- 70 -

4	Resultados de los ensayos en el banco de pruebas .....	- 72 -
4.1	Introducción .....	- 72 -
4.2	Comprobación del correcto funcionamiento del banco.....	- 73 -
4.3	Ficheros de salida de resultados .....	- 74 -
4.4	Tratamiento de la información .....	- 76 -
4.5	Resultados de los primeros ensayos .....	- 77 -
4.6	Elementos a ensayar. Leyes de fugas .....	- 80 -
4.6.1	Ensayo de un tubo “picado” .....	- 80 -
4.6.2	Ensayo de un tubo “picado” enterrado.....	- 82 -
4.6.3	Ensayo de una grieta longitudinal.....	- 85 -
4.6.4	Ensayo de un orificio circular .....	- 87 -
4.7	Conclusiones .....	- 89 -
5	Ensayo de un sector real: San Marcelino.....	- 90 -
5.1	Justificación y objetivos .....	- 90 -
5.2	Selección del sector.....	- 91 -
5.3	Programa de ensayos.....	- 94 -
5.4	Objetivos a estudiar en este ensayo .....	- 95 -
5.5	Carga de las demandas registradas y caudales inyectados.....	- 96 -
5.6	Tratamiento de la información .....	- 98 -
5.7	Resultado de los ensayos.....	- 101 -
5.8	Ley de fugas para el sector.....	- 103 -
5.9	Conclusiones.....	- 108 -
6	Conclusiones generales del trabajo .....	- 109 -
7	Bibliografía. Fuentes consultadas .....	- 110 -
6.1	Revisión bibliográfica.....	- 110 -
6.2	Búsqueda de equipos y componentes comerciales .....	- 113 -
6.3	Manuales de funcionamiento .....	- 113 -
6.4	Tratamiento de datos.....	- 114 -
6.5	Otras fuentes .....	- 114 -
	Anexo I: Preparación y obtención de datos de un sensor ficticio.....	- 115 -
	Anexo II. Informe de visitas a las reparaciones de fugas .....	- 120 -
	Martes 23 de Enero.....	- 121 -
	Miércoles 24 de Enero .....	- 126 -
	Jueves 25 de Enero .....	- 131 -
	Viernes 26 de Enero.....	- 135 -
	Detalles a remarcar para el banco de ensayos.....	- 139 -

Anexo III. Presupuesto y planos generales del banco de ensayos..... - 140 -





## Índice de imágenes, gráficas y tablas.

Figura 1: Cantidad de publicaciones anuales con la palabra “Leakage”. Fuente: ScienceDirect.com.....	12 -
Figura 2. Frecuencias naturales de la fuga. Alberto Martini et al. (2015).....	16 -
Figura 3. Diferentes correlaciones sonoras en función del material alrededor de la fuga. J.D. Butterfield et al. (2017). ....	17 -
Figura 4. Aumento del tamaño de la grieta por efecto de la presión. Jakobus E. Van Zyl et al. (2013). ....	18 -
Figura 5. Comportamiento de todos los exponentes posibles de las fugas según el planteamiento FAVAD. E. Van Zyl et al. (2014). ....	19 -
Figura 6. Estudio del concentrador de tensiones en la grieta por elementos finitos. Chunshun Zhang et al. (2017). ....	19 -
Figura 7. Obtención de los Leakage Number y Leakage Exponent al aplicar el planteamiento FAVAD a una red real. E. Van Zyl et al. (2014).....	20 -
Figura 8. Red con sensores reales y ficticios. Isaac Okeya et al. (2015).....	21 -
Figura 9. Resultado de algoritmo localizador con diferentes incertidumbres. David Bernhard Steffelbauer et al. (2016).....	22 -
Figura 10. Resultado de algoritmo de colocación de sensores por coberturas. Symeon E. Christodoulou et al. (2013). ....	23 -
Figura 11. Resultados experimentales de aumento de caudal y área a presión constante. S. Fox et al. (2014). ....	24 -
Figura 12. Diferentes curvas de comportamiento en la carga y en la descarga. Bruno Brunone et al. (2011). ....	24 -
Figura 13. Pérdida de presión en la fuga en función del ratio de caudal total “r”. Bruno Brunone et al. (2013). ....	25 -
Figura 14. Comportamiento de la fuga en sellos elásticos. S. Fox et al. (2014). ....	25 -
Figura 15. Efecto al aumentar la frecuencia de muestreo en una señal. S. Fox et al. (2014). ....	27 -
Figura 16. Detección de contaminantes químicos por variación en la concentración de cloro. D. G. Eliades et al. (2014). ....	28 -
Figura 17. Resultados de su algoritmo minimizador de presiones. Filippo Pecci et al. (2015). ....	29 -
Figura 18. Resultados de su algoritmo agrupador de clústeres por comportamiento de los nodos. J.K. Kirstein et al. (2015).....	30 -
Figura 19. Ejemplo de publicación alojada en el fichero-biblioteca para su consulta.-	31 -
-	-
Figura 20. Ejemplo de publicación en el fichero-biblioteca para su consulta, con el comentario que resume las conclusiones del mismo. ....	31 -
Figura 21. Esquema de funcionamiento de su instalación de ensayos de fugas. Bruno Brunone et al. (2011). ....	36 -
Figura 22. Esquema del cajón utilizado para confinar la fuga, y dimensiones del mismo. ....	37 -
Figura 23. Esquema del banco de ensayos propuesto, con todos sus elementos...-	38 -
Figura 24. Lista de los componentes que forman parte del banco de ensayos. ....	39 -
Figura 25. Depósito de reserva no presurizado usado en el banco de ensayos.....	40 -
Figura 26. Curvas de las bombas a velocidad nominal y reducida. ....	41 -
Figura 27. Datos y dimensiones del grupo de bombeo, según su catálogo.....	41 -

Figura 28. Catálogo de los modelos de calderines disponibles y sus características.-	42
-	
Figura 29. Calderín usado en el banco de pruebas.....	42 -
Figura 30. Válvula reguladora de presión usada en el banco de pruebas. ....	43 -
Figura 31. Datos de cavitación de la válvula reguladora de presión usada en el banco de pruebas.....	43 -
Figura 32. Datos de catálogo de los caudalímetros usados en el banco de pruebas.-	44
-	
Figura 33. Caudalímetro instalado en el banco de pruebas con sus distancias necesarias de funcionamiento. ....	44 -
Figura 34. Sensores de presión instalados en el banco de pruebas. ....	45 -
Figura 35. Datos de catálogo de los sensores de presión instalados en el banco de pruebas.....	46 -
Figura 36. Tubería instalada para su ensayo, y sus válvulas de corte antes y después de la misma. ....	46 -
Figura 37. Cajón de polietileno transparente para el ensayo de los defectos sin tierra. .-	47 -
Figura 38. Cajón de metal para el ensayo de los defectos enterrados. ....	47 -
Figura 39. Distribución de materiales en los ensayos con tierra.....	47 -
Figura 40. Datos de partida para los ensayos con tierra. ....	48 -
Figura 41. Resultados de peso del propio cajón de metal.....	48 -
Figura 42. Resultado del peso de los materiales usados para enterrar la fuga. ....	48 -
Figura 43. Resultado del peso total del cajón con la tierra en su interior.....	49 -
Figura 44. Grúa contrapesada manual comprada para el banco de fugas. ....	49 -
Figura 45. Capacidades de la grúa contrapesada manual comprada.....	49 -
Figura 46. Válvula reguladora de caudal instalada en el banco de ensayos. ....	50 -
Figura 47. Catálogo de prestaciones de la válvula reguladora de caudal instalada.-	50 -
Figura 48. Válvula de corte instalada para independizar el calderín.....	51 -
Figura 49. Detalle de la válvula de corte para aislar el cajón con el defecto.....	51 -
Figura 50. Detalle de la válvula de corte para eliminar la recirculación al depósito. -	51 -
Figura 51. Foto de la báscula instalada bajo el depósito no presurizado.....	52 -
Figura 52. Características básicas de la báscula bajo el depósito no presurizado. .-	52 -
Figura 53. Variador de frecuencia de las bombas. ....	53 -
Figura 54. Plano a escala de la instalación, visto desde arriba. ....	54 -
Figura 55. Plano a escala de la instalación, corte A. ....	54 -
Figura 56. Plano a escala de la instalación, corte B. ....	55 -
Figura 57. Plano a escala de la instalación, corte C.....	55 -
Figura 58. Plano a escala de la instalación, corte D.....	55 -
Figura 59. Plano a escala de la instalación, corte E.....	55 -
Figura 60. Ampliación de la lista de componentes de la instalación, incluyendo el entorno. ....	56 -
Figura 61. Esquema de funcionamiento de la instalación para la calibración de los calderines. ....	59 -
Figura 62. Esquema de funcionamiento de la instalación para la calibración de los caudalímetros. ....	61 -
Figura 63. Esquema de funcionamiento de la instalación, en condiciones normales de funcionamiento. ....	65 -

Figura 64. Esquema de funcionamiento de la instalación, en condiciones de funcionamiento sin caudal pasante.....	- 67 -
Figura 65. Esquema de funcionamiento de la instalación, en condiciones de funcionamiento sin caudal pasante, en el que los caudalímetros no entran en rango de medida.....	- 70 -
Figura 66. Elemento dañado por presión excesiva. ....	- 73 -
Figura 67. Pantalla de visualización de resultados.....	- 74 -
Figura 68. Fragmento del fichero de salida del banco de ensayos.....	- 75 -
Figura 69. Fragmento del fichero de salida del banco de ensayos con error en los datos.....	- 76 -
Figura 70. Datos del banco de ensayos tras pasarlos a limpio.....	- 76 -
Figura 71. Gráfico de resultados del banco tras el manejo de la válvula reguladora de caudal.....	- 77 -
Figura 72. Gráfico de resultados del banco tras el manejo de la válvula reguladora de presión.....	- 77 -
Figura 73. Datos del banco de ensayos que muestra estabilidad de los caudalímetros. -	78 -
Figura 74. Resultados del banco de ensayos antes de filtrar los datos. ....	- 78 -
Figura 75. Resultados del banco de ensayos después de filtrar los datos. ....	- 79 -
Figura 76. “Picado” del tubo resultado de presión excesiva sin debilitación previa del material.....	- 80 -
Figura 77. Comportamiento del tubo “picado” en el ensayo. ....	- 81 -
Figura 78. Ley de fugas del tubo “picado”.....	- 81 -
Figura 79. Enterramiento del tubo, mitad del proceso. ....	- 82 -
Figura 80. Enterramiento del tubo, resultado final.....	- 82 -
Figura 81. Tapón lateral para contener el agua.....	- 83 -
Figura 82. Resultado del ensayo con tierra.....	- 83 -
Figura 83. Ley de fugas del tubo “picado” enterrado.....	- 84 -
Figura 84. Comparativa de ambas leyes de fugas. ....	- 84 -
Figura 85. Imagen del defecto longitudinal.....	- 85 -
Figura 86. Comportamiento del defecto longitudinal durante el ensayo. ....	- 86 -
Figura 87. Ley de fugas del defecto longitudinal. ....	- 86 -
Figura 88. Imagen del orificio.....	- 87 -
Figura 89. Ley de fugas del orificio. ....	- 88 -
Figura 90. Vista aérea del sector de San Marcelino.....	- 91 -
Figura 91. Vista del programa QGIS del sector de San Marcelino. ....	- 92 -
Figura 92. Ampliación de la imagen anterior. ....	- 92 -
Figura 93. Vista del programa EPANET del sector de San Marcelino. ....	- 93 -
Figura 94. Calendario con las consignas para los ensayo del sector. ....	- 94 -
Figura 95. Formato de datos de las demandas de Emivasa.....	- 96 -
Figura 96. Ejemplo de lectura de datos no correctamente transmitidos. ....	- 97 -
Figura 97. Formato de datos de la entrada de agua al sector. ....	- 97 -
Figura 98. Resultados diarios del programa para calcular las demandas.....	- 98 -
Figura 99. Subsector estudiado y las acometidas instaladas en éste.....	- 99 -
Figura 100. Lista de las demandas preparadas para la obtención de resultados. ....	- 99 -
Figura 101. Diferentes curvas de modulación de demandas horarias del sector de San Marcelino. ....	- 100 -

Figura 102.Diferentes curvas de modulación horarias de la entrada del sector de San Marcelino.....	- 100 -
Figura 103.Resultados de demandas, presiones y caudal entrante total para el día 6 de Abril.....	- 101 -
Figura 104.Resultados de demandas, presiones y caudal entrante total para el día 26 de Abril.....	- 102 -
Figura 105.Diferencia entre los valores medios respecto a los horarios de caudal y presión, para el día 6 de Abril.....	- 102 -
Figura 106.Ley de entradas nocturna, tomando valores medios de 5 horas de mínimos nocturnos.....	- 103 -
Figura 107.Ley de agua no registrada nocturna, tomando valores medios de 5 horas de mínimos nocturnos.....	- 103 -
Figura 108.Ley de entradas nocturna, tomando la hora 1:00 de la noche de todos los días del mes.....	- 104 -
Figura 109.Ley de agua no registrada nocturna, tomando la hora 1:00 de la noche de todos los días del mes.....	- 104 -
Figura 110.Ley de entradas nocturna, tomando la hora 5:00 de la noche de todos los días del mes.....	- 105 -
Figura 111.Ley de agua no registrada nocturna, tomando la hora 5:00 de la noche de todos los días del mes.....	- 105 -
Figura 112.Ley de agua no registrada diurna, tomando la hora 15:00 del día de todos los días del mes.....	- 106 -
Figura 113.Ley de agua no registrada diurna, tomando la hora 16:00 del día de todos los días del mes.....	- 106 -
Figura 114.Ley de entradas nocturna, tomando la hora 1:00 de la noche a partir del 6de Abril.....	- 107 -
Figura 115.Ley de agua no registrada nocturna, tomando la hora 1:00 de la noche a partir del 6de Abril.....	- 107 -

# **1. Memoria descriptiva de la beca de colaboración**

## **1.1 Marco contextual**

La Cátedra Aguas de Valencia, en cuyo marco de actuaciones se engloba el presente TFM, desarrollado con el soporte de una beca de colaboración, es un acuerdo suscrito, entre la Universidad Politécnica de Valencia y Emivasa para el desarrollo de proyectos conjuntos de interés mutuo. Emivasa pretende profundizar en el estudio de algún problema de su interés, y la Universidad Politécnica de Valencia por su parte designa a un becario para aportar su conocimiento y trabajo para llevar adelante dicho estudio bajo la tutela de un profesor experto en el tema.

Se trata, pues, de un acuerdo conjunto en el que todas las partes salen beneficiadas. Emivasa consigue nuevos planteamientos e ideas para poder mejorar sus métodos de trabajo, ofrecer mejores servicios a la sociedad en su conjunto, y en general, ser más competitivos. La Universidad consigue información actualizada de las motivaciones y necesidades de las empresas actuales, establece lazos con ellas y ve aumentado su prestigio investigador y docente. Y el beneficiario de la beca obtiene una experiencia laboral, se embarca en la realización de un proyecto más ambicioso de lo usual, lo que redunda en beneficio de su currículum profesional al tiempo que culmina sus estudios con la realización del Trabajo Fin de Máster.

## **1.2 Motivación**

De todos los proyectos aprobados entre la Cátedra Aguas de Valencia y la Universidad Politécnica de Valencia, para llevar a cabo en el curso 2017-2018, este trabajo se centra en el estudio de la ley de dependencia de las fugas con la presión.

Se ha decidido proponer el desarrollo de este proyecto por diversos motivos. El primero es el poco trabajo experimental que existe actualmente en torno al comportamiento real de las fugas y sus causas. Por otra parte, los técnicos encargados del mantenimiento de las redes tienen la percepción que la presencia de la tierra compactada alrededor de las tuberías debe tener un alto impacto en el comportamiento de las fugas. Sin embargo, no hay estudios que hayan optado por abordar, aunque sea de manera aproximada, este fenómeno, y en muchos trabajos científicos se sigue planteando que las fugas se comportan como la descarga de un chorro libre a través de un orificio, esto es, con un exponente de influencia de la presión de valor 0,5.

El segundo motivo es la falta de planteamientos novedosos que permitan resolver, de una forma más rigurosa, el problema de la pérdida de agua en conducciones. Este problema afecta, en mayor o menor medida, a todas las redes del mundo. El presente trabajo puede servir para plantear nuevos caminos, o la mejora de los ya existentes, a fin de mejorar las técnicas para reducir las fugas, o para conseguir mayores ratios de detección de fugas, y por lo tanto, un ahorro en el suministro de agua urbana.

### **1.3 Objetivos del presente trabajo**

Los objetivos del presente trabajo son:

- Primero, revisar el estado del arte para saber exactamente el punto en el que se encuentra el estudio de las fugas, y con ello acotar mejor el alcance del proyecto, los pasos a seguir, e identificar los elementos innovadores planteados. El resultado de este trabajo se pretende que sirva también en el futuro para que Emivasa pueda utilizarlos para proponer nuevas vías de investigación y mejorar los trabajos ya desarrollados por otros autores.
- En segundo lugar, la construcción de un banco de pruebas que permita el estudio individualizado de las fugas, en aspectos no estudiados por otros autores o desde un punto de vista diferente. El banco debe cumplir con las especificaciones y objetivos concretos propuestos por Aguas de Valencia, y debe de quedar disponible para su uso en el futuro, una vez esta beca termine.
- En tercer lugar, la recopilación de los datos experimentales tomados durante los ensayos para obtener las leyes de comportamiento de la fuga con la presión en los casos estudiados. Los datos deben ser preparados y filtrados para una rápida visualización, y catalogados de forma que se pueda hacer una “biblioteca de fugas” a usar en todos los proyectos futuros que plantee Emivasa.
- Por último, la extrapolación de resultados a un sector real, para ver el grado de similitud al pasar de la ley de fugas de los distintos defectos a la ley de fugas agregada en un sector, y estudiar la posibilidad de saber, a partir de la ley agregada, la frecuencia de cada tipo de fallo estudiado en el banco de pruebas. La ley de fugas agregada del sector puede dar información valiosa sobre la mejor manera de minimizar las fugas en el mismo, así como determinar la oportunidad o no de lanzar una campaña de búsqueda y localización de las mismas.

### **1.4 Planteamiento del resto del Trabajo de Fin de Máster**

Cada uno de los objetivos antes propuestos se corresponde con cada una de las partes en que se ha estructurado el presente TFM, las cuales se completan con la presente introducción y unas conclusiones al final del documento. Las diferentes partes del TFM siguen un planteamiento secuencial, pues es necesaria la realización de las actividades previas para poder abordar con garantías los siguientes pasos del trabajo. Como anexos se adjuntan los planos de la instalación, presupuesto, y algunas actas de informes elaborados a lo largo del año de trabajo.

## **2 Estado del arte**

### **2.1 Introducción**

Las redes de distribución de agua, junto con las redes eléctricas, gas, saneamiento, etc. son uno de los pilares de la sociedad moderna. Sus aplicaciones son prácticamente tan amplias como los usuarios que se benefician de ellas.

Sin embargo no a todas se les da la misma importancia. Tradicionalmente las redes de agua han estado más desatendidas, en comparación a otras redes, lo que ha llevado a estructuras de edades medias elevadas, manejos poco óptimos, pérdidas de energía y agua, e incluso, desconocimiento de los elementos físicamente instalados. Sin embargo, en España y en otras muchas partes del mundo, hay un creciente interés en el manejo eficiente de las redes de distribución de agua, utilizando menos recursos naturales para conseguir el mismo o un mejor efecto, y lograr el menor impacto ambiental posible. También hay importantes mejoras en el campo de la toma y manejo de datos, y éstas se están aplicando a las redes tanto por mejorar su mantenimiento como por motivos de calidad del agua y de seguridad de los usuarios.

Y esto es debido a que, desde hace muchos años, investigadores de muchos países han sumado esfuerzos para tratar de solucionar, tanto local como globalmente, diferentes problemas asociados al uso del agua, desde su escasez hasta su calidad.

Las publicaciones para un mismo problema son tan variadas como problemas pueden ocurrir, y se ven influenciados por los factores propios de la red, la población a la que sirven, la situación geográfica y los medios de los que disponen para resolver estos problemas. Esto ha dado lugar a una bibliografía muy extensa, en la que es frecuente que diversos autores traten el mismo tema, atendiendo a sus restricciones propias.

Este trabajo, de todos los aspectos tratados en relación con la gestión del agua urbana, se centra en el estudio y comportamiento de las fugas. Es, sin duda, uno de los problemas que tradicionalmente ha recibido mayor atención en la gestión de las redes urbanas, tanto por los costes económicos asociados a las mismas, como por suponer un mal uso de un recurso tan escaso y no aprovechado. Desde hace algunos años las fugas se asocian con problemas de contaminación en el agua, y en casos extremos, pueden poner en peligro la integridad de otros elementos, provocando corrimientos de tierra, daños estructurales en edificios, salidas de agua al exterior, etc.

Por ello, y para tener una idea del estado del arte, se ha realizado esta revisión bibliográfica, la cual consta de aproximadamente 120 documentos revisados. Esa cantidad ha sido necesaria para poder, entre muchas cosas:

- Aprender sobre la plétora de técnicas relacionadas con la localización de fugas.
- Estudiar conceptos comúnmente aceptados y aplicados en este ámbito, pero muchas veces desconocidos en su verdadero significado y alcance.
- Entender todas las ramas de investigación posibles relacionadas con la gestión de las fugas.
- Saber la proporción aproximada de documentos publicados en cada una de esas ramas.
- Saber los intereses que se persiguen en cada una de esas ramas, el grado de detalle buscado, objetivos actualmente alcanzables, costes asociados, etc.
- Tener una idea de las relaciones que existen entre problemas y ramas de investigación en torno a las fugas, tanto expuestas directamente como implícitas.

Y, en resumen, tener una visión global sobre todos los problemas que afectan a las fugas, su localización y mitigación, y contribuir, en definitiva, en la medida de lo posible a la conservación de este recurso. El problema de las fugas afecta, en diferente grado, a todas las ciudades y países del mundo. Problema que es agravado, por otra parte, por la edad de los materiales en uso, por decisiones y políticas poco acertadas, por el crecimiento de las poblaciones, y por las presiones en sobreexplotar los recursos existentes, entre otros factores. Ello ha motivado que, en los últimos años, cada vez haya más conciencia sobre la necesidad de controlar y reducir las fugas en las redes urbanas, como muestra la cantidad creciente de publicaciones en este campo.



*Figura 1: Cantidad de publicaciones anuales con la palabra "Leakage". Fuente: ScienceDirect.com*

En esta revisión del estado del arte se comienza introduciendo un conjunto de conceptos necesarios para entender el resto del trabajo. A continuación, se hará un breve resumen de los trabajos analizados, y por último, se utilizarán algunos de ellos para ofrecer una visión global del estado del arte y justificar las conclusiones alcanzadas.



## 2.2 Definiciones

Dependiendo del año de publicación del documento, y de los temas concretos que trate, es posible que determinados conceptos aquí planteados se usen con algún matiz diferente de lo que aquí se escribe. Sin embargo, va a intentar reflejarse la versión comúnmente aceptada.

- **Water Distribution Network/System (WDN o WDS):** Hace referencia a un sistema hidráulico de transporte y distribución de agua a presión, destinada normalmente al uso urbano, aunque también podría tratarse de una red de riego o de tipo industrial. Puede abarcar toda una ciudad o solo partes de la misma, Incluye a las tuberías y los elementos de regulación tales como depósitos, bombas, válvulas de todo tipo, así como otros elementos auxiliares tales como acometidas, purgas, ventosas, sensores, etc. Puede estar formada por varias o una DMA.
- **District Metered Area (DMA):** Sub-zona de la WDN, bien en su interior o en la periferia cuya conexión con el resto de la red está limitada por un número reducido de entradas y salidas, siendo lo más usual disponer de una sola de ellas por seguridad. Las entradas/salidas de la DMA están usualmente equipadas con caudalímetros para controlar el caudal consumido en la zona en cada momento. En los puntos de entrada suele también colocarse una válvula reductora de presión independizando así las presiones de servicio en el interior de la DMA del resto de la red para controlar las fugas en su interior.
- **Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA):** Sistema de adquisición de datos en tiempo real de las variables más significativas de un sistema dinámico para su monitorización (telemetría) y posible control remoto (telemando). La monitorización de datos suele ir ligada con algún tipo de sinóptico para el seguimiento visual de la evolución del sistema, y generalmente está asociada a un sistema de gestión de alarmas para la supervisión de los valores fuera de rango. Los datos adquiridos suelen almacenarse en algún tipo de memoria de fácil acceso para revisar situaciones pasadas, o bien se almacenan de forma sintetizada en una BdD (Behavior-driven Development) para posteriores tareas de gestión. Entre ellas destaca conocer mejor el comportamiento del sistema, solucionar e identificar problemas, cambiar el comportamiento global, planificar actuaciones futuras, etc. En ocasiones el sistema SCADA alimenta a un modelo, el cual puede hacer simulaciones de situaciones hipotéticas, siendo uno de los elementos clave en la detección telemática de fugas, al comparar la realidad con el modelo. La supervisión de un sistema hidráulico puede hacer referencia no solo a las variables hidráulicas como presiones, niveles, caudales, etc. sino también a medidas de la calidad del agua como concentración de cloro, conductividad, turbidez, etc. y detección de sustancias nocivas.

- **Modelo hidráulico:** Es una representación matemática del sistema físico que trata de reproducir su comportamiento real, y se utiliza principalmente para realizar simulaciones sobre su comportamiento en otras circunstancias. Además de incorporar las características físicas del sistema, será necesario declarar las cargas o demandas del mismo y las leyes de control que guían su respuesta, para configurar lo que se denomina un escenario de simulación. Como respuesta, el modelo proporciona los caudales circulantes por todas las tuberías y las presiones en todos los nudos. En el caso particular de simular el comportamiento de las fugas, éstas se consideran dependientes de las presiones en los puntos en el que se ubican, de modo que su caudal no está definido a priori y su valor formará parte de la respuesta del modelo. Un modelo puede reflejar únicamente las tuberías principales y algunos elementos de regulación, configurando lo que se denomina un modelo estratégico, o bien reflejar todos los elementos de la red para configurar un modelo de detalle, siendo éstos últimos los más indicados para simular las fugas.
- **Ecuación de la fuga:** Desarrollada inicialmente por Torricelli para expresar la descarga de depósitos a la atmósfera a través de orificios, es hoy en día la más utilizada en la literatura, después de algunas transformaciones, para expresar el comportamiento de las fugas en las redes de distribución de agua. Tiene una forma general de:

$$q = C_e * p^\gamma$$

Con valores del exponente  $\gamma$  en torno a 0,5 para las fugas de gran envergadura. Sin embargo, al aplicar correlaciones sobre los datos experimentales tomados en las redes reales, se han encontrado exponentes que van desde el 0,2 hasta 3 en casos extremos.

- **Concepto FAVAD:** Concepto desarrollado en 1994 por John May, cuyo objetivo principal fue explicar el comportamiento de las fugas y la razón de porqué el exponente se aleja del valor de 0,5 asumido tradicionalmente. Será desarrollado más adelante.

- **Pressure reducing valve (PVR), o válvula reguladora de presión:** Válvula de actuación automática que permite, independientemente del caudal que circule a través de ella y de la presión aguas arriba (entre ciertos límites) mantener un valor constante de la presión aguas abajo. Usada tradicionalmente en WDS por motivos de seguridad, empiezan a ser empleadas ampliamente para la optimización energética de la red, la minimización de las fugas no detectables, alargar la vida de los materiales, etc.

A continuación, una vez expuestos los conceptos fundamentales, se va a hacer una revisión de las aportaciones más relevantes encontradas en la bibliografía revisada, las cuales se agrupan por temas conforme a la siguiente clasificación:

- Métodos directos de detección de fugas (vibraciones, infrarrojos, ultrasonidos).
- Elementos finitos o FAVAD.
- Localizadores de fugas y ubicación de sensores.
- Ensayos experimentales.
- Calidad del agua.
- Estudios sobre modelos, con otros objetivos diferentes, como por ejemplo minimización de la presión media en la red.

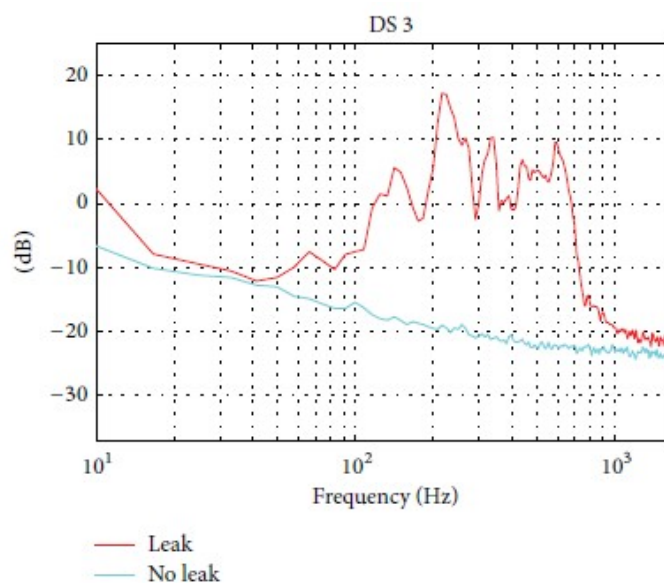
No todas las publicaciones pueden enmarcarse específicamente en uno de estos temas, pues muchas quedan a caballo entre varios de ellos al tener un carácter generalista. Así por ejemplo, es muy común que los agrupados en calidad del agua contengan también cierto trabajo experimental, o que los localizadores de fugas empleen diferentes exponentes basándose en la fuente consultada. Por ello, en la revisión que sigue a veces se mezclarán unos temas con otros, en función de los objetivos perseguidos por los autores.

## 2.3 Revisión bibliográfica

### 2.3.1 Métodos directos de detección de fugas

Los métodos directos para detectar fugas, se basan en el uso de sensores que tradicionalmente han requerido el desplazamiento de los operarios y la recolección de datos en el lugar físico de la fuga. Las fuentes consultadas son: Andrea Cataldo et al. (2014), Alberto Martini et al. (2015), Ahmed Atef et al. (2016), o J.D. Butterfield et al. (2017), entre otros.

De entre todos ellos, destacan los artículos que se centran en el tratamiento y recolección de señales acústicas. Sin embargo, el planteamiento de los métodos acústicos ha cambiado en los últimos años. Actualmente se centran en la optimización, la reducción de costes, y el empleo de sistemas SCADA para detectar en tiempo real el momento exacto en el que una fuga se produce, sin necesidad del desplazamiento del operario. La gran mayoría de los trabajos se basan en ciertos planteamientos para el tratamiento y filtrado de datos, y la cuantificación de la señal comparándola con y sin defecto, apoyados por experiencias en laboratorio, como los de Alberto Martini et al. (2015), J.D. Butterfield et al. (2017) y F.C.L Almeida et al. (2017). La matemática y el planteamiento es relativamente diverso, pero la mayoría coinciden en estudiar las frecuencias que van de los 200Hz a los 600Hz, pues esas son las frecuencias naturales en las que se manifiestan las fugas con mayor frecuencia. Como puede verse en la siguiente imagen.



*Figura 2. Frecuencias naturales de la fuga. Alberto Martini et al. (2015).*

Los investigadores tienen en cuenta el material del tubo y el entorno, y son conscientes de que materiales como el plástico pueden hacer de filtro paso bajo.

Se trata de un campo de actuación que tiene aún margen de mejora, e investigaciones tales como J.D. Butterfield et al. (2017) muestran planteamientos interesantes, al mostrar la influencia de la tierra de alrededor de la tubería en el comportamiento de las vibraciones. Los resultados de J.D. Butterfield et al. (2017) pueden verse en la siguiente imagen.

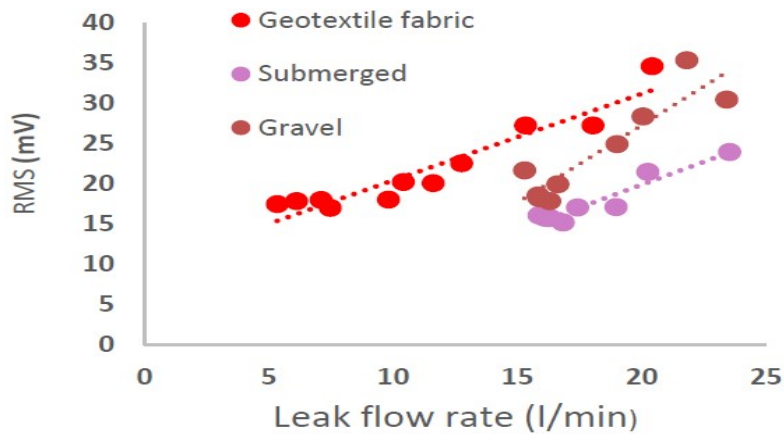


Figura 3. Diferentes correlaciones sonoras en función del material alrededor de la fuga. J.D. Butterfield et al. (2017).

J.D. Butterfield et al. (2017), en otras publicaciones, avanza un poco más al correlacionar el tamaño de la fuga con las vibraciones medidas, y sacar una fórmula empírica que relacione ambas variables. Esa fórmula no es igual en el caso de descarga atmosférica y sumergida en líquido o envuelta en una tela especial, y al final obtiene una fórmula para cada una de las situaciones.

La ventaja en este campo es que ya hay un amplio estudio sobre tratamiento de señales en otros entornos, y aplicarlo a estos nuevos planteamientos es relativamente sencillo. Así lo expone en sus ensayos F.C.L Almeida et al. (2017).

Desafortunadamente, su aplicación de la función signum no muestra ninguna mejora.

Otros sistemas directos, tales como Andrea Cataldo et al. (2014), se centran en magnitudes diferentes, pero siguen teniendo el mismo planteamiento de automatizar en la medida de lo posible los procesos. Se basa en el estudio de la conductividad eléctrica entre un tubo y un hilo de metal, en la cual variaciones bruscas en la conductividad se asocian con agua próxima, y por lo tanto fugas. Es uno de los pocos sistemas capaces de detectar con relativa fiabilidad más de una fuga por tubo, cosa que no puede ser realizada ni con ultrasonidos ni con la mayoría de sistemas presentes en esta bibliografía.

El ejemplo en el cual el tratamiento de datos destaca más es Ahmed Atef et al. (2016), centrado en detectar fugas mediante la variación de temperatura que produce en el suelo el agua estancada a cierta profundidad. Su tratamiento de datos permite pasar de imágenes termográficas complejas y de gran peso a imágenes binarias, que siguen pudiendo servir para la identificación de fugas de manera más rápida.

Todos estos sistemas a día de hoy acompañan a la identificación de fugas por medio de modelos, y sirven para poder refinar y concretar los resultados que los modelos dan. En un futuro es posible que sean pieza clave en aplicaciones puntuales tales como el sistema planteado por Alberto Martini et al. (2015), diseñado explícitamente para ser instalado en acometidas.

### 2.3.2 Elementos finitos y FAVAD

Otros autores estudian el comportamiento de las fugas intentando modelar la deformación de las fisuras, aplicando técnicas de elementos finitos. Entre ellos destacan los trabajos que utilizan las ecuaciones de FAVAD. Las fuentes consultadas son: Jakobus Ernst Van Zyl et al. (2014), Chunshun Zhang et al. (2017), Nouhar Samir et al. (2017), o Koen Van Minnebruggen et al. (2017), entre otros.

El concepto FAVAD (Fixed And Variable Area Discharge) fue desarrollado por John May en 1994. Intenta explicar los diferentes exponentes de fugas encontrados en ensayos experimentales, los cuales van de 0,21 hasta 3. Van Zyl ha validado este planteamiento gracias a sus estudios con elementos finitos. Los resultados de deformación del tubo por efecto de la presión muestran que las grietas, las cuales tienen diferente forma (longitudinal, espiral y circunferencial), experimentan concentraciones de tensiones en sus bordes, y el área aumenta mucho más de lo tradicionalmente considerado. Ese aumento depende de multitud de parámetros englobados en un conjunto “m”, y ocurre en todo tipo de fuga y material, en mayor o menor grado. Ocurre incluso en agujeros circulares, estudiados en E. Van Zyl et al. (2017). La fórmula que propone como resultado de su estudio es:

$$Q = C_d * \sqrt{2g} * (A_0 h^{0,5} + m h^{1,5})$$

Siendo  $C_d$  al coeficiente de descarga tradicional y de valor constante,  $m$  el parámetro que estudia la variación de tamaño de la grieta por efecto de la presión,  $h$  la presión en el tubo, y  $A_0$  el área sin deformación de la fuga. Los resultados de van Zyl con elementos finitos muestran resultados parecidos a la siguiente imagen, con diferente forma de grietas:

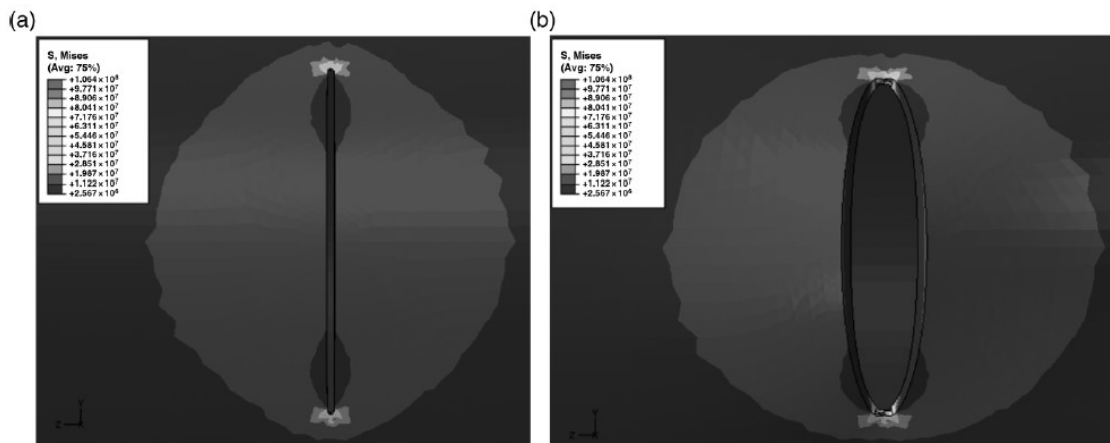
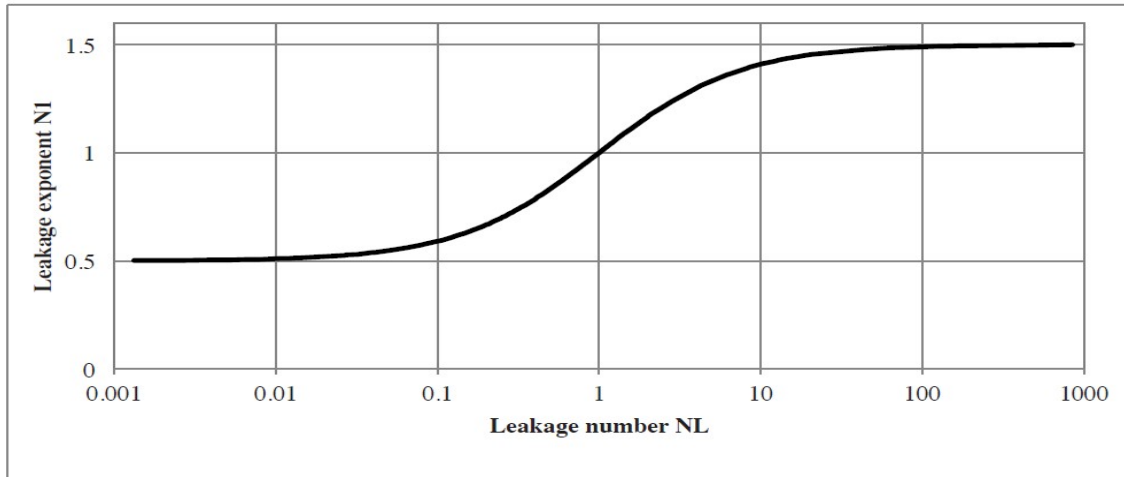


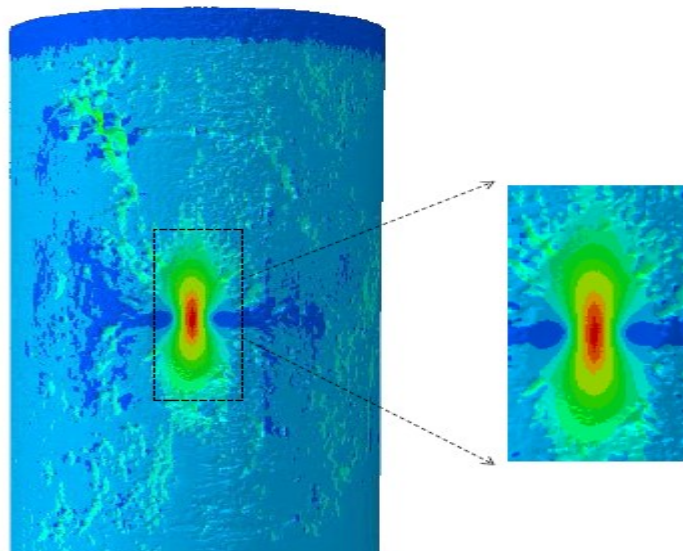
Figura 4. Aumento del tamaño de la grieta por efecto de la presión. Jakobus E. Van Zyl et al. (2013).

Van Zyl desarrolla cierto planteamiento matemático modificando su expresión, y llega a la obtención de dos números, Leakage Number (NL) y Leakage Exponent (Le), cuya forma asintótica permite que, en situaciones límite, va a mandar solamente uno de los dos exponentes de la ecuación FAVAD (0,5 o 1,5), y hay un período de transición en el que el exponente global se comporta como un valor intermedio, como puede leerse en Jakobus E. Van Zyl et al. (2014).



*Figura 5. Comportamiento de todos los exponentes posibles de las fugas según el planteamiento FAVAD. E. Van Zyl et al. (2014).*

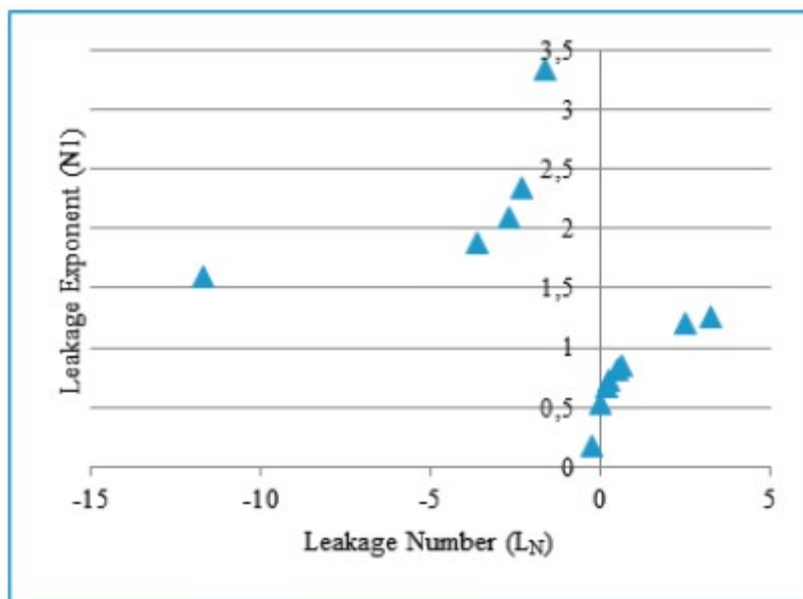
La idea de que los defectos actúan como concentradores de tensiones ha sido estudiada por otros investigadores en diversos ámbitos. Destacan los estudios en el ámbito nuclear, bajo un planteamiento LBB (Leak Before Break), en el cual se analizan los mecanismos de crecimiento de grieta, durante el periodo de tiempo en el que se produce un defecto de bajo riesgo y tamaño, hasta que crece y debe ser sustituido. Se estudia o bien por motivos de seguridad, como en Mingya Chen et al. (2017), centrado en correlacionar crecimientos con medidas, o para validar el propio sistema de medida y desarrollar una nueva herramienta, como en Koen Van Minnebruggen et al. (2017), o simplemente para llegar a evaluar la magnitud que alcanzan dichas tensiones, como plantea Chunshun Zhang et al. (2017), entre otros.



*Figura 6. Estudio del concentrador de tensiones en la grieta por elementos finitos. Chunshun Zhang et al. (2017).*

Sin embargo, pese a lo bien que explica el comportamiento del material del tubo, el modelo FAVAD no ha supuesto una mejora sustancial en el modelado hidráulico de las fugas en los algoritmos de búsqueda y cuantificación. De todos los modelos estudiados, sólo Nouhar Samir et al. (2017), ha usado esa ecuación para modelar las fugas en sus redes. Esto puede ser debido a diversos factores.

El primer factor es resultado de sus propias publicaciones. Van Zyl demostró, bajo un planteamiento puramente matemático, que en una red con muchas fugas, al usar su fórmula, el exponente medio tiene una dispersión parecida a las estudiadas por otros autores. Estos resultados se muestran en Van Zyl et al. (2014). Pero a la hora de aplicar su fórmula en los períodos nocturnos para una red real en Van Zyl et al. (2014), aproximadamente la mitad de sus resultados quedaban fuera de los exponentes teóricamente asumibles en su Leakage Number, y no pudo dar una explicación satisfactoria, porque los sensores de la red no tenían suficiente capacidad de lectura.



*Figura 7. Obtención de los Leakage Number y Leakage Exponent al aplicar el planteamiento FAVAD a una red real. E. Van Zyl et al. (2014).*

Otro factor que puede explicar por qué no se usan sus ensayos es la complejidad de modelar su ecuación, y los modelos matemáticos prefieren usar la ecuación de fuga tradicional simplemente usando el exponente 0,5 (Isaac Okeya et al. (2015), entre otros), o cambiando el exponente de 0,5 a uno más cercano a 1 (María Mercedes Gamboa-Medina et al. (2017), entre otros).



### 2.3.3 Localización de fugas y ubicación de sensores

Los modelos permiten multitud de aplicaciones orientadas a mejorar la gestión de las redes urbanas. Entre ellas, las que más interesan a este trabajo son las relacionadas con la localización de fugas. Sin embargo, la localización de fugas se encuentra estrechamente ligada a la localización de los sensores, y a todos los problemas centrados en maximizar la información que son capaces de detectar. Dado que algunas publicaciones directamente resuelven ambos problemas en el mismo trabajo, en esta revisión bibliográfica se han considerado conjuntamente. Las fuentes consultadas son: Isaac Okeya et al. (2015), Filippo Pecci et al. (2015), Lina Sela Perelman et al. (2016), Myrna V. Casillas et al. (2015) o Joong Hoon Kim et al. (2017), entre otros.

Las publicaciones centradas en detectar fugas, localizar sensores, etc., presentan todas ellas el mismo esquema básico. Tras una breve introducción, desarrollan un algoritmo matemático que tiene en cuenta el tratamiento de señales, cálculo de variables, restricciones, ruidos añadidos e incertidumbres, etc. para sacar resultados aplicables. El algoritmo puede tener una gran diversidad de pasos y procedimientos empleados, y puede estar concebido para operar tanto online como offline, sin embargo, en la mayoría de ocasiones no se han aplicado sobre redes reales sino sobre casos simulados. Esto se debe a que, en un problema tan complejo y dependiente de factores desconocidos, por ahora preocupa más el estudio de la convergencia del algoritmo, que los resultados proporcionados en casos reales. Por ello se trabaja con el entorno de simulación EPANET, y con sensores ficticios o reales, tratando de resolver el problema de localización óptima.

Un ejemplo de una red lista para ensayar, con la información de los sensores reales y ficticios, es la analizada en el trabajo de Isaac Okeya et al. (2015), la cual se muestra a continuación.

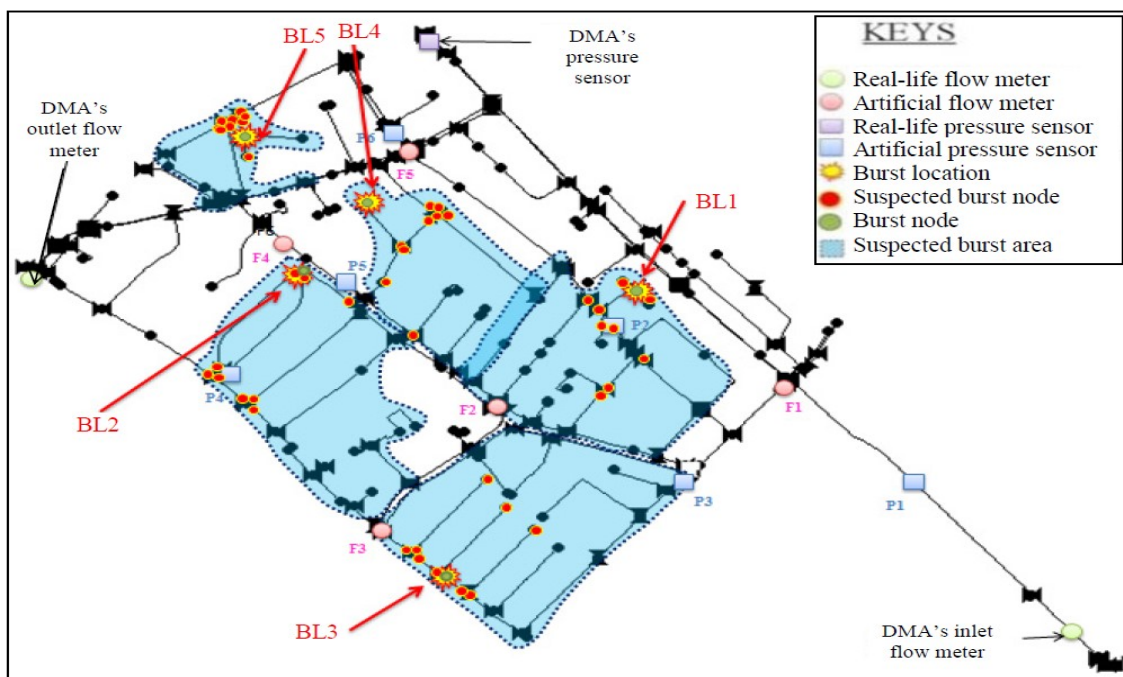


Figura 8. Red con sensores reales y ficticios. Isaac Okeya et al. (2015).

Muchos algoritmos similares han sido utilizados por otros autores, para estudiar su comportamiento sobre otras redes distintas, modelar los errores de las demandas con diferente dispersión, o comparar el efecto de concentrar una gran fuga en un nudo o considerar muchas fugas pequeñas distribuidas. Los resultados van acorde a lo esperado, y una mayor dispersión o unas fugas menores suelen afectar a la eficiencia de los algoritmos, como puede verse en la siguiente imagen, extraída de David Bernhard Steffelbauer et al. (2016).

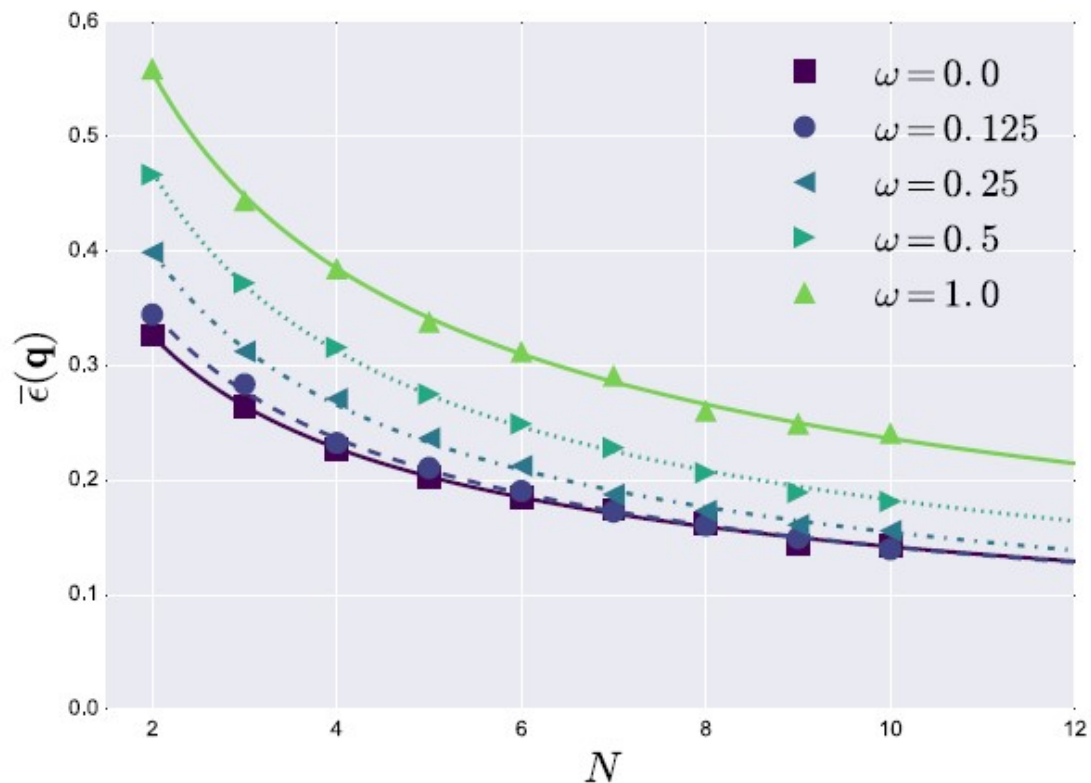
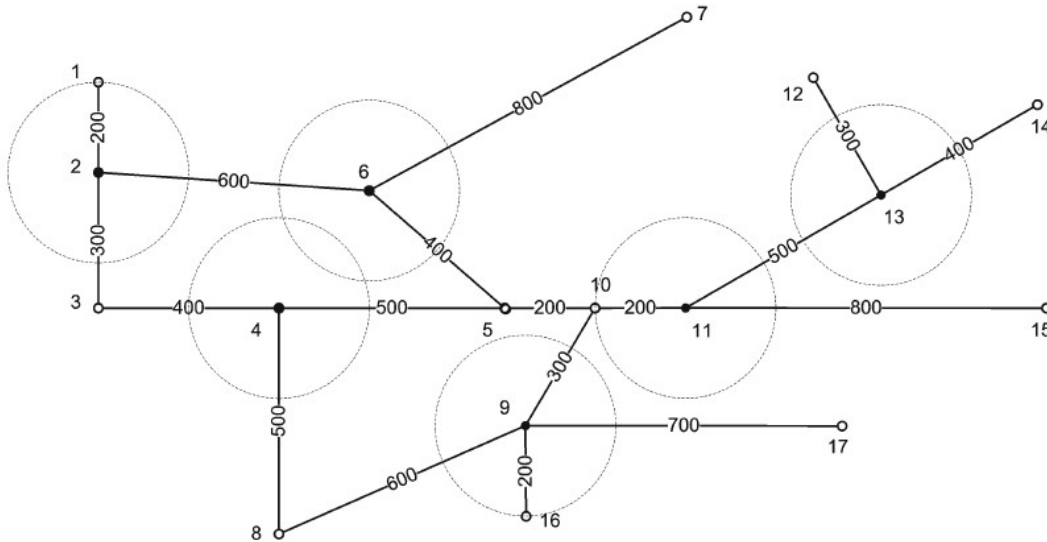


Figura 9. Resultado de algoritmo localizador con diferentes incertidumbres. David Bernhard Steffelbauer et al. (2016).

Por ejemplo, el algoritmo basado en la matriz de sensibilidad se basa en una larga etapa de entrenamiento previo. Se simula una fuga de valor determinado en todos y cada uno de los nodos de una red, y se guardan todos los resultados del efecto que produce esa fuga en cada nodo, para luego comparar anomalías e identificar el resultado que más se le parezca. Este planteamiento puede ser usado de manera determinista, como hace Adrià Soldevila et al. (2016), o añadir incertidumbres a demandas y fugas siguiendo una distribución normal, como Lise Ferrandez-Gamot et al. (2015).

Algo muy parecido a la matriz de sensibilidad es el planteamiento por residuos, que considera fuga a toda aquella diferencia entre lo medido y lo calculado más allá de determinado valor. Suele haber un período de calibración de parámetros del modelo previo para que se asemeje todo lo posible a la red real. Es un planteamiento que han usado autores como D. Wachla et al. (2015), o Cristina Verde et al. (2007), entre otros.

Otros algoritmos tienen un planteamiento completamente diferente, y priorizan la velocidad de cálculo a cualquier otro parámetro. Es el caso de Symeon E. Christodoulou et al. (2013), en el cual se supone que los sensores tienen un radio de acción. Al formular el algoritmo como un problema de cobertura, consiguen sensores uniformemente distribuidos, sin tener en cuenta ni incertidumbres ni cálculos iterativos complejos, y se escoge como colocación óptima aquella solución que “cubra” mejor la red, de todas las planteadas.



*Figura 10. Resultado de algoritmo de colocación de sensores por coberturas. Symeon E. Christodoulou et al. (2013).*

Y por último, se tienen todos los algoritmos de detección en “tiempo real”, basados en medir los transitorios hidráulicos transmitidos por las tuberías en el momento en el que el defecto se está produciendo. La idea es la misma, pero el planteamiento matemático puede cambiar, desde el uso de filtros de Kalman con modelado de ruidos, en I. Okeya et al. (2015), sin modelado de ruidos con altas frecuencias en D. Jung et al. (2014), al tratamiento de las longitudes de onda como en Seshan Srirangarajan et al. (2013), buscando en todos los casos detectar la distancia del defecto a través de la velocidad de propagación y el tiempo de retardo de la señal.

### 2.3.4 Ensayos experimentales

Los trabajos catalogados en este apartado son aquellos que tienen como objetivo principal obtener resultados a través de la experimentación en bancos de ensayo o redes reales. Entre los trabajos consultados destacan los de: Bruno Brunone et al. (2011), D. Sala et al. (2014), Mauro de Machis et al. (2016), S. Fox et al. (2014), o Qihan Liu et al. (2014), entre otros.

Bruno Brunone et al. (2011), y S. Fox et al. (2014), como resultado de sus experimentos, exponen un comportamiento de las fugas no considerado por otros autores, y que puede explicar en detalle ciertos resultados anteriores observados de las redes. Se trata de la histéresis que sufren los materiales con el tiempo, es decir, el aumento del caudal de fuga manteniendo la presión constante, por variaciones reversibles en el área de apertura del defecto. S. Fox et al. (2014) demostró que ese aumento puede ser del 40%, y lo cuantificó en los siguientes resultados:

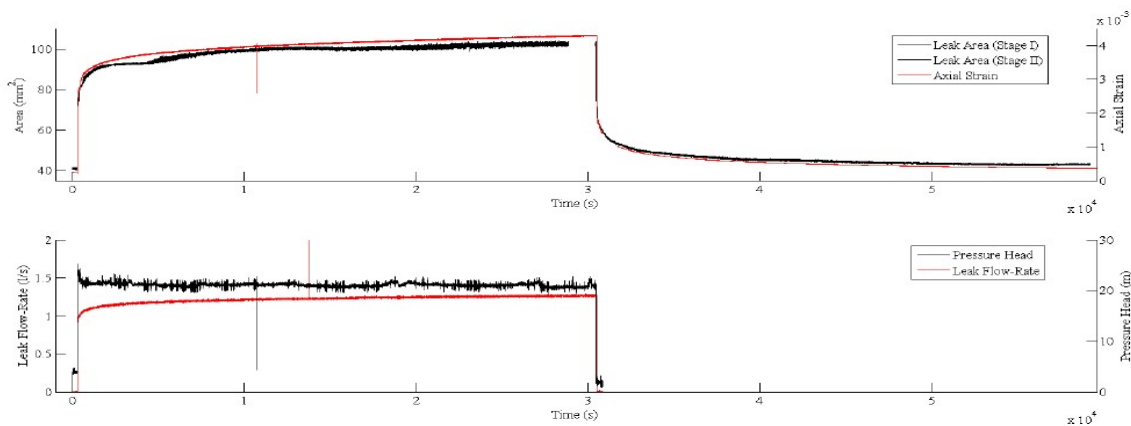


Figura 11. Resultados experimentales de aumento de caudal y área a presión constante. S. Fox et al. (2014).

Bruno Brunone et al. (2011) obtiene una curva H-Q con un claro comportamiento diferente en las fases de carga y descarga, como se observa en la figura siguiente:

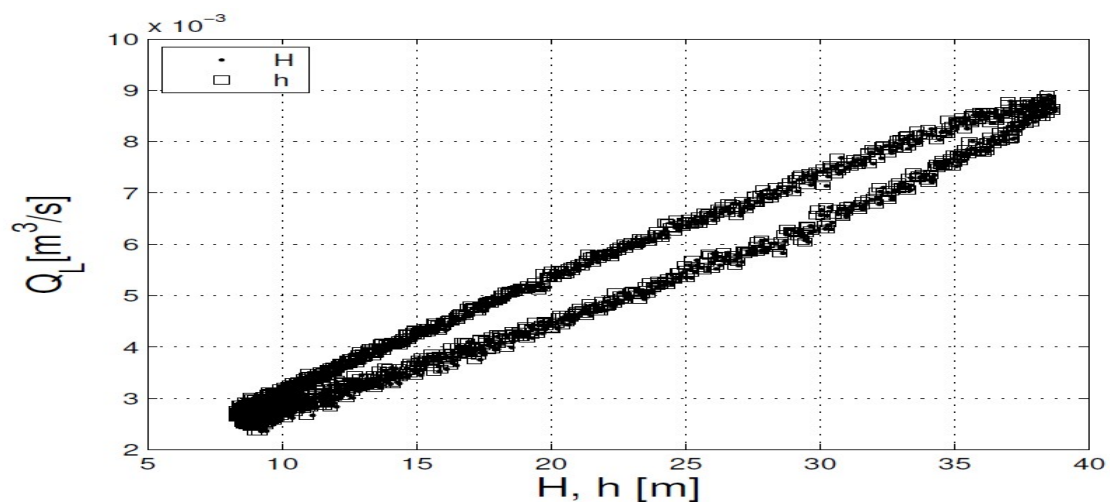


Figura 12. Diferentes curvas de comportamiento en la carga y en la descarga. Bruno Brunone et al. (2011).

Bruno Brunone et al (2013) también estudia el caudal de salida de una fuga a la atmósfera cuando circula un cierto caudal de paso por la tubería, para tubos de acero. Demostraron que los datos reales están a mitad camino entre la situación tradicional (sin coeficiente de descarga) y el coeficiente de descarga de Borda. La instalación usada fue muy similar a la usada en la demostración de la histéresis de materiales plásticos, y los resultados experimentales obtenidos se muestran a continuación.

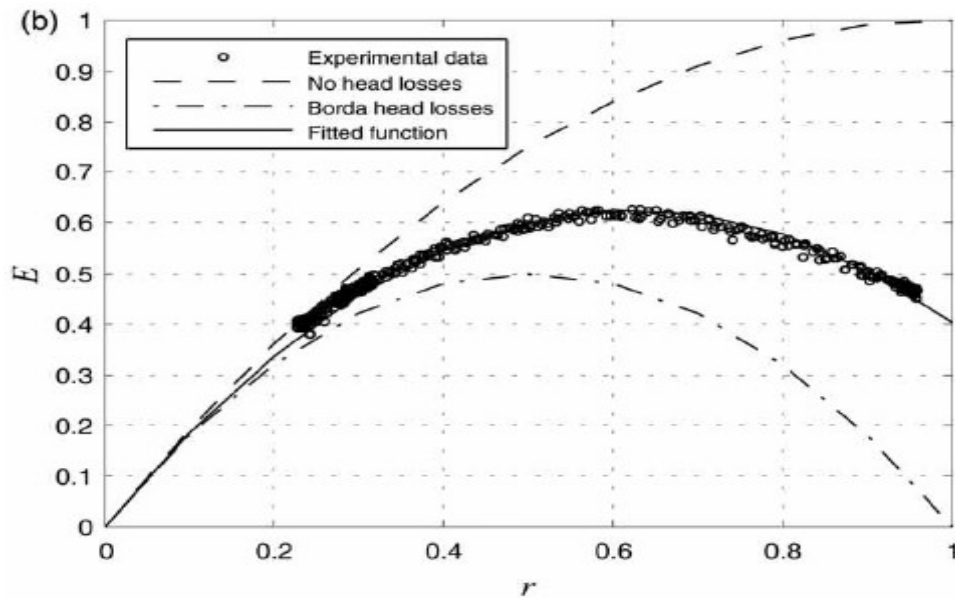


Figura 13. Pérdida de presión en la fuga en función del ratio de caudal total "r". Bruno Brunone et al. (2013).

Pero no solamente se producen fugas en las tuberías. S. Fox et al. (2014) observaron que en materiales plásticos, como los que se usan en los sellos hidráulicos, se puede producir un tipo de fuga elástica cuando la presión supera cierto valor, y cerrarse una vez la presión disminuye, porque al estar en su zona elástica el material no tiene defectos permanentes. Esas fugas tienen una ecuación particular, la cual se muestra a continuación.

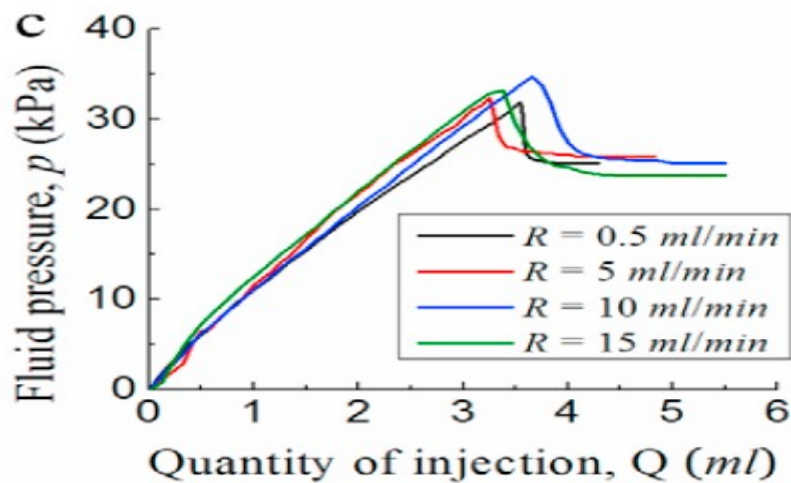


Figura 14. Comportamiento de la fuga en sellos elásticos. S. Fox et al. (2014).

Otros trabajos aportan mejoras para el modelado hidráulico, tales como Mauro de Machis et al. (2016), que estudia las leyes de comportamiento de los ciclos de carga y descarga de depósitos, para poder modelar correctamente las redes de ciudades mediterráneas, donde normalmente estos depósitos se equipan, o J. Canto Ríos et al. (2014), cuyos trabajos de campo llevaron a la actualización completa de los abonados a su red. Hay vías interesantes de desarrollo futuro, como Tracey Lydon et al. (2017), que plantea el uso de bombas funcionando como turbinas para sustituir en su red las PRV, para así recuperar hasta un 40% de la energía hasta ahora perdida.

Hay casos experimentales en los que el modelo hidráulico ayuda a los técnicos a localizar las fugas, como Fredy Angulo et al. (2017), quien, durante un largo trabajo de varios años, a partir de su modelo, ha logrado pasar de una red con fugas superiores al 50%, a una red sensorizada, moderna y controlada. El trabajo de Qiang Xu et al. (2013) destaca entre los ensayos de reducción de fugas al reducir la presión, pues al aplicar la ley de fugas global a los datos experimentales capturados de su red, obtiene que el exponente de la presión del orden de 8, una vez el sistema se ha estabilizado. Este exponente es resultado de información poco fiable de las cotas de los nudos de la red, sin embargo, destaca por su magnitud.

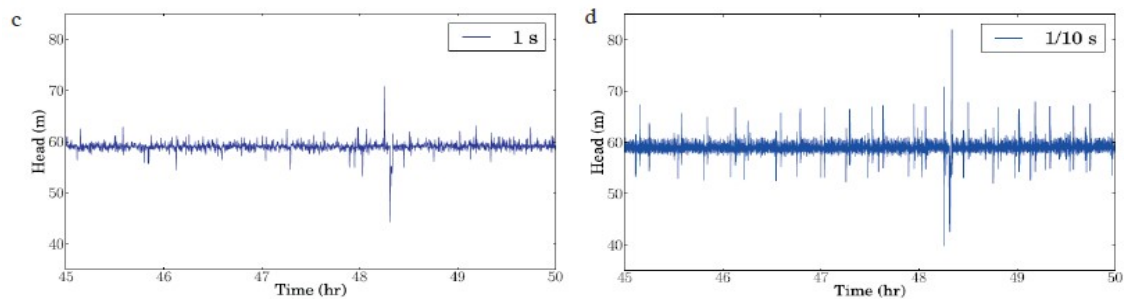
Por último, hay un conjunto de ensayos experimentales centrados en estudiar los factores que afectan al consumo del agua. El objetivo es crear una fórmula ponderada que dé el consumo de una vivienda a partir del número de baños, número de personas, tamaño de la casa, sexo y poder adquisitivo de sus ocupantes, etc. Hasta ahora solamente se había realizado en ciertos países europeos pero Arturo Ojeda et al. (2016) demostró que en América Latina se obtienen resultados que logran ajustar esas fórmulas a las poblaciones de las ciudades de América con el mismo orden de magnitud que los ajustes de ciudades europeas. Jeffery S. Horsburgh et al. (2017) hizo el mismo estudio pero solamente con los baños públicos de la universidad de Utah, y ensayó qué equipos instalados llevan a más ahorro por cada género de sus usuarios. Christa Brelsford et al. (2017) estudió el mismo planteamiento que Arturo Ojeda et al. (2016) pero en el caso de Las Vegas, en la que el ahorro de agua excede, por mucho, al resto de ciudades estadounidenses, y sacó las correlaciones que explican ese comportamiento.

### 2.3.5 Modelos de calidad del agua

Las fugas están muy vinculadas con la calidad del agua, dado que son una fuente de intrusión de contaminantes en la red, motivo por el cual se le ha prestado cierta atención en esta revisión bibliográfica a los estudios referidos a la calidad del agua.

Las publicaciones basadas en calidad del agua tienen dos esquemas fundamentales, dependiendo de si se basan en contaminantes químicos o bacterias. Los autores consultados han sido F. Nejjari et al. (2014), S. Fox et al. (2014), Rafi Schwartz et al. (2014), D. G. Eliades et al. (2014), o Melle Säve-Söderbergh et al. (2017), entre otros.

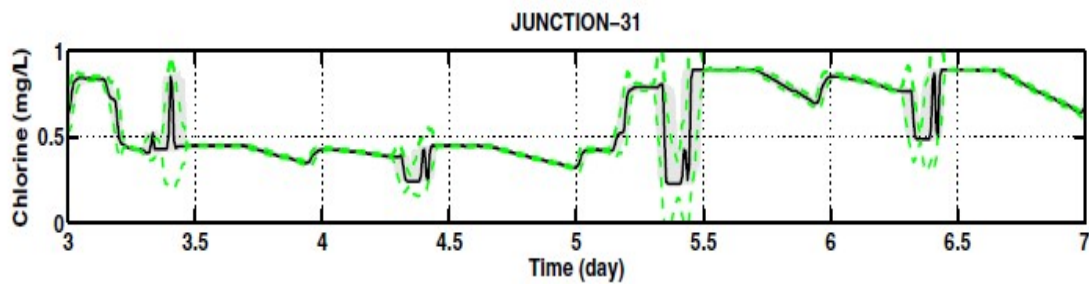
En la entrada de los contaminantes a la red, interesa fundamentalmente la evolución temporal de los mismos, y las técnicas de detección. Uno de los trabajos relevantes en este campo es el de S. Fox et al. (2014), que demostró que en condiciones de transitorios extremos se pueden alcanzar presiones negativas en las fugas, y la contaminación externa puede penetrar en la red, permaneciendo durante el tiempo suficiente para que no salga en su totalidad, lo que contrasta con la mentalidad tradicional que consideraba que la contrapresión positiva posterior a la fase negativa del transitorio, expulsaba las sustancias introducidas completamente. Como puede verse en esta imagen, usada por S. Fox et al. (2014), el aumento de la frecuencia de muestreo ayuda a visualizar mejor los valores límite, y detectar los momentos de entrada de contaminantes.



*Figura 15. Efecto al aumentar la frecuencia de muestreo en una señal. S. Fox et al. (2014).*

Este trabajo se complementa con F. Nejjari et al. (2014), que estudia las leyes de decaimiento del cloro, para obtener la evolución de las mismas “sin defectos”, y con Eliades et al. (2014) y Rafi Schwartz et al. (2014), que muestran que compuestos químicos anómalos, los cuales reaccionen con el cloro en las redes, llevan a variaciones bruscas y detectables de la concentración de cloro, lo que permite ahorrar en sensores especializados, como puede verse en la siguiente figura, en el día 5,5:





*Figura 16. Detección de contaminantes químicos por variación en la concentración de cloro. D. G. Eliades et al. (2014).*

Las publicaciones que analizan el comportamiento de las bacterias en el interior de las redes tienen, fundamentalmente, un carácter detectivesco. Se elaboran una vez la epidemia ha pasado, y se centran en el análisis de los datos y en la determinación de las fuentes de contaminación. Las publicaciones coinciden en que, aunque el agua no es la principal causa del número global de afectados por enfermedades intestinales, cuando la fuente de contaminación es el agua, los síntomas son estadísticamente más graves.

El agua es realmente fácil de contaminar, y muchas veces las colectividades humanas pecan de confianza. Annemieke Farenhorst et al. (2016) demostraron que el hecho de pasar el agua de la potabilizadora a un camión para ser distribuida es suficiente para que ésta se contamine. Ana Kovacic et al. (2017) determinaron como foco de contagio el hecho de beber de una fuente alejada pero conectada a la red general, cuando las autoridades aconsejaron no beber de la red tras una fuerte tormenta. Y Jungsun Park et al. (2017) demostraron que, aunque la fuga haya sido reparada, el agua ya contaminada sigue pudiendo enfermar tras varios días, como ocurrió en un campamento coreano.

Es especialmente curioso el caso del agua en Holanda, pues en ese país no usan cloro para desinfectar sus redes, y basan su potabilización en impedir el crecimiento bacteriano mediante estándares de calidad mucho más altos. Esos estándares son rigurosamente cumplidos en las redes generales, pero en las tuberías interiores de las viviendas particulares, Lj. Zlatanovic et al. (2017) demostraron que los períodos de estancamiento nocturno son suficientes para el crecimiento de poblaciones de bacterias pequeñas, pero nocivas.

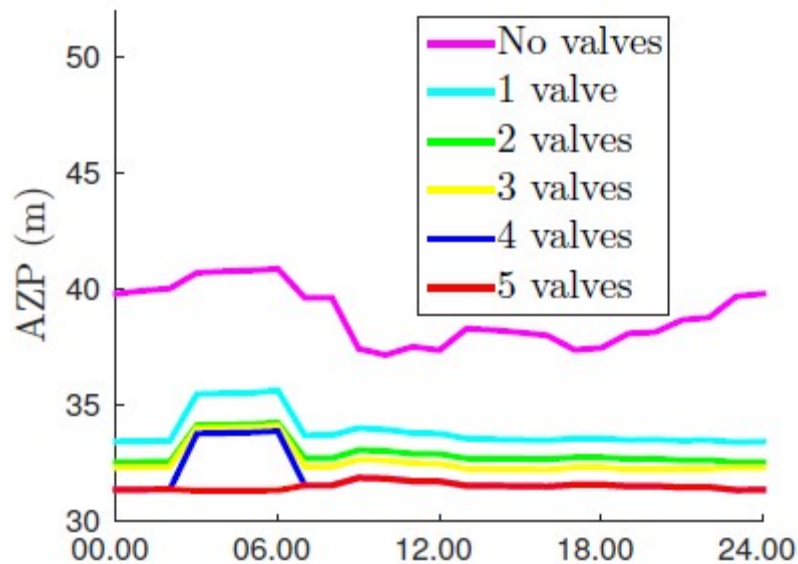
Estos trabajos, aunque no están directamente relacionados con el tema central de este trabajo, recalcan la importancia de contemplar a las redes como un conjunto complejo de elementos interconectados entre sí, con los que hay que tener un especial cuidado para su mantenimiento.



### 2.3.6 Otras contribuciones

Además de los trabajos comentados, en la revisión bibliográfica se han contemplado también otras contribuciones que si bien no abordan directamente el problema de la tipificación y la localización de las fugas, buscan otro tipo de resultados tales como la cuantificación de las fugas, la localización de válvulas, sectorización de las redes, el uso de nuevos parámetros que proporcionen información adicional, etc. Las fuentes destacadas son las siguientes: Juan Saldarriaga et al. (2015), B. Brunone et al. (2014), R. Wright et al. (2014), Daniel Paluszczyszyn et al. (2015), M. Nicolini et al. (2014), KaLeung Lam et al. (2016), F. Martínez Alzamora et al. (1999), S. E. Galaiti et al. (2016), entre otros.

El planteamiento de los estudios que buscan minimizar presiones o sectorizar una red es similar al de la localización de fugas y ubicación de sensores, pues muchos plantean primero matemáticamente el problema, antes de aplicar los resultados de forma experimental. En el caso de la minimización de presiones, se imponen unas restricciones para mantener las presiones por encima de un valor mínimo para asegurar las demandas. Un ejemplo puede encontrarse en Filippo Pecci et al. (2015).

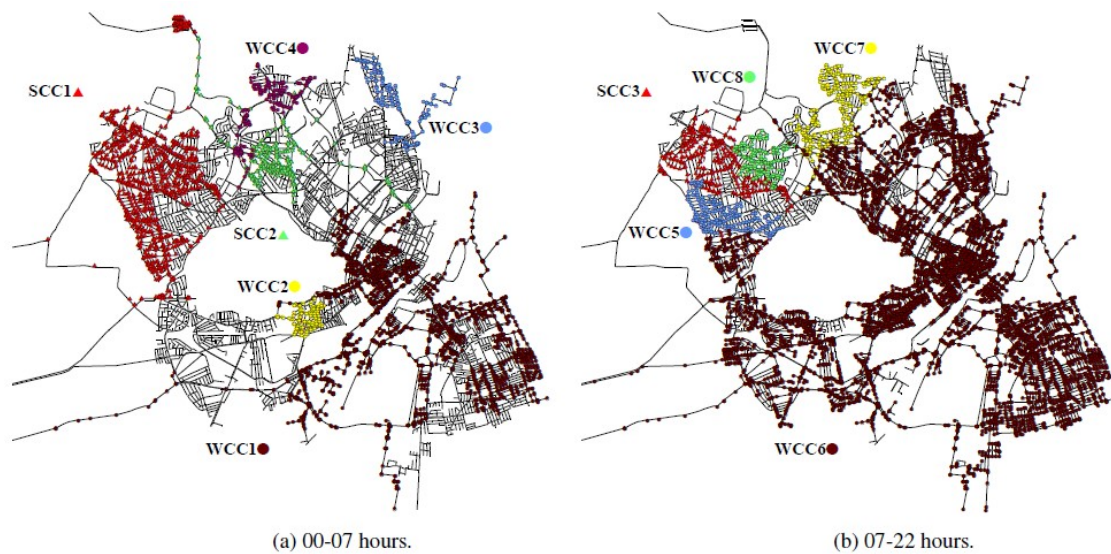


*Figura 17. Resultados de su algoritmo minimizador de presiones. Filippo Pecci et al. (2015).*

En otros casos, el planteamiento matemático tiene que ver con la forma de aplicar el modelo. Pilar Conejos et al. (2017) cambia la forma tradicional de fijar las demandas en los nudos para hacerlas depender de la presión, lo que lleva a modelos más ajustados a la realidad. I. Okeya et al. (2014) usa los datos medidos para elaborar predicciones de demanda mediante filtros de Kalman y optimizar su red, y Josep Roma et al. (2015) actualiza un modelo de depósitos y grandes tuberías para corregir defectos importantes en las grandes conducciones y obtener un modelo libre de errores.

Algunos sustituyen el objetivo principal de localizar las fugas por un objetivo económico en el que analizan la rentabilidad de las operaciones de búsqueda de fugas, como Alberto Cavaliere et al. (2017), T. Setlhogile et al. (2016), Simon Porcher (2017), o Eyal Price et al. (2013), o bien se plantean objetivos multicriterio como los planteados en G. P. Cimellaro et al. (2015), Ioan Așchilean et al. (2017), o Edvins Karnitis et al. (2017).

Otros estudian la forma de sectorizar sus redes, para facilitar la búsqueda de las fugas en el futuro. Como O. Giustolisi et al. (2014). En J.K. Kirstein et al. (2014), su planteamiento es analizar los nodos con un comportamiento similar y agruparlos en clústeres para conocer con más detalle el funcionamiento de la red, como se muestra en la figura siguiente.



*Figura 18. Resultados de su algoritmo agrupador de clústeres por comportamiento de los nodos. J.K. Kirstein et al. (2015).*

Y por último, hay que mencionar los documentos de divulgación y recopilatorios, dirigidos a mostrar el estado del arte, futuras vías de investigación, o exponer casos concretos. Entre ellos, están el caso de Flint, publicado por Victoria Morckel (2017), revisiones bibliográficas de fugas como R. Puust et al. (2013), A. Abdulshaheedy et al. (2017), sistemas de medida en ZhengLiu et al. (2013), factores que afectan a las tuberías en los trabajos de Hossein Rezaei et al. (2015), planteamientos de cambio en agricultura como Olcay Unver et al. (2017), o política en S. E. Galaitsi et al. (2016).

## 2.4 Biblioteca de publicaciones para consulta

Todas las publicaciones revisadas y comentadas en los párrafos anteriores, han sido agrupadas en las categorías descritas y alojadas en un fichero biblioteca implementado en Excel para que Emivasa, o cualquier otro investigador que lo desee, pueda consultarlo y pueda acceder a resúmenes en español de todos y cada uno de los documentos consultados, escritos por el autor de este TFM.

El formato en el que se muestra cada una de las publicaciones consultadas es el siguiente:

<a href="#">16</a> <a href="#">Histéresis del polietileno</a>	jul-11
Planteamiento	Ensayos experimentales
Metodología	Montaje de laboratorio
Resultados	
Conclusiones	

*Figura 19. Ejemplo de publicación alojada en el fichero-biblioteca para su consulta.*

En las plantillas se dispone del número del documento (16) con un enlace por hipervínculo al documento original en inglés, y un título descriptivo que sirve para reflejar la idea principal del documento. El título descriptivo, a su vez, posee un hipervínculo a un resumen en español del documento. La esquina superior derecha incluye la fecha de publicación, y en un comentario en esa misma casilla se tiene el enlace para descargar el documento de internet.

“Ensayos experimentales” y “Montaje de laboratorio” son los temas fundamentales tratados en el documento, e indican que el documento hace referencia al montaje y ensayo de equipos, por si en un futuro se busca más información referente a ese tema.

Para terminar, los comentarios insertados en la primera columna (“Planteamiento”, “Metodología”, etc.) son fragmentos del resumen del documento en español, por si se desea leer un fragmento en el propio Excel, tal y como se ve en la siguiente imagen:

<a href="#">16</a> <a href="#">Histéresis del polietileno</a>	jul-11
Planteamiento	Ensayos experimentales
Metodología	Montaje de laboratorio
Resultados	
Conclusiones	<b>Autor:</b> En este trabajo se muestra el comportamiento irregular del polietileno. El material del tubo muestra ser un factor fundamental que explica el comportamiento dispar en las curvas H-Q. Se demuestra que la deformación en grietas longitudinales es un factor de vital importancia en las fugas.

*Figura 20. Ejemplo de publicación en el fichero-biblioteca para su consulta, con el comentario que resume las conclusiones del mismo.*

## **2.5 Conclusiones de la revisión bibliográfica**

Tras la revisión bibliográfica, se concluye la gran cantidad de trabajos y publicaciones que se han hecho en los últimos años en el campo de las fugas. Por norma general, todas las publicaciones tienen algún concepto novedoso o interesante, tanto desde el punto de vista de la programación de los modelos como de los datos obtenidos. Sin embargo, hay ciertos puntos que podrían mejorarse, lo que da pie a realizar nuevas contribuciones.

Todos los autores clasifican las fugas en diversos tipos. Una clasificación muy breve consiste en dividir las fugas en aparentes y reales, y reparables y no reparables. Las aparentes son todas aquellas extracciones no controladas de la red, que tienen origen humano. Se trata normalmente de robos, conexiones no autorizadas, o no actualizadas en el registro de consumidores de las empresas. Las fugas reales son consecuencia de los defectos de la red. Las no reparables pueden ser consecuencia de su tamaño, falta de tecnología de la empresa administradora o que no es viable económicamente su subsanación.

Los modelos hidráulicos estudiados tienen en cuenta todos los tipos de fugas, y consideran a sus fugas no como un término más diluido en las ecuaciones de comportamiento de la red, sino fenómenos puntuales de un cierto valor, por ejemplo, fugas de 1, 2, o 3 litros por segundo. Incluso modelan las fugas usando distribuciones estadísticas. Los sensores, a su vez, también tienen cierta sensibilidad limitada, lo que sumado a la gran casuística de fenómenos diversos a los que están sometidas las redes a lo largo del día, hacen que resulte muy difícil detectar fugas por debajo de cierto valor. Los modelos calibrados con sistemas SCADA incluyen una gran cantidad de fugas indetectables, camufladas en sus demandas, por lo que detectar fugas ya existentes e incluirlas en el modelo sigue siendo un trabajo que requiere una dedicación importante, siendo lo más común tratar de utilizar éstos para detectar fugas con posterioridad, superiores al umbral antes mencionados

Así planteado, parece inevitable la existencia de pérdida de agua en las redes. Aparentemente solo con un costoso programa de mantenimiento y rehabilitación pueden asegurarse altos rendimientos. Sin embargo, la tecnología avanza, y en un futuro la capacidad de lectura y precisión de los sensores puede mejorar, a unos costes suficientes para que compense la instalación de un gran número de ellos.

Los contadores con capacidad de mandar lecturas horarias ya son una realidad, y están instalados en un alto porcentaje en la ciudad de Valencia. En un futuro, existe la posibilidad de que, por simple reducción de costes asociados, muchas fugas pasen del grupo de no reparables a reparables. Por ello, los controladores de esas redes necesitan conocer el grado de mejora que permite la instalación de esos sensores. Es decir, el ahorro a largo plazo que supone esa inversión inicial.

Estos nuevos sensores van a requerir reajustar todos los algoritmos de ubicación de sensores y localización de fugas con nuevos parámetros, límites de precisión, etc. Todas las ecuaciones añadidas en esos modelos han mostrado ya su validez y capacidad de dar resultados, aunque sean con datos generados a partir de EPANET.

Los sensores también deben de elegirse, atendiendo a los límites que las empresas quieran o puedan alcanzar, y su sensibilidad es una de las muchas restricciones que los algoritmos deben de tener en cuenta a la hora de ubicarlos.

Por ello, es necesario conocer en detalle el comportamiento intrínseco de las fugas. Algunos autores como Bruno Brunone y van Zyl, entre otros, han realizado un gran trabajo cuantificando ciertos comportamientos de las tuberías y del caudal de fugas, con descarga siempre a la atmósfera. Sin embargo, se echa en falta una mayor diversidad de experiencias. Analizando una gran cantidad de fugas y de situaciones, es posible crear una biblioteca de correlaciones que engloben todas las posibilidades de comportamiento que pueden mostrar las fugas reales, y todos esos datos, junto con otras fuentes de información, pueden servir tanto para la elección de sensores, como para detectar no solo la existencia de una fuga o su localización, sino también su tipología, frecuencia o distribución, y con ello determinar si va a ser rentable su localización o las mejores soluciones a tomar para su reparación.

Si J.D. Butterfield et al. han sido capaces de obtener señales acústicas asociadas con las fugas enterradas, también se debe de poder obtener información de la ley de variación de las fugas con la presión para la fuga enterrada. El efecto “tapón” que provoca la presencia de tierra compactada alrededor de la tubería no ha sido cuantificado de manera rigurosa hasta ahora, es un efecto que debe ser estudiado y experimentado. Pueden darse situaciones de grietas de tamaño grande que por estar taponadas den lugar a fugas pequeñas al principio, pero al cabo del tiempo el lavado del terreno puede provocar súbitamente la eliminación del efecto tapón y hacer que la fuga de repente aumente considerablemente de valor de forma inexplicable.

La obstrucción creada por la tierra compactada alrededor de la tubería no solo condiciona la sensibilidad de los sensores, al reducir el efecto de las fugas, sino que puede influir de forma determinante en los peligros de contaminación del agua. Dependiendo del tipo de tierra, su compactación y su composición en materia orgánica, se pueden elaborar ciertas correlaciones del riesgo que supone la entrada de tierra en el tubo, y cuánta entra. Sin embargo, esto queda fuera de los límites del presente trabajo.

En resumen, este trabajo se va a centrar únicamente en el estudio de la ley de fugas, esto es, la dependencia del caudal de fugas con la presión bajo un planteamiento experimental, para analizar y cuantificar el efecto que tienen determinados factores en su comportamiento para redes reales, y en la creación de una biblioteca de datos que permita:

- Mejorar el conocimiento que se tiene actualmente del comportamiento de las fugas presentes en las redes.
- Mejorar los algoritmos de búsqueda de fugas y de selección y localización de los sensores empleados para su detección.
- Esclarecer los límites de las fugas que son posibles o económicamente viables de detectar y reparar.

Y cualquier otro resultado de necesidad que pueda obtenerse de los datos que se obtengan.

## **3 Construcción de un banco de pruebas para el estudio de las fugas**

### **3.1 Introducción**

El objetivo de este trabajo es la obtención de la ley de fugas de una gran diversidad de defectos mediante ensayos experimentales. Para ello es necesario el diseño y construcción de una instalación con ciertas características, que permita el ensayo de tuberías con defectos reales o provocados.

El diseño de una instalación de ensayos es un problema complejo y que requiere tener tanto conocimientos técnicos sobre la hidráulica, electricidad, mecánica, etc. como atender a restricciones de carácter económico, de espacio, toma de decisiones, tiempos de construcción y plazos de entregas de equipo, ensayos de recepción, etc. Por ello, y porque la información a tener en cuenta es elevada, van a ir describiéndose los distintos aspectos de la instalación diseñada a lo largo de este capítulo.

En el primer punto de este apartado se marcan los objetivos que el banco debe cumplir, con las necesidades y requisitos concretos propuestos por Emivasa, y los directores de este trabajo. Gracias a la exhaustiva revisión bibliográfica, se han podido encontrar publicaciones de otros autores que han tratado también de diseñar sus propios bancos de ensayo, lo que ha ayudado en gran medida al diseño de aspectos concretos de la instalación.

El banco de pruebas diseñado ha tomado como punto de partida la instalación propuesta y publicada por Bruno Brunone mostrada en la figura 21. Sobre ella se han propuesto determinadas modificaciones para ampliar y mejorar su funcionamiento, y adecuarlo a los requisitos particulares de Emivasa.

Una vez el esquema de la instalación ha sido consensuado, se han seleccionado los componentes comerciales que formarán parte del banco de ensayos, mostrando sus características de funcionamiento. A continuación se han abordado otros temas complementarios, como la transmisión de los datos, las salidas analógicas usadas, la frecuencia de muestreo, etc.

Esta parte del trabajo termina con una descripción de los ensayos a realizar, tanto de calibración para comprobar que todo funciona correctamente como del uso de los equipos.

### **3.2 Objetivos del banco de ensayos**

Una parte fundamental del presente TFM ha sido el diseño y montaje de una instalación de ensayos poco usual, cuyo objetivo es caracterizar la ley de dependencia de las fugas con la presión aguas arriba de la misma para diversos tipos de defectos, y facilitar el uso de la instalación y de los resultados obtenidos en trabajos futuros.

El estudio de esa ley puede dar información valiosa sobre los requisitos necesarios para detectar fugas, la efectividad de los mecanismos de reducción de presión en la red, la cuantificación del número de defectos presentes en el sector, etc.

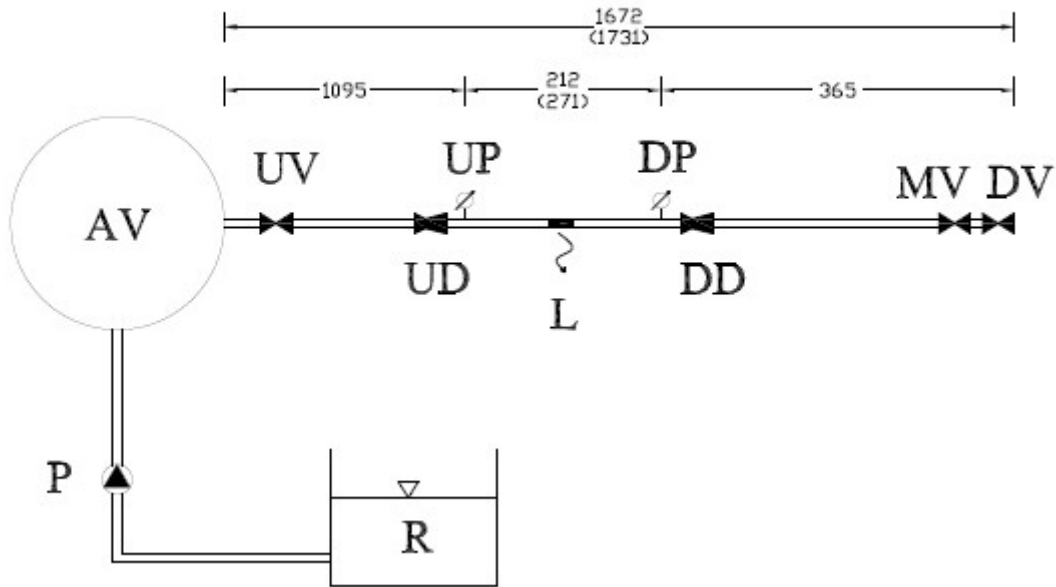
Para ello, de todo el espectro de fugas que pueden darse en una red real, se plantea delimitar el problema al estudio de los siguientes casos:

- Capacidad para reproducir fugas de valor cercano a 1 litro por segundo, lo cual se considera el límite técnico de las fugas detectables por métodos directos en Emivasa.
- Fugas en tuberías de pequeño y mediano diámetro. Se pone como límite superior un DN100. El diámetro debe de poder ser variable.
- Emular el comportamiento de la fuga en condiciones de funcionamiento normal de las tuberías ensayadas, con caudales de paso de hasta 10 litros por segundo, y rangos de presiones entre 15 y 50mca.
- Medir la interacción entre el caudal principal y el caudal fugado. Para ello el banco debe permitir medir el caudal antes y después de las fugas, determinando su valor por diferencia (para fugas importantes).
- Permitir ensayar igualmente fugas en las que el caudal que circula por la tubería es igual al fugado, es decir, situaciones sin caudal pasante.
- Estudiar el comportamiento de grietas muy distintas, desde las de gran tamaño a las pequeñas fisuras para observar toda la casuística.
- Estudiar el efecto de obstrucción creado por la tierra circulante, hasta ahora apenas ensayado, y ver su influencia en la ley de dependencia de la fuga con la presión.
- Permitir observar visualmente el comportamiento de la grieta o defecto, y las características del flujo de salida.
- Estabilizar las medidas en unos valores fijos que permitan estudiar el comportamiento de una fuga estacionaria, la histéresis del material o cualquier otro parámetro relacionado con el tiempo, y facilitar la toma de datos.
- Estudiar el efecto de la forma de la grieta y el material, y de la interacción entre material-defecto. Por ello, se usarán los datos publicados por el Canal de Isabel II para saber la probabilidad combinada de cada pareja de variables, junto con los conocimientos propios de Emivasa.
- Ensayar, de ser posible, materiales reales extraídos con defectos de la red de Valencia, resultado de operaciones de mantenimiento, para ver el efecto de la edad en el comportamiento del material.
- Facilitar la toma de datos en cada ensayo y su transferencia a otras aplicaciones para su análisis, filtrado, graficado, etc.

En base a estas consideraciones, y teniendo en cuenta los bancos usados por otros autores, se ha propuesto el esquema que se comenta a continuación.

### 3.3 Esquema básico de la instalación

Para concebir la instalación, se han revisado diversas fuentes, entre ellas, las publicaciones de Bruno Brunone et al. (2011 y 2013) y el banco de ensayos de contadores en Emivasa. Todas las instalaciones tienen un esquema general parecido. Para ejemplificar el concepto básico, se muestra el banco ensayos propuesto por Bruno Brunone et al. (2011), el cual está también orientado a caracterizar el comportamiento de las fugas:



*Figura 21. Esquema de funcionamiento de su instalación de ensayos de fugas. Bruno Brunone et al. (2011).*

Como puede verse en la imagen, el primer elemento necesario es un grupo de bombeo (P), alimentado a partir de una reserva de agua (R), que puede ser tanto la red general como un depósito de almacenamiento. El grupo de bombeo proporciona las condiciones suficientes de caudal y presión para realizar los ensayos. La bomba alimenta a un depósito presurizado (AV), lo que ayuda a mantener las condiciones del ensayo constantes para facilitar la toma de muestras. El siguiente elemento es una válvula reguladora de presión (UV), lo que mantiene las presiones aguas abajo del sistema a un valor constante. El conjunto válvula reguladora-calderín actúan en conjunto para que los ensayos discurran en las condiciones más estables posibles. A continuación se encuentran los grupos de medida agrupados en caudalímetros (UD y DD) y sensores de presión (UP y DP). Entre ellos se localiza la fuga L.

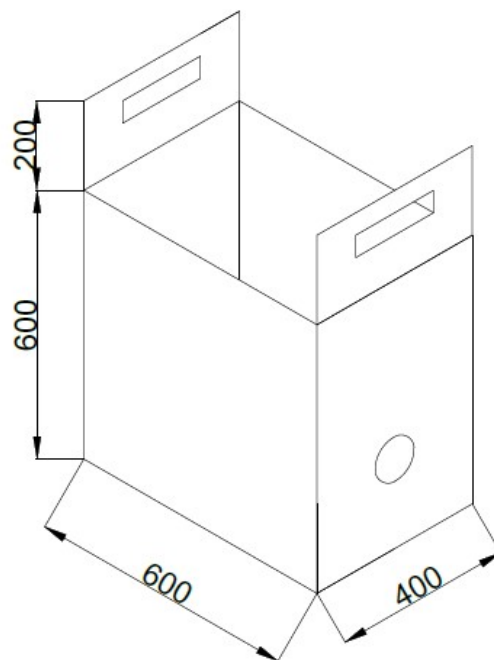
Remarcar que los sensores de presión siempre se encuentran más cerca que los caudalímetros al defecto a medir (L), para tener un valor de caudal lo más estabilizado posible. Ello guarda relación con lo recomendado en la norma UNE EN 1267. Los últimos elementos del banco de ensayos son una válvula de regulación (MV) tipo mariposa y una válvula de corte (DV), para tener cierto control sobre el caudal pasante, pues una de las características de las PRV (UV) es que funcionan independientemente del mismo.



Este tipo de instalación, muy parecida a otras revisadas en la bibliografía, cumple gran parte de los requisitos necesarios, por lo que se ha utilizado como esquema inicial. Sin embargo, es necesario añadir ciertas modificaciones para cumplir con el resto de necesidades antes mencionadas.

En las publicaciones anteriores, solamente se ha realizado un tipo de ensayo en cada tipo de instalación. Este banco de pruebas debe permitir una gran cantidad de ensayos y condiciones de contorno distintas. Por lo que se plantean las siguientes modificaciones:

- El primer paso es el cambio de la bomba única por un grupo de bombeo con dos bombas en paralelo, siendo una de ellas de velocidad variable, para ampliar las posibilidades de obtener diferentes caudales y alturas de los ensayos.
- En la zona de ensayo de la fuga propiamente dicha hay que prever la intercalación de diferentes tramos de tubería de distintos materiales, diámetros y tipos de defecto.
- La fuga debe confinarse en algún tipo de recinto que permita visualizar el caudal fugado y canalizar el mismo para evitar cualquier accidente. Además debe permitir realizar ensayos con el tramo de tubería enterrado en una tierra tal que emule los materiales de relleno de la zanja. A tal fin se ha decidido el uso de un par de cajones, uno de metacrilato para las fugas a la atmósfera y otro metálico que pueda alojar el peso de la tierra que rodeará el tubo. En la figura siguiente se muestra un esquema del mismo.

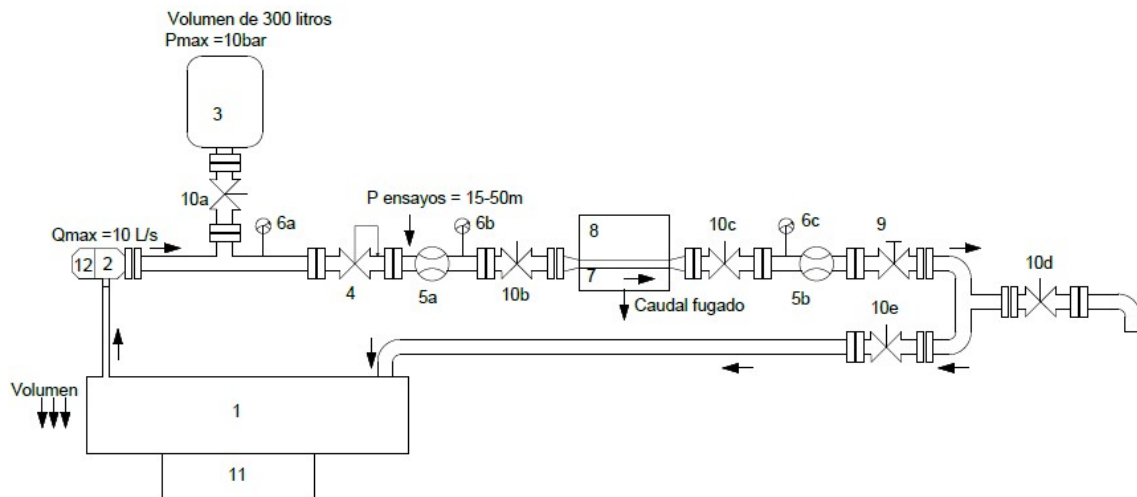


*Figura 22. Esquema del cajón utilizado para confinar la fuga, y dimensiones del mismo.*

Las dimensiones del cajón han sido obtenidas a partir de las dimensiones estándar de una zanja, según la fuente consultada en el libro de prácticas de laboratorio de Iban Balbastre (referencia 3-24-75 de la biblioteca de la ETSII), que coincide con las dimensiones de zanjas usadas en la instalación de tuberías de hasta 100mm empleado por Emivasa.

- Se propone cerrar el circuito y recircular el agua al almacenamiento de reserva. Ello permitirá ensayar con caudales de paso mayores ya que ofrece una mayor seguridad y comodidad para la realización del ensayo, y permite obtener medidas del caudal fugado a partir del vaciado del volumen de reserva, y finalmente supone un ahorro de agua al no tomar ésta directamente desde la red.
- Tras un largo estudio de opciones posibles, se decide medir el volumen del depósito y la variación de caudales del mismo mediante el uso de una báscula que tome medidas de manera continua y en tiempo real.

De acuerdo con todo esto, el esquema general de la instalación propuesta para el banco de ensayos se muestra en la figura siguiente:



*Figura 23. Esquema del banco de ensayos propuesto, con todos sus elementos.*

A continuación se enumeran cada uno de los componentes que forman parte del banco

Número	Elemento
1	Depósito no presurizado
2	Bombas
3	Calderín
4	Válvula reguladora de presión
5a-b	Caudalímetros
6a-b-c	Sensores de presión
7	Tubería con defecto a ensayar
8	Cajón
9	Válvula de regulación
10a-e	Válvula de corte
11	Báscula
12	Variador de frecuencia

*Figura 24. Lista de los componentes que forman parte del banco de ensayos.*

### 3.4 Selección de componentes

Al tratarse de un proyecto para una empresa con muchos años de implantación como es Emivasa, se usaron para configurar el banco de ensayos algunos componentes propios ya existentes, los cuales se utilizan normalmente en tareas de mantenimiento. Otros componentes fueron adquiridos expresamente para este banco. En esta parte del trabajo se van a exponer de forma sencilla los requisitos a cumplir por cada uno de los componentes del banco, y posteriormente se mostrará el modelo seleccionado. Cada uno de los componentes aquí enumerados se corresponde con la numeración mostrada en el esquema anterior.

1. Se ha escogido un **depósito no presurizado** por dos motivos. El primero, ahorrar agua en los ensayos, al permitir que todo el caudal no fugado retorne para volver a ser usado en siguientes ciclos, y segundo, el hecho de retornar el agua sobrante permite medir la fuga por variaciones de masa en el interior del depósito, ya que toda variación de volumen se debe a la fuga.

Se ha reutilizado un depósito perteneciente a la empresa Emivasa, cuya fotografía estando ya instalado puede verse a continuación.



*Figura 25. Depósito de reserva no presurizado usado en el banco de ensayos.*

Su capacidad es de 1000 litros, pero no van a usarse más de 600 litros, debido a que la báscula sobre la cual se apoya tiene una capacidad de pesaje de 750Kg.

2. Las **bombas** se han escogido de eje vertical y son tres bombas VIPV 10-55T de las cuales una se mantiene en reserva. Se han elegido de modo que puedan satisfacer los caudales y presiones límites del ensayo. Sus especificaciones son un caudal máximo de alrededor de 8-10 litros por segundo, funcionando dos de ellas en paralelo y una altura en ese punto superior a los 50 metros. Otro requisito a cumplir era una altura máxima inferior a los 100mca, cosa que este grupo de bombeo cumple. A continuación se muestran las curvas de las bombas.

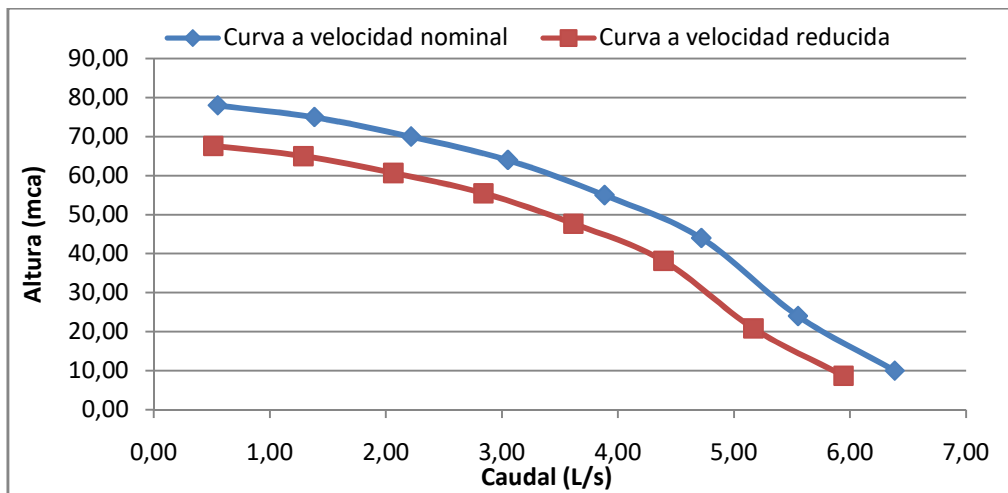


Figura 26. Curvas de las bombas a velocidad nominal y reducida.

La curva azul corresponde a la velocidad nominal y la curva roja a una velocidad de giro inferior a la nominal. Con la válvula de regulación de presión se complementará esta información. Los datos de catálogo extraídos del fabricante pueden verse a continuación.

Tipo Type	Motor / Moteur			I/min m³/h	33	83	133	183	233	283	333	383	Intensidad (A)			Cond.	A	h1	ASP.	IMP.	Kg.
	P2(HP)	P2(KW)	P1(KW)		2	5	8	11	14	17	20	23	230V	400V	690V	μF					
VIPV 10-20T	2	1,5	2,03	M	31	29	27	23	18	12	2	-	6,6	3,8	-	-	485	247	1 1/2" G	1 1/2" G	22
VIPV 10-30T	3	2,2	2,86		40	38	36	31	26	18	8	-	8,8	5,1	-	-	520	286	1 1/2" G	1 1/2" G	23
VIPV 10-40T	4	3	3,84		64	62	58	54	46	35	18	8	12,6	7,3	-	-	660	362	1 1/2" G	1 1/2" G	31
VIPV 10-55T	5	4	5,01		78	75	70	64	55	44	24	10	14,7	8,5	-	-	720	402	1 1/2" G	1 1/2" G	37
VIPV 10-65T	6,5	5	6,13		89	85	80	73	63	50	27	12	16,6	9,6	-	-	765	439	1 1/2" G	1 1/2" G	40
VIPV 10-75T	7,5	5,5	6,74		112	105	100	91	74	59	29	15	-	11,1	6,4	-	835	476	1 1/2" G	1 1/2" G	47

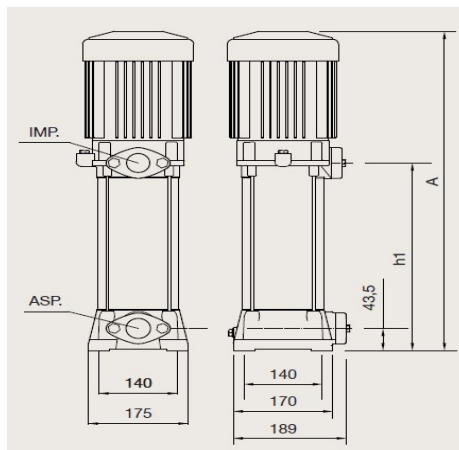


Figura 27. Datos y dimensiones del grupo de bombeo, según su catálogo.



3. Para el **calderín** se ha escogido del modelo 300 AMR-B160. Los cálculos demuestran que esa capacidad es suficiente para los ensayos, de acuerdo a la siguiente fuente consultada.

Acumulador velocidad variable S\UNE EN149202:2013

$$= \frac{900 * Q_{bomba} * (P_{paro} + 1)}{4 * Z_{bomba} * (P_{paro} - P_{arranque})} = \frac{900 * 10 * (9 + 1)}{4 * 25 * (9 - 6)} = 300 \text{ litros}$$

Verticales con patas / Vertical with legs Verticales avec pieds				
Tipo Type	Capacidad Capacity Capacité (L)	Presión máx. Max. Pressure Pression max. (Bar)	Dimensiones Dimensions Ø x H (mm)	Conexión Connection Connexion
50 AMR-P	50	10	360 x 750	1"
80 AMR-P	80	10	450 x 750	1"
100 AMR-P	100	10	450 x 850	1"
150 AMR-P	150	10	485 x 1060	1 1/4"
200 AMR-B90	200	10	550 x 1135	1 1/4"
300 AMR-B160	300	10	650 x 1180	1 1/4"
500 AMR-B160	500	10	750 x 1450	1 1/2"
220 AMR	200	10	485 x 1400	1 1/2"
350 AMR	300	10	485 x 1965	1 1/2"
500 AMR	500	10	600 x 2065	1 1/2"

Figura 28. Catálogo de los modelos de calderines disponibles y sus características.

Se ha escogido ese modelo por dificultades de altura en la nave de los ensayos, ya que la superficie disponible era suficiente. Una foto del modelo instalado puede verse a continuación.



Figura 29. Calderín usado en el banco de pruebas.

El calderín puede cumplir funciones de suministro de caudal cuando las bombas no estén en marcha de modo continuo por ser los caudales del ensayo muy bajos, y funciones de regulación de la presión para caudales mayores y un funcionamiento continuo de las bombas.

4. La **válvula reguladora de presión** escogida es la DN 65 Serie 720 (700 con piloto) de la marca BERMAD. Tiene como objetivo el mantener la presión del sistema constante aguas abajo, independientemente del valor de presión y caudal aguas arriba.

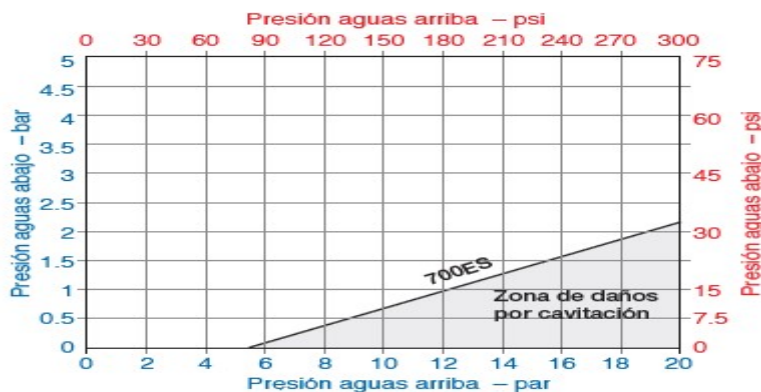
Las válvulas de regulación necesitan cierto margen para asegurar su funcionamiento, y las condiciones del ensayo máximas en cuanto a presión son 50 mca, por eso se ha escogido una bomba que dé más de 50mca en el punto de caudal máximo. El conjunto del grupo de bombeo, siendo una de ellas de velocidad variable, con el calderín permite tener un gran control de la presión aguas arriba, lo que se traduce también en un valor de presión aguas abajo constante, ideal para la realización de los ensayos y la obtención de datos fiables.



*Figura 30. Válvula reguladora de presión usada en el banco de pruebas.*

La válvula, para asegurar su correcto funcionamiento, necesita disponer de unos tramos de tubería recta sin obstáculos, antes y después de la misma. Sus longitudes necesarias son 3 veces el diámetro nominal de la válvula aguas arriba, y 2 diámetros aguas abajo. En la práctica estas longitudes son mayores al disponer de espacio suficiente.

El componente que se observa en la parte superior de la válvula es un piloto que permite mejorar el ajuste de los rangos de trabajo. Por último, para asegurar el correcto funcionamiento de la válvula, se ha verificado que no habrán problemas de cavitación, conforme a las curvas del fabricante mostradas en la figura siguiente.



*Figura 31. Datos de cavitación de la válvula reguladora de presión usada en el banco de pruebas.*

5. Los **caudalímetros** escogidos han sido del modelo DN65 P11 SITRANS FM de la marca Siemens. Se colocan antes y después de la fuga, y permiten, mediante la resta de sus medidas, saber el caudal fugado. Para asegurar la calidad de las mismas, se conocen los rangos que son capaces de medir, y el error asociado a cada uno:

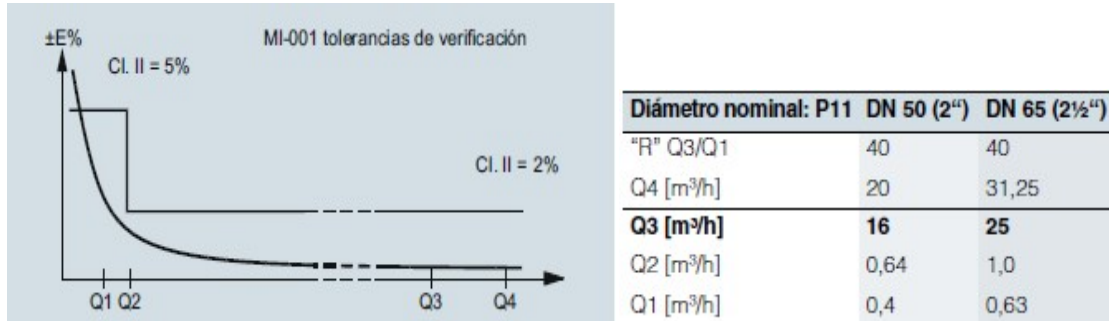


Figura 32. Datos de catálogo de los caudalímetros usados en el banco de pruebas.

Como puede verse en esas imágenes, el modelo asegura un error acotado en sus medidas del 5% siempre que se mantenga por encima de los 0,64 m³/h, y a partir de 0,64 m³/h y hasta su límite de 31,25 m³/h, un error del 2%. Por ello, para ensayos de fugas muy bajas fuera de rango se ha decidido complementar las medidas con un balance de masa en el depósito no presurizado. Los caudalímetros se usarán siempre que se entre en rango, y la redundancia en las medidas se traducirá en ensayos más rápidos y fiables.

Para asegurar su buen funcionamiento, y teniendo en cuenta que los caudalímetros están diseñados acorde a los criterios de los estándares internacionales ISO, se han revisado las normas ISO 4064-1 y ISO 4064-2 a las cuales hacen referencia. Como puede verse en la imagen, para asegurar una correcta medida se debe dejar 10 veces el valor del diámetro aguas arriba del caudalímetro, y 5 veces aguas abajo del mismo.



Figura 33. Caudalímetro instalado en el banco de pruebas con sus distancias necesarias de funcionamiento.



6. Los **sensores de presión** escogidos son del modelo SENSOTEC 26600G. Tienen diversos usos. El sensor después de la válvula reductora ayuda a fijar los puntos de presión aguas abajo de la misma para ensayar la fuga en los valores considerados, y este punto también se corresponde con el punto de presión aguas arriba de la fuga, lo que permite sacar la ley de dependencia de la fuga con la presión.

El sensor aguas abajo de la fuga permite conocer la caída de presión que provoca el defecto, lo que da información valiosa para detectar defectos en la red real, y puede permitir desarrollar nuevas vías de investigación futuras.

El sensor del calderín muestra información referente al funcionamiento de la instalación, sirve para comprobar el punto de trabajo de las bombas, y realizar ensayos a partir del valor de presión en el calderín, en los casos en los que ni las bombas puedan funcionar de manera continua ni los caudalímetros puedan medir. En esos casos, se plantea realizar balances de masa dentro del calderín a partir del valor medido en el sensor. Esto se explicará en detalle en el ensayo de calibración del calderín.

Todos los sensores tienen el mismo esquema eléctrico, y se basa en un transductor que recoge la señal eléctrica y la envía para su lectura y registro, y un sensor visual de presión, para saber en todo momento cual es el punto de trabajo. El sistema montado puede verse a continuación.



*Figura 34. Sensores de presión instalados en el banco de pruebas.*

Las características del transductor son: una capacidad de medida máxima de 10 bares, una salida analógica del rango de 4 a 20 mA, y un error del  $\pm 0.5\%$  del fondo de escala, tal y como puede verse en la siguiente imagen, extraída de sus catálogos:

Input pressure range								
Nominal pressure gauge	[bar]	-1...0 <sup>1</sup>	1	1.6	2.5	4	6	10
Nominal pressure abs.	[bar]	-	1	1.6	2.5	4	6	10
Overpressure	[bar]	3	3	5	5	12	12	20
Burst pressure $\geq$	[bar]	4	4	7	7,5	15	18	30

Output signal / Supply		
Standard	2-wire:	4 ... 20 mA
Performance		
Accuracy <sup>2</sup>	$\leq \pm 0.5\%$ FSO	

*Figura 35. Datos de catálogo de los sensores de presión instalados en el banco de pruebas.*

7. El **defecto a ensayar** es un tubo con una salida de agua, tanto artificial como extraída de la red de Valencia, el cual se acopla al resto de tuberías fijas de la instalación. Se ha diseñado el banco para poder acoplar diferentes diámetros y grietas, e incluso poder ensayar otro tipo de fugas, como las producidas por roscas apretadas incorrectamente.



*Figura 36. Tubería instalada para su ensayo, y sus válvulas de corte antes y después de la misma.*

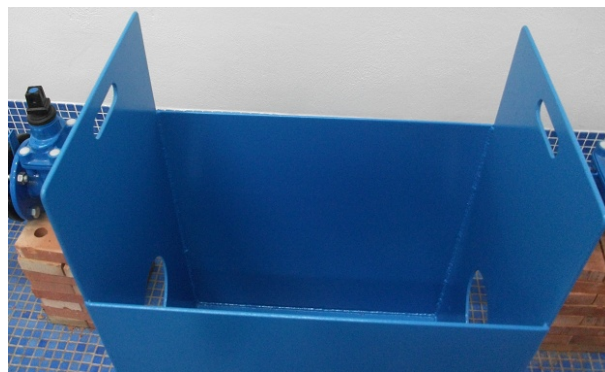
Como puede verse en la imagen, el defecto, al estar instalado en las mismas condiciones en las que están instalados los tubos en la red de Valencia, necesita cierto huelgo por abajo, tanto para poder evacuar el agua como para poder añadir una cantidad de tierra suficiente en la parte inferior. La solución tomada en este caso, en vez de de levantar solamente el tubo con el defecto, ha sido levantar toda esa rama del banco de ensayos. Al ir todos los elementos a una cierta altura, se han dispuesto apoyos como los mostrados en la figura.

8. Para tener contenida al agua saliente, y poder observar de una manera segura su comportamiento, se ha diseñado un **cajón** de material transparente, el cual es fácilmente manejable y al estar montado rodea al tubo con el defecto. La imagen del cajón transparente puede verse a continuación.



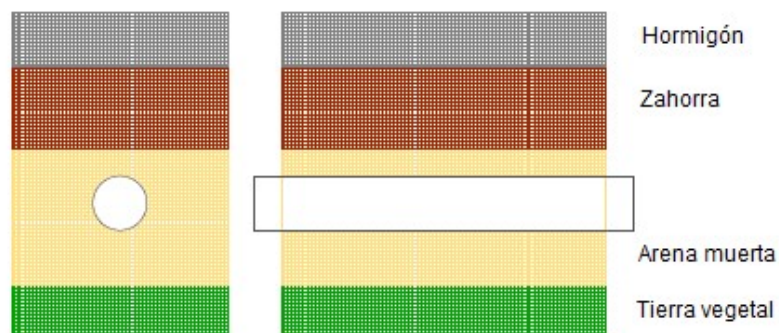
*Figura 37. Cajón de polietileno transparente para el ensayo de los defectos sin tierra.*

En el caso de realizar ensayos enterrados, se ha diseñado un segundo cajón de metal con resistencia suficiente para aguantar el peso de la tierra.



*Figura 38. Cajón de metal para el ensayo de los defectos enterrados.*

Los datos de la tierra y su distribución han sido suministrados por Emivasa, y son iguales a los materiales usados normalmente a la hora de instalar un tubo.



*Figura 39. Distribución de materiales en los ensayos con tierra.*

El peso de los diferentes materiales del cajón ha sido calculado para asegurar la resistencia del cajón y estudiar las diferentes posibilidades que se tienen para trasladarlo. El cálculo de los mismos puede verse a continuación.

#### Datos técnicos y dimensiones

Elemento	Valor	Unidad
Densidad del hierro	7874	kg/m3
Densidad de la tierra vegetal (húmeda)	1450	kg/m3
Densidad de la arena muerta (húmeda)	1800	kg/m3
Densidad de la zahorra (húmeda)	1700	kg/m3
Densidad del hormigón	2200	kg/m3
Longitud del cajón	600	mm
Ancho del cajón	400	mm
Profundidad del cajón	600	mm
Longitud de abrazaderas	200	mm
Espesor chapa	5	mm
Espesor tierra vegetal	100	mm
Espesor arena muerta	250	mm
Espesor zahorra	150	mm
Espesor hormigón	100	mm

*Figura 40. Datos de partida para los ensayos con tierra.*

#### Peso debido al metal de las paredes

Elemento	Valor	Unidad
Pared 600x600 (anterior)	14.1732	kg
Pared 600x600 (posterior)	14.1732	kg
Pared 800x400 (anterior)	12.5984	kg
Pared 800x400 (posterior)	12.5984	kg
Fondo del cajón 600x400	9.4488	kg
<b>Total</b>	<b>62.992</b>	<b>kg</b>

*Figura 41. Resultados de peso del propio cajón de metal.*

#### Peso debido a los materiales dentro del cajón

Elemento	Valor	Unidad
Peso tierra vegetal	34.8	kg
Peso arena húmeda	108	kg
Peso zahorra	61.2	kg
Peso hormigón	52.8	kg
<b>Total</b>	<b>256.8</b>	<b>kg</b>

*Figura 42. Resultado del peso de los materiales usados para enterrar la fuga.*



### Peso total del cajón

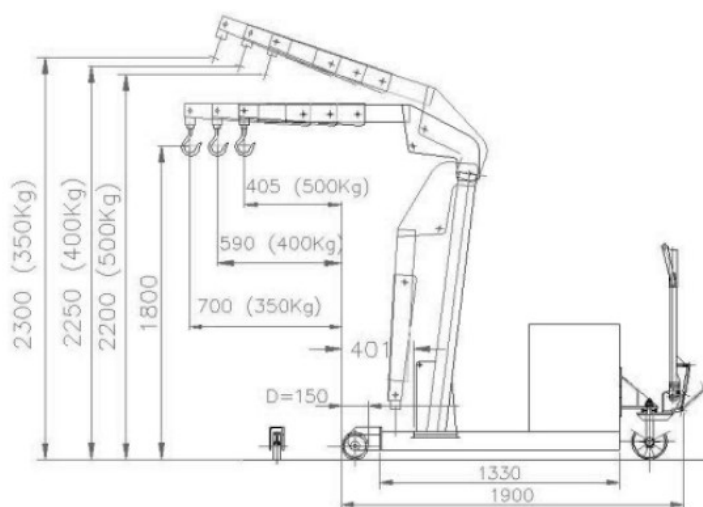
Elemento	Valor	Unidad
Peso debido al metal de las paredes	62.992	kg
Peso debido al metal dentro del cajón	256.8	kg
<b>Total</b>	<b>319.792</b>	<b>kg</b>

*Figura 43. Resultado del peso total del cajón con la tierra en su interior.*

Para su traslado, se ha decidido comprar una grúa contrapesada manual, pues el cajón pesa demasiado para un traslado manual. También, si se observan los planos y la imagen siguiente, para sacar el cajón del banco de pruebas debe levantarse para salvar el pequeño muro que rodea a todo el perímetro. Se escoge una grúa de la empresa Novodinámica, cuya hora técnica y fotos son los siguientes:



*Figura 44. Grúa contrapesada manual comprada para el banco de fugas.*



*Figura 45. Capacidades de la grúa contrapesada manual comprada.*

9. La válvula reductora de presión (elemento 4) permite escoger el valor de presión deseado aguas arriba del defecto para realizar los ensayos de fugas. **La válvula reguladora de caudal** tiene la misma finalidad pero con el caudal de las bombas, pues se ha demostrado que el caudal pasante tiene influencia en el comportamiento del caudal fugado, y en este banco se desean realizar estudios experimentales sobre esa influencia.

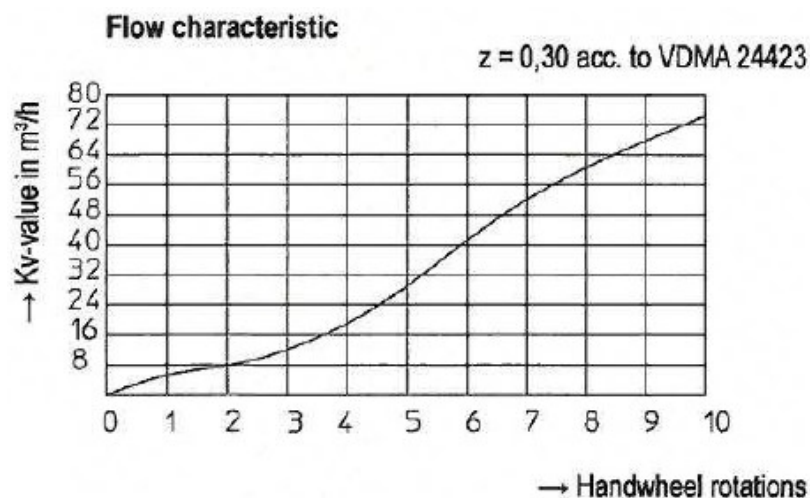


*Figura 46. Válvula reguladora de caudal instalada en el banco de ensayos.*

En este caso, los requisitos de colocación de esta válvula son parecidos a la válvula reguladora de presión, 3 diámetros de la válvula aguas arriba de la misma y 2 diámetros aguas abajo. Pero, para aprovechar al máximo el espacio donde se encuentra montada, se toma una distancia superior en ambos márgenes.

Al tener una válvula independiente que controle cada una de las variables, este banco permite ensayar un amplio abanico de situaciones, lo que permitirá obtener resultados con un margen de similitud a la red real muy alto, en un amplio abanico de situaciones.

Se escoge el modelo de válvula de asiento plano DN 65 de la empresa ARMATUREN.

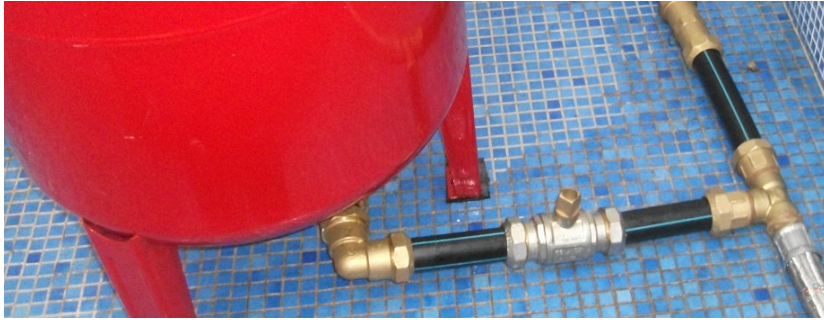


*Figura 47. Catálogo de prestaciones de la válvula reguladora de caudal instalada.*

10. Se colocan ciertas **válvulas de corte**, tanto por seguridad como para impedir el vaciado de los elementos una vez los ensayos terminen. Uno de los objetivos del banco es realizar ensayos sin caudal pasante, por lo que estas válvulas se usan en esa situación.

Se colocan en los siguientes puntos de la instalación:

Para independizar el calderín del resto del sistema.



*Figura 48. Válvula de corte instalada para independizar el calderín.*

Para cerrar el defecto, antes y después del mismo, una vez los ensayos terminen.



*Figura 49. Detalle de la válvula de corte para aislar el cajón con el defecto.*

Para poder eliminar la circulación al depósito no presurizado, y realizar ensayos sin caudal pasante.



*Figura 50. Detalle de la válvula de corte para eliminar la recirculación al depósito.*



11. En los casos en los que los caudalímetros queden fuera de rango, y para tener controlado el volumen dentro del depósito e impedir que las bombas funcionen en vacío, se ha seleccionado y colocado una **báscula**, la cual puede tomar datos de manera continua, lo que le permite funcionar como calibrador de los caudalímetros.



*Figura 51. Foto de la báscula instalada bajo el depósito no presurizado.*

Las características de esta báscula son:

**UNA BASCULA DE PLATAFORMA SOBRESUELO**

Fuerza	600 kg
Escalón ( d )	100 g
Fracción ( e )	200 g
Dimensiones plataforma	800 x 800 mm. acero pintado
Nº Células	Una off center
Capacidad unitaria célula	750 kg unidad. OIML C3

*Figura 52. Características básicas de la báscula bajo el depósito no presurizado.*

Se trata de una báscula moderna con un visor de muestreo de datos que permite visualizar los datos de manera continua, y que tiene la posibilidad de conectarse, mediante su salida analógica, al sistema de toma de datos al que están conectados el resto de sensores del banco de ensayos.



12. Para poder fijar los valores deseados de caudal y presión de una manera cómoda en todos los valores posibles, y tener mayor estabilidad alrededor del punto deseado del ensayo y suministrado por las bombas, es necesario que una de las bombas sea de velocidad variable.

**El variador de frecuencia** se complementa con el sensor del calderín lo que permite saber el punto de funcionamiento de las bombas, tanto con el valor de presión medido en el sensor como con el valor de la frecuencia leída en el panel frontal del variador.

El variador, dispone de un panel de mando con capacidad para mostrar diversas variables, y programable a partir de los botones situados en su panel frontal. A su vez, también tiene interruptores para conectar cada una de las bombas por separado, desconectar el variador, o parar de emergencia el sistema.

El manual de operación ha sido revisado para entender el funcionamiento de las bombas, sus formas de manejo, distintas consignas, frecuencias prohibidas, etc.



*Figura 53. Variador de frecuencia de las bombas.*

El plano de la instalación a escala se muestra a continuación, una vez se han escogido todos los elementos del banco de ensayos, y se sabe el tamaño que va a ocupar cada uno:

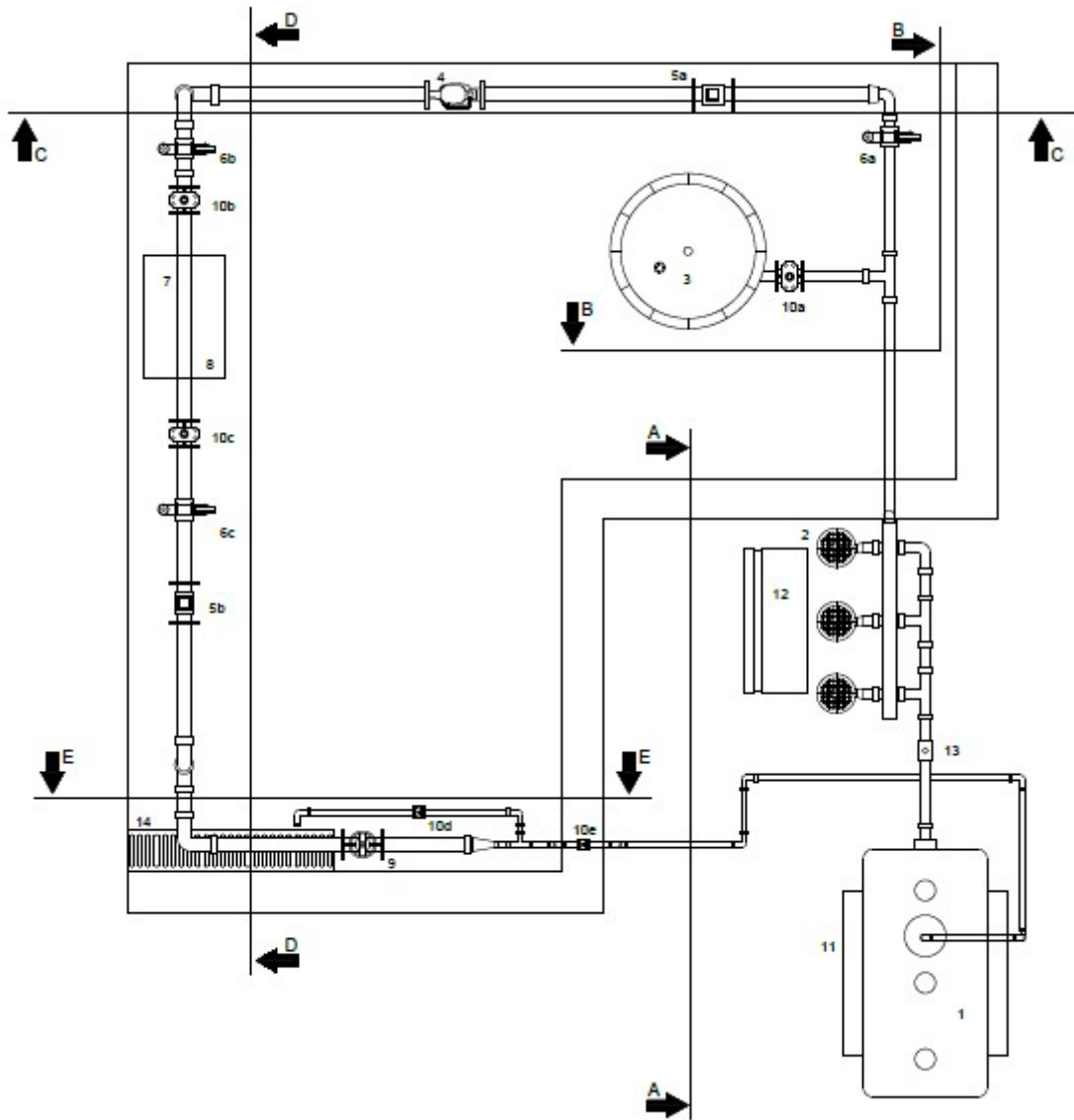


Figura 54. Plano a escala de la instalación, visto desde arriba.

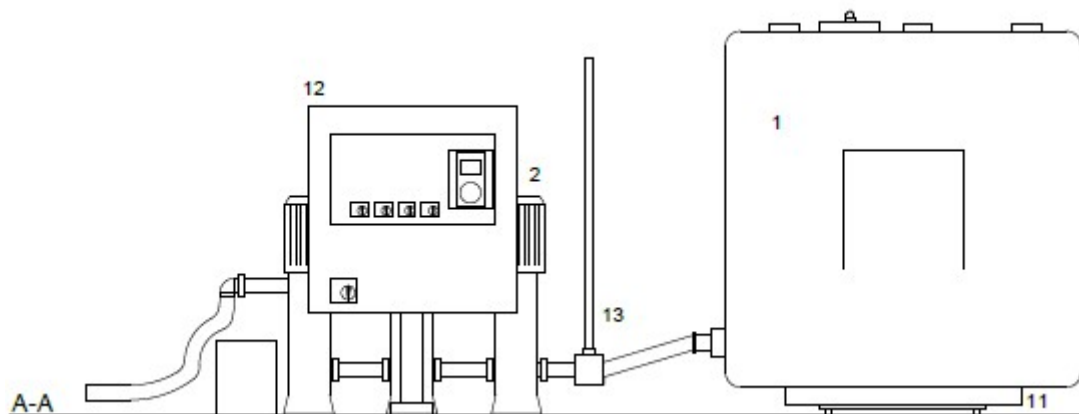


Figura 55. Plano a escala de la instalación, corte A.

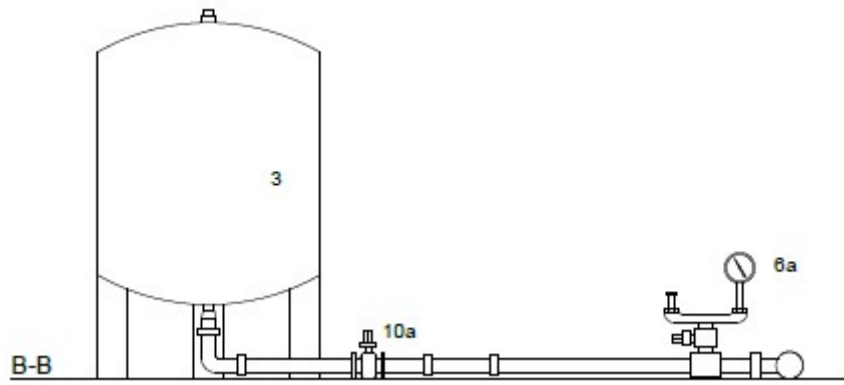


Figura 56. Plano a escala de la instalación, corte B.

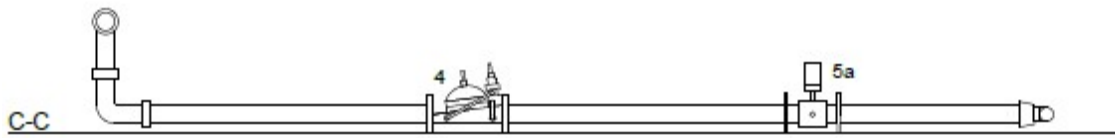


Figura 57. Plano a escala de la instalación, corte C.

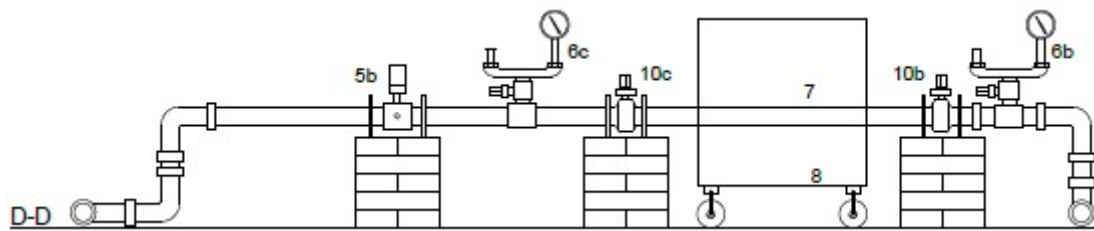


Figura 58. Plano a escala de la instalación, corte D.



Figura 59. Plano a escala de la instalación, corte E.

Número	Elemento
1	Depósito no presurizado
2	Bombas
3	Calderín
4	Válvula reguladora de presión
5a-b	Caudalímetros
6a-b-c	Sensores de presión
7	Tubería con defecto a ensayar
8	Cajón
9	Válvula de regulación
10a-b-c-d	Válvula de corte
11	Báscula
12	Variador de frecuencia
13	Visor de nivel del depósito no presurizado
14	Sumidero de caudal fugado

*Figura 60. Ampliación de la lista de componentes de la instalación, incluyendo el entorno.*

La lista de componentes ya ha sido mostrada en figuras anteriores, y se amplía para incluir los elementos que conforman físicamente el entorno.

Los bordes del plano se corresponden con los límites físicos de la instalación (paredes y un pequeño muro).

El muro a media altura mostrado en los planos tiene en su composición interna un elemento aislante del agua. Es necesario para mantener al agua dentro del recinto y no perjudicar al resto de actividades que se realicen en la nave.

### 3.5 Funciones de transmisión de datos

Los sensores, los cuales trabajan con una salida analógica de 4 a 20mA, transforman cada una de sus correspondientes variables medidas a una señal eléctrica del rango de los 4 a los 20mA. Es necesario calcular la función de correspondencia entre la señal medida y cada una de las salidas para comprobar que todo funciona correctamente, y para deshacer la transformación, es necesario calcular la función inversa para cada una de las señales. La función directa, calculada para el caso general, queda:

$$I(mA) = \frac{I_{max} - I_{min}}{V_{max} - V_{min}} * V(u_{sensor}) + I_{min}$$

La función inversa, para pasar de intensidades a valores medidos en cada sensor, queda:

$$V(u_{sensor}) = \frac{I(mA) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} * (V_{max} - V_{min})$$

Siendo  $I_{max}$  la intensidad máxima de la salida, 20mA,  $I_{min}$  la intensidad mínima de la salida, 4mA,  $V_{max}$  y  $V_{min}$  las variables máximas y mínimas que el sensor puede medir,  $I(mA)$  la intensidad que se recogerá en el sistema de adquisición de datos, y  $V(u_{sensor})$  la magnitud medida en ese momento.

Recopilando cada uno de los rangos, se tiene:

- Caudalímetro: de los 0,63 m<sup>3</sup>/h hasta los 31,25 m<sup>3</sup>/h.

Las funciones de correspondencia son:

$$I(mA) = \frac{20 - 4}{31,25 - 0,63} * V(u_{sensor}) + 4 = 0,522 * V(u_{sensor}) + 4 (mA)$$

$$V(u_{sensor}) = \frac{I(mA) - 4}{20 - 4} * (31,25 - 0,63) = 1,913 * (I(mA) - 4) (u_{sensor})$$

- Sensores de presión: de 0 bar hasta 10 bar.

Las funciones de correspondencia son:

$$I(mA) = \frac{20 - 4}{10 - 0} * V(u_{sensor}) + 4 = 1,6 * V(u_{sensor}) + 4 (mA)$$

$$V(u_{sensor}) = \frac{I(mA) - 4}{20 - 4} * (10 - 0) = 0,625 * (I(mA) - 4) (u_{sensor})$$

- Báscula: de 0 kg hasta los 600kg.

Las funciones de correspondencia son:

$$I(mA) = \frac{20 - 4}{600 - 0} * V(u_{sensor}) + 4 = 0,0266 * V(u_{sensor}) + 4 (mA)$$

$$V(u_{sensor}) = \frac{I(mA) - 4}{20 - 4} * (600 - 0) = 37,5 * (I(mA) - 4) (u_{sensor})$$

### **3.6 Ensayos de calibración**

#### **3.6.1 Conceptos a usar en los ensayos del banco de pruebas**

Debido a que los ensayos tienen variaciones tanto de presión como de caudal a lo largo de su duración, conviene definir exactamente el punto del que se habla para evitar ambigüedades. Por ello se define:

- Caudal principal: El caudal que se tiene dentro de las tuberías hasta el punto en el que hay una fuga. Es la suma del caudal fugado y del caudal pasante.
- Caudal pasante: el caudal después de la fuga y que permanece dentro de las tuberías para volver al depósito.
- Caudal fugado: El caudal que sale de las tuberías debido al defecto, independientemente de si hay o no hay tierra.
- Presión bomba: El valor de la presión después de las bombas y a la que se encuentra el calderín.
- Presión principal: Presión del sistema después de pasar por el elemento (4) y ser fijada por éste.
- Presión después de la fuga: Presión residual del sistema, una vez la fuga ha provocado una bajada.
- Grandes caudales: Todos aquellos con un valor lo suficientemente grande como para tener, al menos, una bomba funcionando permanentemente.
- Pequeños caudales: Todos aquellos con un valor lo suficientemente pequeño como para tener las bombas paradas durante intervalos de tiempo, pero que siguen entrando a rango de medida del caudalímetro.
- Muy pequeños caudales: Todos aquellos con un valor lo suficientemente pequeño como para que ni los caudalímetros ni las bombas puedan funcionar.

### 3.6.2 Ensayo de calibración de calderín

#### Justificación

El objetivo de este ensayo es obtener una curva que relacione en todo momento la masa de agua que hay dentro del calderín con la presión interior del mismo (6a).

Como se ha dicho, el calderín, además de servir como elemento de regulación y estabilización de la presión de suministro, puede utilizarse en ocasiones también para la medida del volumen de fugas, cuando las fugas sean muy pequeñas, por debajo del umbral de medida de los caudalímetros. Además, si en algún ensayo cambia la presión en el calderín, la curva anterior nos informará del volumen extra suministrado y almacenado por el mismo entre el principio y el final del ensayo.

Este valor ayudará a obtener otros datos en siguientes ensayos. El esquema de la instalación es el siguiente:

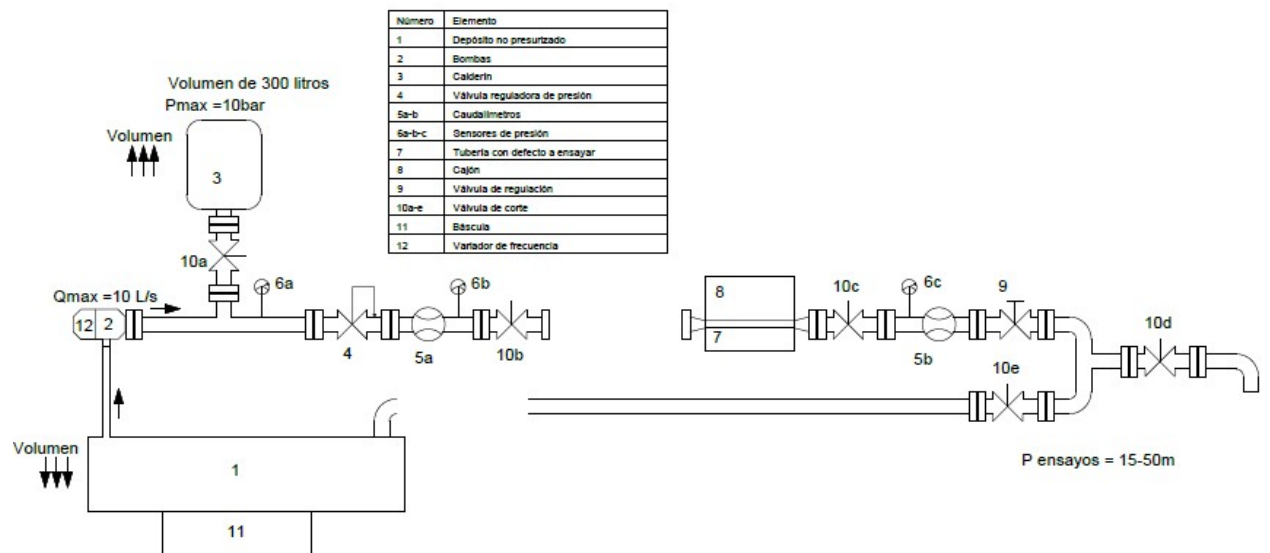


Figura 61. Esquema de funcionamiento de la instalación para la calibración de los calderines.

### **Desarrollo del ensayo**

1. Se comprueba que el calderín (3) está completamente vacío y el depósito (1) tiene 500 litros aproximadamente, lo que corresponde con un valor superior a la capacidad máxima de la báscula.
2. Se cierra la válvula de regulación (4) o la de corte (10b) de forma que el caudal bombeado solamente puede pasar al calderín. El resto de elementos, aunque físicamente estén instalados, no intervienen en este ensayo.
3. Se conecta una de las bombas a velocidad de giro reducida, de modo que el calderín se llene lentamente. Si la velocidad de giro se mantiene constante, el caudal bombeado variará ligeramente con la presión en el calderín, lo cual no afecta en principio al ensayo.
4. Se mide en cada momento la masa de agua en el depósito (1) mediante la báscula (11) sobre la que descansa. Para el mismo instante, se toma la presión en el calderín (3) mediante el sensor acoplado (6a).
5. Para sincronizar los instantes de medida sería conveniente registrar parejas de datos instante-medida para cada uno de los sensores. Los tiempos de arranque deben sincronizarse también.
6. A partir de los datos medidos en cada momento, se puede establecer una relación de la masa de agua en el calderín y la presión en su interior.

### Notas:

- Según las leyes de la termodinámica, el volumen de agua (o de aire) está ligado a la presión absoluta del gas. Supondremos por ahora que las oscilaciones de la presión atmosférica no van a afectar apenas a la relación presión-volumen obtenida.
- Por otra parte, la relación presión-volumen puede verse afectada por la rapidez de la expansión o compresión del gas. Asumiremos que la evolución del nivel en el calderín va a ser suficientemente lenta tanto en el proceso de calibración, como en los casos en los que se utilice el calderín para la medida del volumen fugado, en el caso de fugas muy pequeñas (por debajo de la sensibilidad del caudalímetro).



### 3.6.3 Ensayo de calibración de los caudalímetros

#### Justificación

El objetivo de este ensayo es comprobar que los caudalímetros miden correctamente, y que la integración en el tiempo de las medidas de caudal, proporciona correctamente el volumen de paso entre los instantes de inicio y fin de los ensayos. El primer caudalímetro debe ser calibrado para dos situaciones. En la primera, los caudales se consideran pequeños, por lo que las bombas no se encuentran funcionando de manera continua.

El esquema de la instalación en ambos ensayos es el mismo, y se muestra en la imagen siguiente:

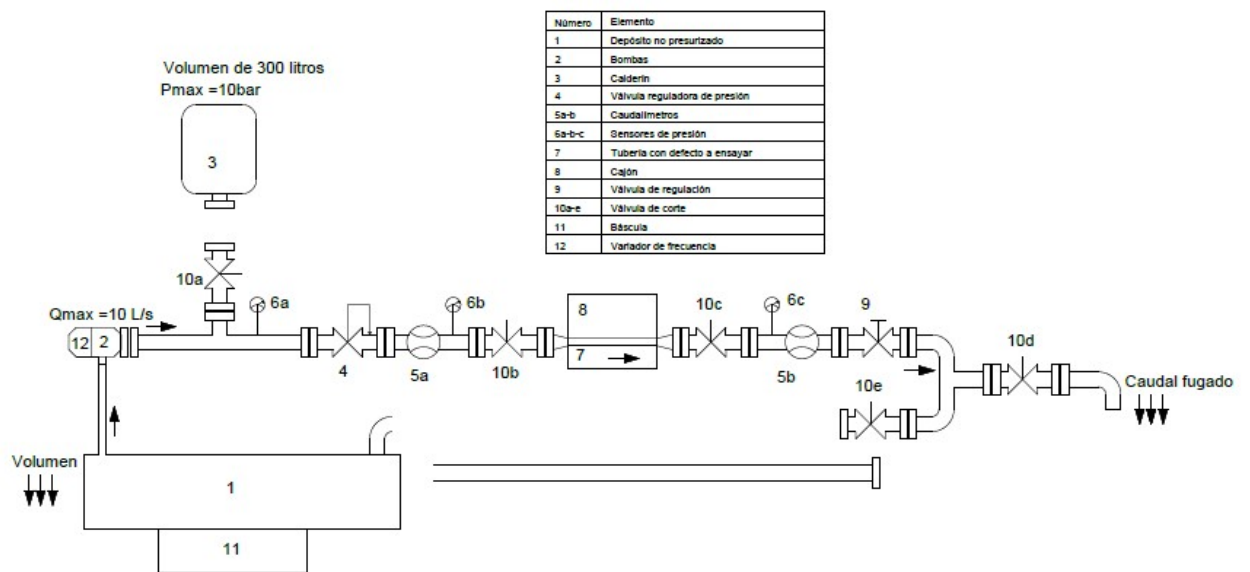


Figura 62. Esquema de funcionamiento de la instalación para la calibración de los caudalímetros.

### ***Desarrollo del ensayo en situación de bajos caudales.***

1. Se comprueba que la bomba de velocidad variable es capaz de suministrar un valor de caudal suficientemente bajo como para funcionar de manera continua. De ser así, se cierra el calderín y se omiten, en este ensayo, todas las tareas referentes al mismo. Al ser un ensayo de calibración, conviene mantener acotadas, en la medida de lo posible, todas las fuentes de error posibles, por eso es mejor eliminar el calderín (3), si es posible.
2. Se comprueba que el depósito (1) tiene 500 litros aproximadamente, y que el calderín (3) se encuentra completamente vacío. El calderín debe de haberse calibrado antes de realizar este ensayo, debido a que la bomba, al funcionar a bajos caudales, va a funcionar intermitentemente, y debe de considerarse la masa acumulada en el depósito.
3. Se instala un elemento (7) sin defecto, para no tener otras variables en el ensayo.
4. Se elimina temporalmente la recirculación al depósito (1), mediante el cierre de la válvula de corte (10b). En estos ensayos, ambos caudalímetros pueden ser calibrados simultáneamente si en vez de cerrar la válvula de corte (10b) se cierra la válvula de corte (10d). La variación de masa ahora se corresponde con el caudal medido en los caudalímetros (5a-,b, en caso de ensayar a la vez) y la variación de masa en (3).
5. Se enciende la bomba de velocidad variable, la cual descarga al suelo de la piscina, tras pasar por el caudalímetro (5a), y al calderín (3). Se controla mediante (9) el caudal pasante por la rama del caudalímetro (5a), para conseguir los valores de las magnitudes adecuadas para la realización de los ensayos. Los valores de caudal para calibrar el caudalímetro se corresponden con valores entre el valor Q1 y Q2 del catálogo del caudalímetro.
6. Se toma en todo momento el valor de masa en el depósito (1), en el calderín (3) y el caudal medido en el caudalímetro (5a).
7. A partir de la escala común de tiempos, y de los datos medidos en cada momento, se puede establecer una relación de la masa perdida en el depósito para validar el caudal medido en los caudalímetros.

***Desarrollo del ensayo en situación de grandes caudales.***

1. En este caso, las bombas son capaces de funcionar de manera continua por lo que el primer paso es el cierre del calderín (3), para eliminar la variación de masa en el mismo para eliminar todas las fuentes de error posibles.
2. Se comprueba que el depósito (1) tiene 500 litros aproximadamente.
3. Se instala un elemento (7) sin defecto, para no tener otras variables en el ensayo.
4. Se elimina temporalmente la recirculación al depósito (1), mediante el cierre de la válvula de corte (10b) o (10d). En estos ensayos, ambos caudalímetros pueden ser calibrados simultáneamente. La variación de masa ahora se corresponde con el caudal medido en los caudalímetros (5a-b, en caso de calibrar ambos simultáneamente).
5. Se enciende la bomba de velocidad variable, la cual descarga al suelo de la piscina, tras pasar por el caudalímetro (5a). Se controla mediante (9) el caudal pasante por la rama del caudalímetro (5a), para conseguir los valores de las magnitudes adecuadas para la realización de los ensayos. Los valores de caudal para calibrar el caudalímetro se corresponden con valores entre el valor Q2 y Q4 del catálogo del caudalímetro.
6. Se toma en todo momento el valor de masa en el depósito (1) y el caudal medido en los caudalímetros (5a-b, en caso de calibrar ambos a la vez).
7. A partir de la escala común de tiempos, y de los datos medidos en cada momento, se puede establecer una relación de la masa perdida en el depósito para validar el caudal medido en los caudalímetros.

#### **3.6.4 Calibración del segundo caudalímetro**

Debido a que los dos caudalímetros se encuentran en la misma línea, es posible ensayar ambos a la vez. Sin embargo, el segundo caudalímetro no va, en principio, a funcionar en situaciones de bajos caudales, por lo que no es necesaria su calibración en ese caso. También es posible usar el primer caudalímetro para la calibración del segundo, y en este caso el orden de operaciones es:

1. Se comprueba que el depósito (1) tiene 500 litros aproximadamente. En este caso, dejar el calderín (3) abierto o no es irrelevante, al no usarse la báscula (11) y no necesitar hacer balances de masa en el depósito (1). A su vez, es indiferente dejar disponible la recirculación al depósito o no.
2. Se instala un elemento (7) sin defecto, para no tener otros flujos de caudal en el ensayo.
3. Se enciende la bomba de velocidad variable para que el caudal pase por ambos caudalímetros (5a-b). Se controla mediante (9) el caudal pasante por la rama del caudalímetro (5b), para conseguir los valores de las magnitudes adecuadas para la realización de los ensayos. Los valores de caudal para calibrar el caudalímetro se corresponden con valores entre el valor Q2 y Q4 del catálogo del caudalímetro.
4. Se toma en todo momento el valor del caudal medido en los caudalímetros (5a-b).
5. A partir de la escala común de tiempos, y de los datos medidos en cada momento, se puede establecer una relación entre ambos caudalímetros para validar el caudal medido en el segundo.

### 3.7 Protocolos de actuación

#### 3.7.1 Ensayo de grandes caudales con caudal pasante

##### Justificación

Estos ensayos son los que se pueden considerar la mayor parte de los que se van a realizar en el banco. Se van a realizar de forma similar, tanto con tierra, como sin tierra. El orden propuesto y los esquemas de funcionamiento son los siguientes:

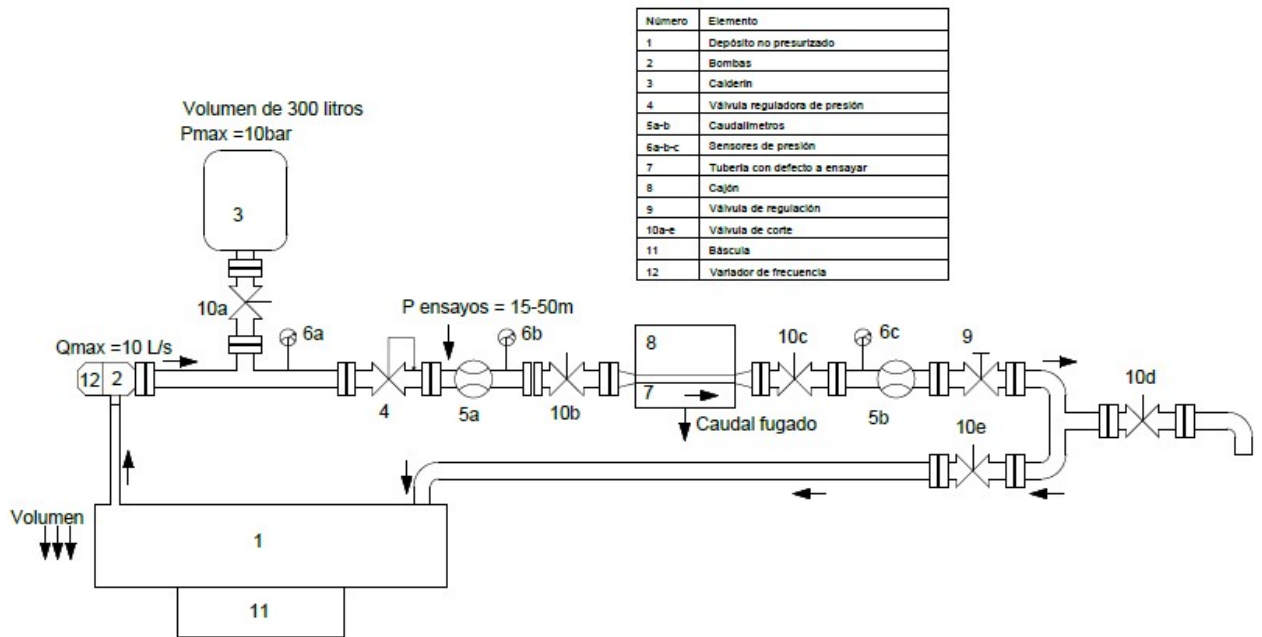


Figura 63. Esquema de funcionamiento de la instalación, en condiciones normales de funcionamiento.

***Desarrollo del ensayo en situación de grandes caudales.***

1. Se comprueba que el depósito (1) tiene 500 litros aproximadamente, lo que se corresponde con la capacidad de máxima de la báscula (11). Se abre el calderín (3) para ser usado como amortiguador del punto de funcionamiento de las bombas, y en este caso, si se desea usar la báscula (11) para la medida del caudal fugado junto con los caudalímetros (5a-b), conviene que el calderín (3) esté vacío en el momento de empezar los ensayos.
2. Se conecta el defecto que se desea ensayar en (7) junto con el cajón en (8), tanto con tierra, como sin tierra.
3. Se asegura que la válvula (9) está completamente abierta.
4. Se encienden las bombas (2) y se escoge un primer punto de ensayos en la válvula reductora (4). Se recomienda escoger un valor de presión pequeño (cercano a 15mca) primero, junto el valor de caudal lo más grande posible, e ir aumentando progresivamente el valor de la presión mediante la válvula reductora (4).
5. Se deja estabilizar el sistema y se toman valores con los caudalímetros (5a-b) y la báscula (11) de los valores del agua perdida en el defecto (7).
6. Se cambia la abertura de (9) para sacar datos del efecto que tiene el valor del caudal principal en el fugado. Se controla el punto de funcionamiento de las bombas con el cambio de la velocidad de giro de la bomba de velocidad variable para no cambiar el valor de presión medida en (6b), aguas arriba de la fuga.
7. Se deja estabilizar el sistema y se toman valores con los caudalímetros (5a-b) y la báscula (11).
8. Tras un barrido completo de la variable caudal para esa presión, gracias al manejo de (9), se abre completamente (9) para volver al paso inicial y se escoge un nuevo punto de presión superior para (4).
9. Se repite el proceso hasta ensayar toda la combinatoria posible de presión en (4) y caudal en (9), tanto con tierra como sin tierra.
10. Entre los cambios de la consigna de presión mediante la válvula reductora (4), se aconseja ver el volumen de agua perdido en el depósito (1) durante la etapa de ensayo anterior, y rellenar el depósito (1) con agua hasta tener un valor aproximado de 500 kilogramos en su interior, medidos con (11), para tener la seguridad de poder terminar el siguiente paso del ensayo.

11. A partir de la escala común de tiempos, y de los datos medidos en cada momento, se puede obtener la ley de fugas del defecto debida a la presión aguas arriba del sistema, medida en (6b), junto con la interacción del caudal principal medido en el caudalímetro (5a), en el comportamiento de la ley de fugas. El sistema depósito-báscula (1 y 11) junto con el calderín (3) sirven para contrastar las medidas del caudalímetro (5a-b).
12. Tras el ensayo, se cierran las válvulas de corte (10), y se extrae el cajón de tierra y se realizan los estudios y fotos de movimiento de los materiales en el cajón que se consideren, en el caso de los ensayos con tierra.

### 3.7.2 Ensayo sin caudal pasante en el que los caudalímetros entran en rango de medida

#### Justificación

En este caso, el caudal fugado, el cual es una incógnita, puede ser un antes denominado como pequeño caudal o gran caudal. En este caso, hay dos posibilidades, que dependen de si la bomba es capaz de funcionar de manera continua (grandes caudales), o no.

En el caso de grandes caudales, una de las bombas puede funcionar continuamente, aunque sea a una velocidad inferior a la nominal. El esquema del proceso es:

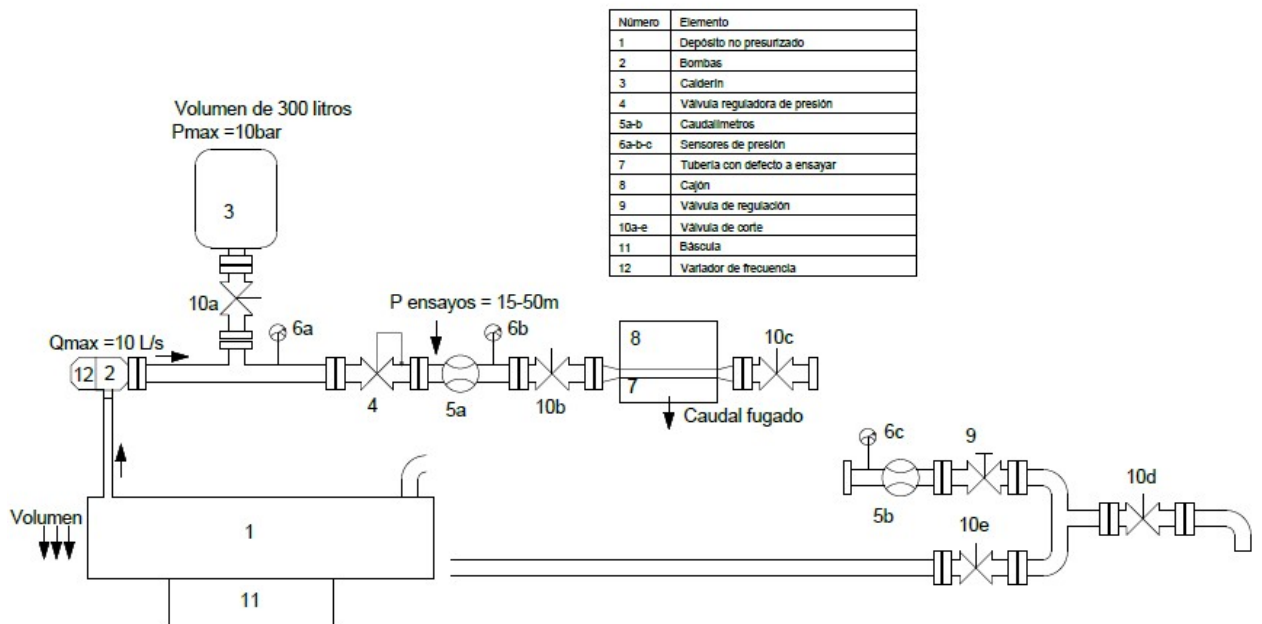


Figura 64. Esquema de funcionamiento de la instalación, en condiciones de funcionamiento sin caudal pasante.

***Desarrollo del ensayo en situación de grandes caudales sin caudal pasante.***

1. Se comprueba que el depósito (1) tiene 500 litros aproximadamente, y que el calderín (3) se encuentra abierto para estabilizar el sistema. En este caso, si se desea usar la báscula (11) para la medida del caudal fugado junto con el caudalímetros (5a), conviene que el calderín (3) esté vacío en el momento de empezar los ensayos.
2. Se conecta el defecto que se desea ensayar en (7). En este caso, la válvula (10d) se cierra, con lo que también se corta la recirculación al depósito (1). El segundo caudalímetro (5b) no toma medidas en este caso.
3. Se enciende la bomba (2) y se escoge un primer punto para ensayar la presión en la válvula reductora (4). Se recomienda escoger un valor de presión pequeño (15m) primero, e ir progresivamente en aumento.
4. Se deja estabilizar el sistema y se toman valores con el caudalímetro (5a) y la báscula (11). Para ello, es necesario tomar también la variación de masa que ocurre en (3).
5. Se escoge un nuevo punto en (4) y se vuelve a ensayar.
6. Se deja estabilizar el sistema y se toman valores con el caudalímetro (5a) y la báscula (11), junto con la variación de masa que ocurre en (3).
7. En este caso, el ensayo termina tras un único barrido de la válvula reductora (4).
8. A partir de la escala común de tiempos, y de los datos medidos en cada momento, y debido a que el caudalímetro entra en rango de medida, se puede obtener la ley de fugas del defecto debida a la presión aguas arriba del sistema, medida en (6b), junto con el valor del caudal medido en el caudalímetro (5a). El sistema depósito-báscula (1 y 11) junto con el calderín (3) sirven para contrastar las medidas del caudalímetro (5a).



***Desarrollo del ensayo en situación de pequeños caudales sin caudal pasante.***

En este caso, una de las bombas funciona intermitentemente, trabajando contra el calderín. En este caso el esquema es muy similar al apartado anterior:

1. Se comprueba que el depósito (1) tiene 500 litros aproximadamente, y que el calderín (3) se encuentra abierto para estabilizar el sistema y aceptar el caudal en los periodos en los que las bombas funcionen.
2. Se conecta el defecto que se desea ensayar en (7). En este caso, también, la válvula (10) se cierra, con lo que también se corta la recirculación al depósito (1). El segundo caudalímetro (5b), por lo tanto, no toma medidas.
3. Se enciende la bomba (2) y se escoge un primer punto para ensayar la presión en la válvula reductora (4). Se recomienda escoger un valor de presión pequeño (15m) primero, e ir progresivamente en aumento.
4. Se deja estabilizar el sistema y se toman valores con el caudalímetro (5a) y la báscula (11). Para ello, es necesario tomar también la variación de masa que ocurre en (3).
5. Se escoge un nuevo punto en (4) y se vuelve a ensayar.
6. Se deja estabilizar el sistema y se toman valores con el caudalímetro (5a) y la báscula (11), junto con la variación de masa que ocurre en (3).
7. En este caso, el ensayo termina tras un único barrido de la válvula reductora (4).
8. A partir de la escala común de tiempos, y de los datos medidos en cada momento, y debido a que el caudalímetro entra en rango de medida, se puede obtener la ley de fugas del defecto debida a la presión aguas arriba del sistema, medida en (6b), junto con el valor del caudal medido en el caudalímetro (5a). El sistema depósito-báscula (1 y 11) junto con el calderín (3) sirven para contrastar las medidas del caudalímetro (5a).
9. Este caso es prácticamente igual al caso de grandes caudales sin caudal pasante. La diferencia es la intermitencia de las bombas, lo que puede suponer un mayor grado de inestabilidad al usar las medidas de la báscula (11) y el calderín (3). Así mismo, las vibraciones del arranque y paro de las bombas pueden afectar al caudalímetro (5a), por lo que a la hora de realizar los ensayos, y si se considera conveniente, pueden alargarse los periodos de estabilidad del sistema, y hacer los ensayos de mayor duración.

### 3.7.3 Ensayo sin caudal pasante en el que los caudalímetros no entran en rango de medida

#### Justificación

En este caso, el caudal fugado es lo suficientemente pequeño como para no entrar en rango de los caudalímetros (5a-b). Por ello, para sacar la ley de fugas del defecto, la única opción es hacer balances de masa mediante el calderín (3) y el ensayo de calibración del mismo, explicado con anterioridad.

En este caso, el esquema es homólogo a los dos casos anteriores, como puede verse a continuación:

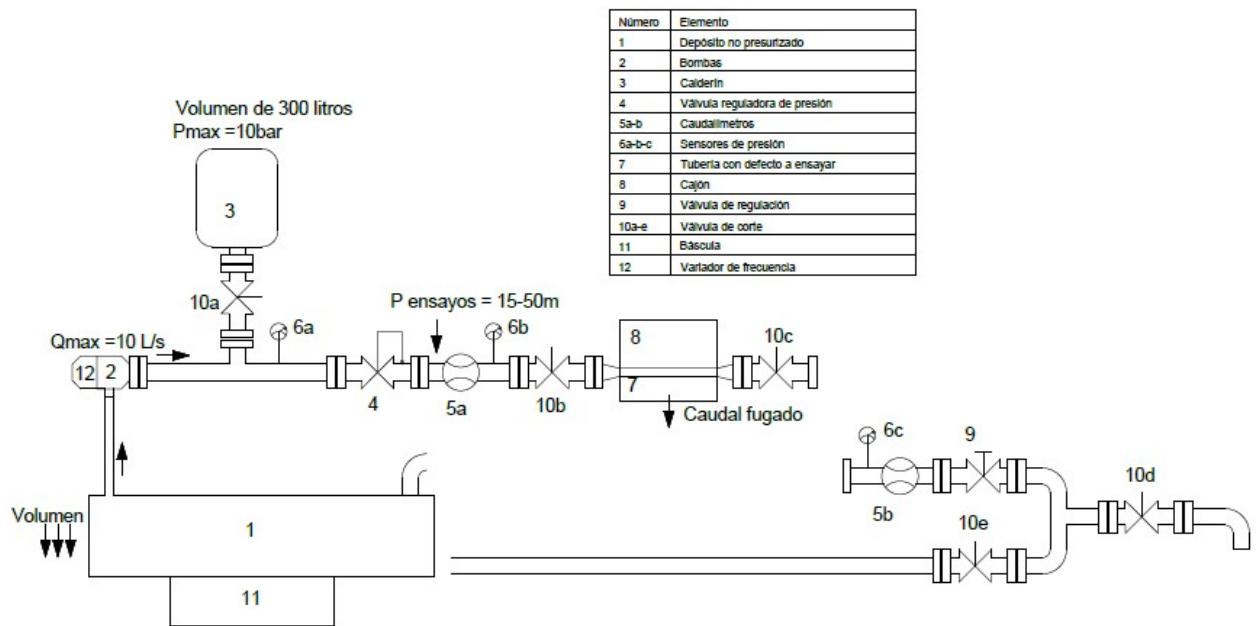


Figura 65. Esquema de funcionamiento de la instalación, en condiciones de funcionamiento sin caudal pasante, en el que los caudalímetros no entran en rango de medida.

***Desarrollo del ensayo en situación de muy pequeños caudales sin caudal pasante, en el que el caudalímetro es incapaz de medir.***

1. Antes de empezar los ensayos, se procede a calibrar el calderín, siguiendo todos los pasos explicados anteriormente, y se deja lleno, listo para ser usado. Se vuelve a mostrar el proceso de calibración del calderín, en pasos sucesivos.
  - a. Se comprueba que el calderín (3) está completamente vacío y el depósito (1) tiene 500 litros aproximadamente, lo que corresponde con la capacidad máxima de la báscula.
  - b. Se cierra la válvula de regulación (4) o de corte (10b) de forma que el caudal bombeado solamente puede pasar al calderín. El resto de elementos, aunque físicamente estén instalados, no intervienen en este ensayo.
  - c. Se conecta una de las bombas a velocidad de giro reducida, de modo que el calderín se llene lentamente. Si la velocidad de giro se mantiene constante, el caudal bombeado variará ligeramente con la presión en el calderín, lo cual no afecta en principio al ensayo.
  - d. Se mide en cada momento la masa de agua en el depósito (1) mediante la báscula (11) sobre la que descansa. Para el mismo instante, se toma la presión en el calderín (3) mediante el sensor acoplado (6a).
  - e. Para sincronizar los instantes de medida sería conveniente registrar parejas de datos instante-medida para cada uno de los sensores. Los tiempos de arranque deben sincronizarse también.
  - f. A partir de los datos medidos en cada momento, se puede establecer una relación de la masa de agua en el calderín y la presión en su interior.
2. Se apagan las bombas (2) para usar exclusivamente el calderín, y se abre la válvula de corte (10b) previa al defecto de (7), para empezar el ensayo.
3. En este caso, se empieza ensayando a una presión superior (50mca), debido a que, al estar lleno el calderín y al irse vaciando progresivamente, al empezar por la presión inferior y terminar por la superior puede no ser posible terminar el ensayo.
4. Debido a que los caudales fugados son muy bajos, se debe dejar el punto ensayado un largo tiempo, lo suficiente para comprobar que el error cometido por la incertidumbre de calibración del calderín es despreciable.
5. Una vez tomado un valor de masa de agua fugado lo suficientemente grande, se cambia la consigna de presión en (4) a un valor inferior distinto.
6. En este caso, el ensayo termina tras un único barrido de valores en la reductora de presión (4).
7. La ley de fugas en este caso se obtiene con una correlación entre la masa perdida en el calderín (3), el valor de la presión medido en (6a) y mantenido por la reductora (4), y un balance de tiempos lo suficientemente grande para no cometer errores significativos.

## **4 Resultados de los ensayos en el banco de pruebas**

### **4.1 Introducción**

Tras explicar la instalación montada en Emivasa, su sistema de toma y almacenamiento de datos, y proponer la forma de ensayar elementos en los mismos, se procede a mostrar los resultados obtenidos tras usar el banco.

Al ser un banco de nueva construcción, esta parte del trabajo tiene un doble objetivo. El primero es el uso del banco en sí mismo, para comprobar su correcto funcionamiento, conseguir experiencia en su manejo, aprender sobre sus prestaciones reales de funcionamiento y rangos de presiones y caudales en los que puede trabajar, etc. El segundo objetivo es, una vez comprobado el primero, el ensayo de las primeras fugas, tanto para seguir estudiando su manejo como para poder plantear mejor futuros ensayos.

Como primer paso, se usa el banco sin defectos para comprobar que todo funciona correctamente. Para ello, se plantean unos breves ensayos para probar y practicar el manejo de la válvula reguladora de presión y la válvula reguladora de caudal. Mientras se prueba el manejo de las válvulas, estos primeros ensayos sirven para familiarizarse tanto con el manejo de las bombas y el variador, como con el sistema de adquisición de datos.

Una vez se entiende el manejo básico de la instalación, se muestran los ficheros de salida de datos, resultado del manejo del sistema de adquisición, los cuales deben de ser tratados para obtener los resultados deseados.

El siguiente paso mostrado en el trabajo es el tratamiento de la información contenida en esos ficheros. Una vez los ficheros son tratados, se procede a mostrar los resultados obtenidos, los cuales son el objetivo final de esta parte del trabajo. El tratamiento de datos debe de hacerse tras cada ensayo, por lo que se plantea la elaboración de un programa que ayude a mostrar la información de forma cómoda, rápida y automática.

Una vez se ha demostrado que el programa de tratamiento de la información y el banco de ensayos funcionan bien, se muestran los ensayos de defectos reales que se van a realizar en el banco. Se acompañan con fotos de los defectos ensayados, y se dan datos de su material, diámetro del tubo, tamaño del defecto, y forma en el que se han producido. Para finalizar se elaboran unas conclusiones de los resultados obtenidos.

## 4.2 Comprobación del correcto funcionamiento del banco

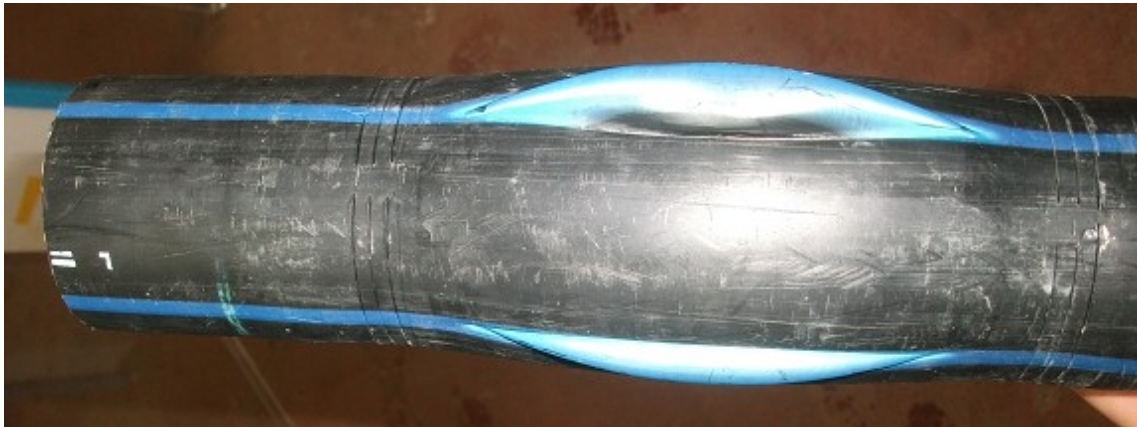
Los primeros ensayos sin defecto se han centrado en obtener resultados de los sensores instalados y comprobar su correcto funcionamiento. Para ello, se ha encendido la instalación, programado el variador de las bombas en un punto estacionario, y manejado ambas válvulas de regulación (caudal y presión) por separado, realizando un breve barrido, mientras que el sistema de adquisición de datos está encendido

Este manejo permite, entre otras cosas, comprobar que los sensores miden correctamente en todo su rango, los tiempos de establecimiento de la consigna en el banco, márgenes de funcionamiento del variador y las bombas, sensibilidades de las válvulas, capacidad real del calderín, estabilidad alrededor de la consigna, etc.

Previo a la realización de estos ensayos, se han realizado otros en condiciones estacionarias, los cuales no han sido explicados en la memoria anterior por solo tener que realizarse una vez, y no tener que calcular nada en ellos, pues son ensayos estáticos de resistencia de materiales.

El primer ensayo es el ensayo de estanqueidad, en el cual se deja la bomba encendida en una posición cualquiera y se mantiene el agua en circuito cerrado para comprobar que no hay pérdidas de agua en el sistema, y que todas las juntas y piezas han sido apretadas correctamente.

Una vez realizado se prueba el ensayo de presión máxima, para asegurar que la instalación tiene la resistencia adecuada. En el ensayo de presión máxima, se mantiene el sistema, mediante una bomba manual diferente al grupo de bombeo, a una presión de 15 bares durante media hora, hasta que uno de los tubos colapsa. La foto del elemento dañado puede verse a continuación:



*Figura 66. Elemento dañado por presión excesiva.*

### 4.3 Ficheros de salida de resultados

El fichero de salida de resultados recoge, segundo a segundo, las variables mostradas en la siguiente imagen, correspondiente al panel de visualización del sistema de toma de datos:



*Figura 67. Pantalla de visualización de resultados.*

Las presiones 1, 2 y 3 se corresponden con las presiones de los sensores instalados (6 a-b-c) en el banco de fugas respectivamente. Es decir, el valor 1 se corresponde con el valor de presión en el calderín, y el 2 y 3 se corresponden con los valores antes y después de la fuga, tal y como puede verse en los planos antes mostrados. Notar que, debido a que la instalación de fugas se encuentra sobre una piscina con un sumidero, y hay pendiente en el suelo para que el agua vaya a ese sumidero, la cota física del sensor 3 es inferior, y por lo tanto, siempre marca 0,235 metros de columna de agua más que el 2, aproximadamente.

Los caudalímetros también se corresponden a lo indicado en los planos de la instalación, y el caudalímetro 1 da el valor de caudal aguas arriba de la fuga, y el caudalímetro 2 aguas abajo.

El sensor de presión 4 recoge el valor de la báscula, aunque esa no es la función para la que el panel está pensado. Sin embargo, al trabajar en la señal de 4 a 20 mA, la comunicación entre los componentes es posible, y solamente es necesario realizar la correspondencia entre señales a partir de las funciones de transferencia calculadas en apartados anteriores del presente trabajo.

Los datos, segundo a segundo, se guardan en un fichero que tiene el siguiente formato:

"VarName"	"TimeString"	"VarValue"	"Validity"	"Time_ms"
"Presion 4"	"2016-01-10 21:04:07"	118,5149	1	42379877863,8426
"Presion 3"	"2016-01-10 21:04:07"	-3,255209E-02	1	42379877863,8426
"Presion 2"	"2016-01-10 21:04:07"	-0,10489	1	42379877863,8426
"Presion 1"	"2016-01-10 21:04:07"	0,3472222	1	42379877863,8426
"Caudal 2 Directo"	"2016-01-10 21:04:07"	0	1	42379877863,8426
"Caudal 1 Directo"	"2016-01-10 21:04:07"	1,193576E-02	1	42379877863,8426
"Total Caudal 2 Directo"	"2016-01-10 21:04:07"	0	1	42379877863,8426
"Total Caudal 1 Inverso"	"2016-01-10 21:04:07"	0	1	42379877863,8426
"Total Caudal 1 Directo"	"2016-01-10 21:04:07"	0	1	42379877863,8542
"Caudal 2 Inverso"	"2016-01-10 21:04:07"	0	1	42379877863,8542
"Caudal 1 Inverso"	"2016-01-10 21:04:07"	0	1	42379877863,8542
"Total Caudal 2 Inverso"	"2016-01-10 21:04:07"	0	1	42379877863,8542
"Presion 4"	"2016-01-10 21:04:08"	118,5149	1	42379877875,544
"Presion 3"	"2016-01-10 21:04:08"	-5,063657E-02	1	42379877875,544
"Presion 2"	"2016-01-10 21:04:08"	-0,1012731	1	42379877875,544
"Presion 1"	"2016-01-10 21:04:08"	0,390625	1	42379877875,544
"Caudal 2 Directo"	"2016-01-10 21:04:08"	0	1	42379877875,544
"Caudal 1 Directo"	"2016-01-10 21:04:08"	0	1	42379877875,544
"Total Caudal 2 Directo"	"2016-01-10 21:04:08"	0	1	42379877875,544
"Total Caudal 1 Inverso"	"2016-01-10 21:04:08"	0	1	42379877875,544
"Total Caudal 1 Directo"	"2016-01-10 21:04:08"	0	1	42379877875,5556

*Figura 68. Fragmento del fichero de salida del banco de ensayos.*

Se observa que el formato de datos es una larga lista, con 12 valores cada segundo. También conviene observar que se encuentran desordenados, y que hay más variables que las mostradas en el panel anterior, y que se corresponden con los sensores físicamente instalados. Esto es porque el sistema de toma de datos tiene capacidad para calcular los caudales inversos y con ellos calcular el caudal suministrado total, en caso de ser necesario para otras aplicaciones.

Por otra parte, el sistema de toma de datos solamente puede guardar un fichero a la vez, por lo que se debe ser especialmente cuidadoso para no borrar ensayos realizados, e ir pasando resultados según se van realizando los ensayos.



#### 4.4 Tratamiento de la información

Como ha podido verse en la imagen anterior, con el formato inicial de salida de los datos no es posible obtener las leyes de fugas, por lo que es necesaria la elaboración de un programa que automáticamente saque los resultados necesarios.

Se elabora el programa en VBA (Visual Basic for Applications) de Excel, debido a que el Excel es un programa ampliamente usado en Emivasa, y desean quedarse esos resultados y el programa que los prepara en un formato cómodo para trabajar. El programa realiza los siguientes pasos:

- La comprobación de que, para cada segundo, los datos se han extrapolado correctamente, y hay 12 datos para cada segundo. El ratio de extrapolación correcta es muy alto, pero no perfecto. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo en el cual no ha sido así, y solo hay 8 de 12 datos:

```

"Caudal 2 Inverso"      "2016-01-10 21:26:49"  0      1      42379893628,3565
"Caudal 1 Inverso"     "2016-01-10 21:26:49"  0      1      42379893628,3565
"Total Caudal 2 Inverso" "2016-01-10 21:26:49"  0      1      42379893628,3565
"Presion 4"           "2016-01-10 21:26:50"  118,5149  1      42379893640,0463
"Presion 3"           "2016-01-10 21:26:50"  51,88441  1      42379893640,0463
"Presion 2"           "2016-01-10 21:26:50"  51,64931  1      42379893640,0463
"Presion 1"           "2016-01-10 21:26:50"  52,08333  1      42379893640,0463
"Caudal 2 Directo"     "2016-01-10 21:26:50"  0      1      42379893640,0463
"Caudal 1 Directo"     "2016-01-10 21:26:50"  3,255209E-02  1      42379893640,0463
"Total Caudal 2 Directo" "2016-01-10 21:26:50"  0      1      42379893640,0463
"Total Caudal 1 Inverso" "2016-01-10 21:26:50"  0      1      42379893640,0463
"Total Caudal 1 Directo" "2016-01-10 21:26:51"  0      1      42379893640,0579

```

Figura 69. Fragmento del fichero de salida del banco de ensayos con error en los datos.

- La puesta en limpio de los datos por columnas, quedando un segundo por fila. Para evitar el problema de que el orden de los datos entre segundos puede variar, el programa se prepara de manera que identifique el tipo de dato que es y lo coloque en la columna correcta. Los datos limpios pueden verse a continuación:

Tiempo	Presión 1	Presión 2	Presión 3
21:04:21	37,79659	37,13108	37,31916
21:04:22	38,82017	38,22338	38,42954
21:04:23	39,86545	39,52185	39,82928
21:04:24	38,92868	38,50912	38,74783
21:04:25	41,05179	40,47309	40,61777

Figura 70. Datos del banco de ensayos tras pasarlos a limpio.

- La separación, mediante la escala de tiempos, de los diferentes ensayos que se hayan realizado a la vez en el mismo fichero de datos, y su separación en hojas individuales diferentes para realizar los cálculos individuales sobre cada uno de ellos, dependiendo del ensayo que sea.
- Un filtro de datos que elimine el ruido y que permita la eliminación de los datos tomados mientras se pasa de una consigna a otra, para asegurar que la fuga ha sido ensayada en condiciones estacionarias.
- Por último, los cálculos propios de cada ensayo, y su ordenación y puesta en gráficos para que Emivasa pueda guardarlos, elaborar conclusiones, trabajar sobre ellos en un futuro, etc.



#### 4.5 Resultados de los primeros ensayos

Los primeros ensayos del manejo de ambas válvulas han dado los siguientes resultados, una vez pasados por el programa de tratamiento de información:

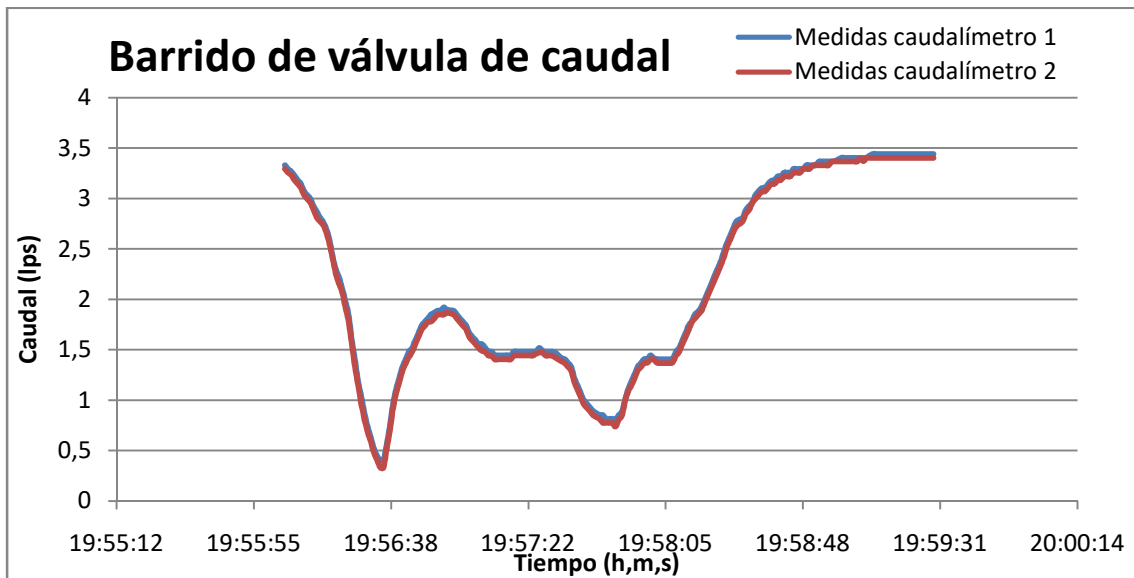


Figura 71. Gráfico de resultados del banco tras el manejo de la válvula reguladora de caudal.

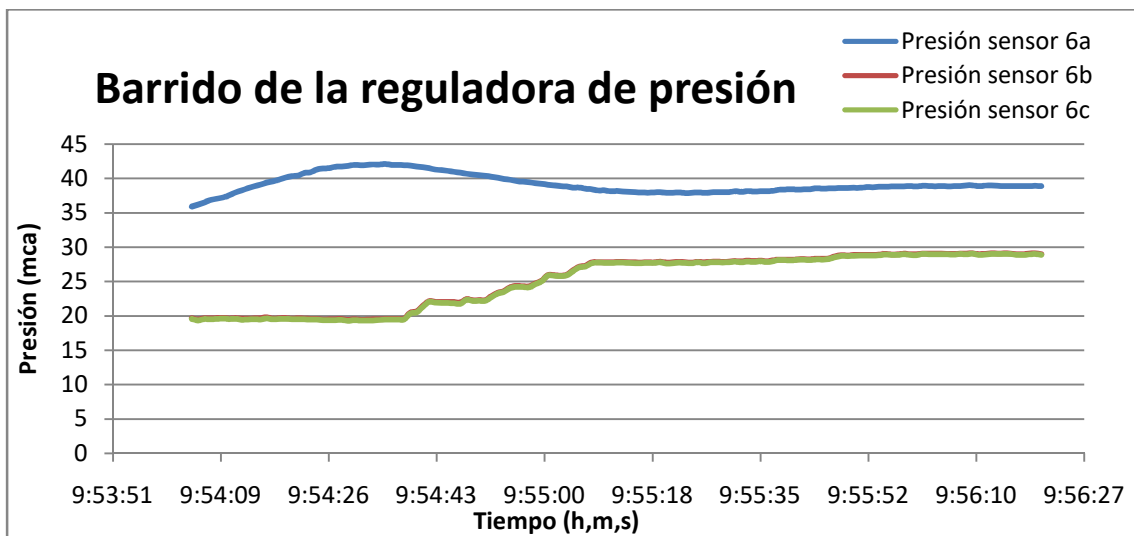


Figura 72. Gráfico de resultados del banco tras el manejo de la válvula reguladora de presión.

Tras el barrido de cada una de las válvulas, puede observarse cierto comportamiento interesante. El primero es, que aunque hay diferencias, los sensores miden lo mismo en todo el rango trazado. Destacar que el caudalímetro 1 mide más en todos los casos, concretamente 0,0368l/s más. La medida del sensor de presión 6c superior respecto al sensor 6b, debido a la diferencia de cota de instalación entre ambos, ya fue corregida anteriormente.

También se observan diferencias en los tiempos de establecimiento de las variables. Tras un manejo de la válvula reguladora de presión, la consigna logra estabilizarse prácticamente de forma instantánea, mientras que tras un movimiento de la válvula reguladora de caudal se tarda, aproximadamente, 15-20 segundos en alcanzar el valor de caudal en condiciones estacionarias.

Sobre la estabilidad de esas medidas respecto al punto de consigna, también hay diferencias a destacar. Se observan mejor en la siguiente tabla:

Presión 1	Presión 2	Presión 3	Caudal 1	Caudal 2
52,81757	42,52026	42,40099	3,740234	3,703342
52,83203	42,59983	42,4878	3,740234	3,703342
52,86458	42,5094	42,38291	3,740234	3,703342
52,88628	42,61429	42,45163	3,740234	3,703342
52,80671	42,53472	42,35759	3,740234	3,703342
52,81395	42,43345	42,23824	3,740234	3,703342
52,77416	42,36473	42,19483	3,740234	3,703342

Figura 73. Datos del banco de ensayos que muestra estabilidad de los caudalímetros.

Mientras que entre medidas consecutivas de los sensores de presión hay diferencias, los sensores de caudal llevan un filtro que ha estabilizado las medidas en un punto concreto, y que no cambiará hasta sobrepasar cierto margen, tanto por arriba como por abajo. En la tabla se puede observar la diferencia en las medidas de 0,0368l/s comentada anteriormente.

Sobre el funcionamiento del filtro de datos fuera de las condiciones estacionarias, se ponen como ejemplo las siguientes gráficas de otro barrido de la válvula reguladora de presión, filtradas y sin filtrar:

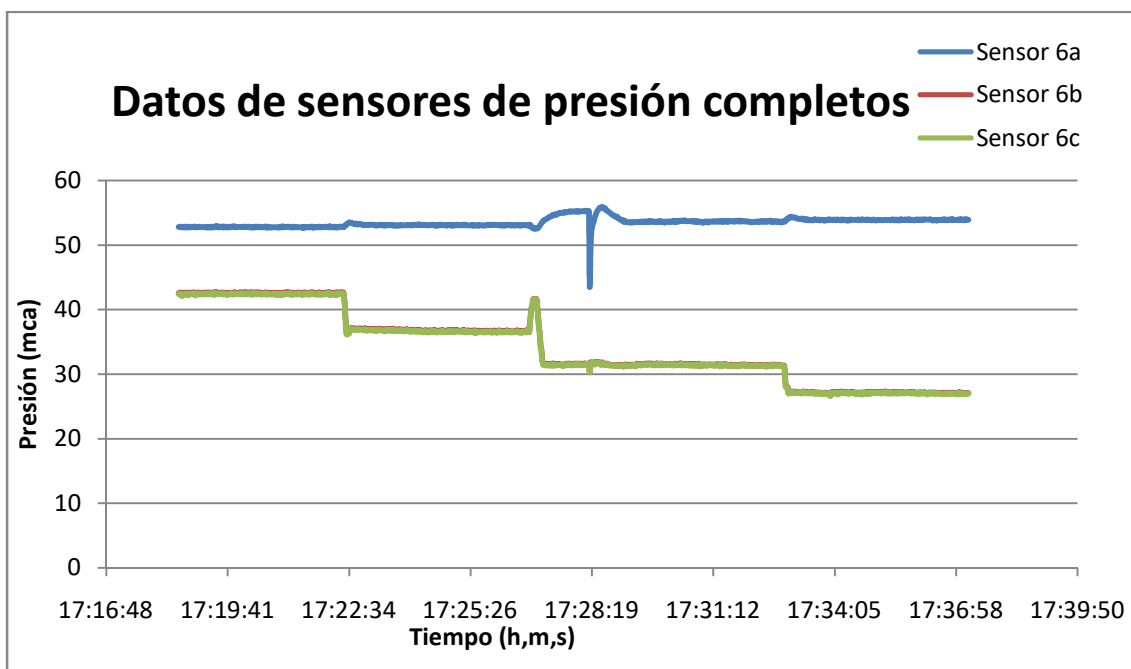
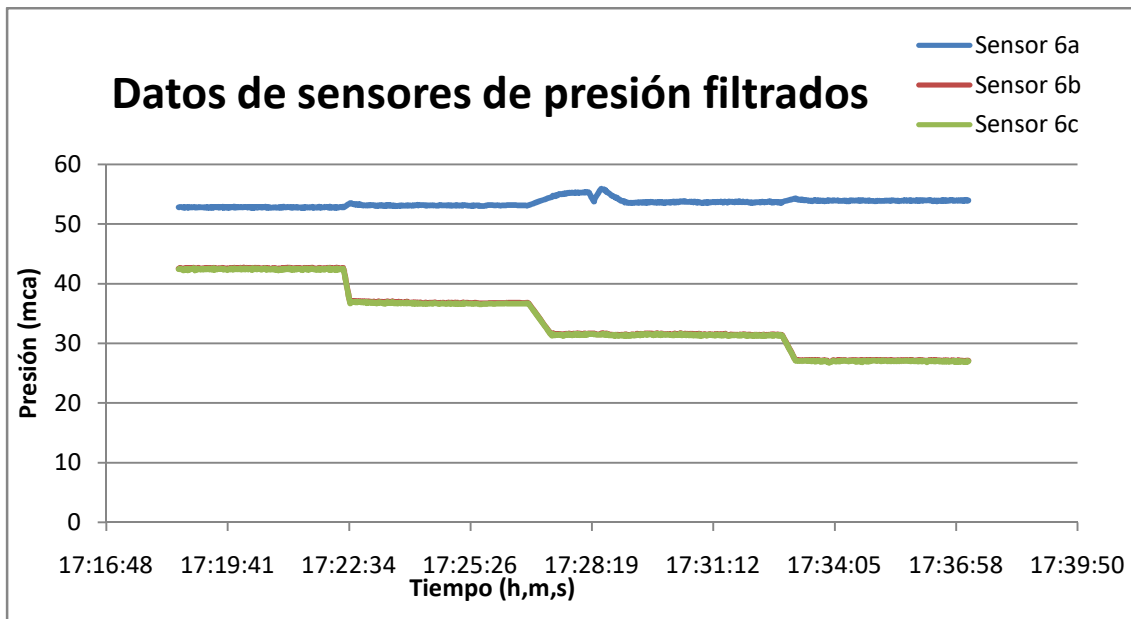


Figura 74. Resultados del banco de ensayos antes de filtrar los datos.



*Figura 75. Resultados del banco de ensayos después de filtrar los datos.*

Se observa que, durante la realización de los ensayos, al ser la válvula de regulación de presión de funcionamiento manual, el operario se puede equivocar y girar la válvula en sentido contrario, tal y como ocurre a las 17:26 horas aproximadamente, para luego girarla en sentido correcto y poner la consigna inferior buscada.

Por otra parte, ya sea como resultado de ese manejo brusco, o por inestabilidades y perturbaciones propias del sistema, hay unos datos anómalos sobre las 17:28 horas registrados en la primera imagen.

Al aplicar el filtro programado, se observa que las perturbaciones son menores, y se ha eliminado automáticamente de los datos la subida errónea de las 17:26 horas, y atenuado la inestabilidad de las 17:28 horas. A su vez, se sigue guardando la información necesaria para los ensayos, lo que deja los datos preparados para la obtención de la ley de fugas.

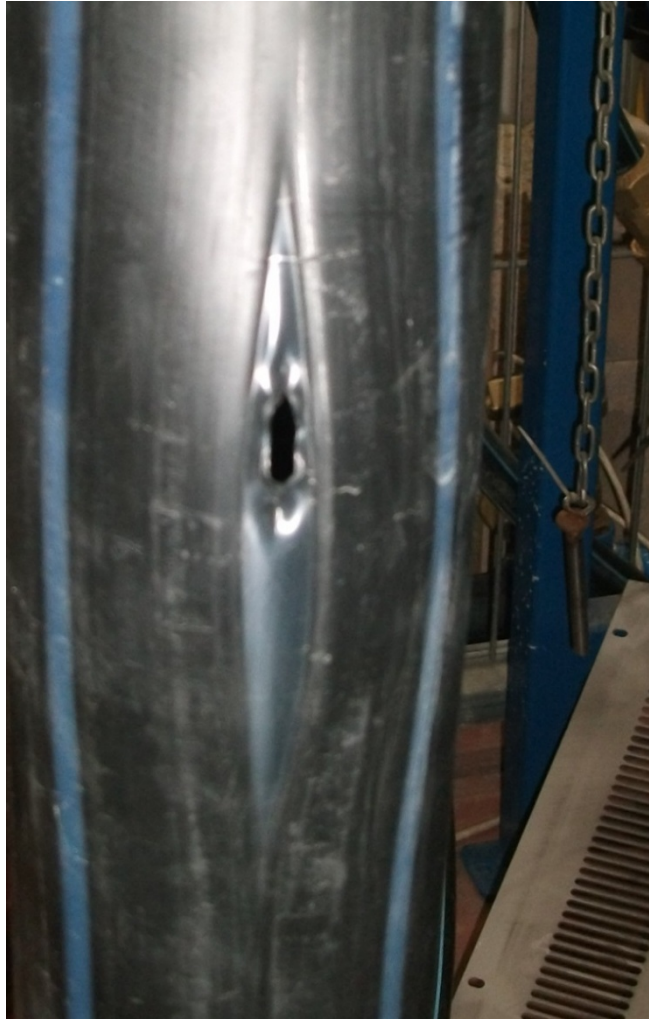
Con estos resultados, se ha asegurado que el banco de ensayos funciona correctamente, y se ha obtenido el conocimiento suficiente para su manejo correcto, por lo que se puede empezar a obtener la ley de fugas con la presión de los primeros defectos.

#### 4.6 Elementos a ensayar. Leyes de fugas

Una vez comprobado que el banco funciona correctamente, desde Emivasa se propone ensayar los siguientes defectos:

##### 4.6.1 Ensayo de un tubo “picado”

Este defecto iba a ser, en un principio, un defecto transversal. Sin embargo, a la hora de crearlo mediante una bomba manual a 200mca, el tubo falló por un punto distinto del que se había debilitado, por lo que el defecto resultante se parece más a un tubo con grieta longitudinal con desprendimiento de material. La foto del defecto es la siguiente:

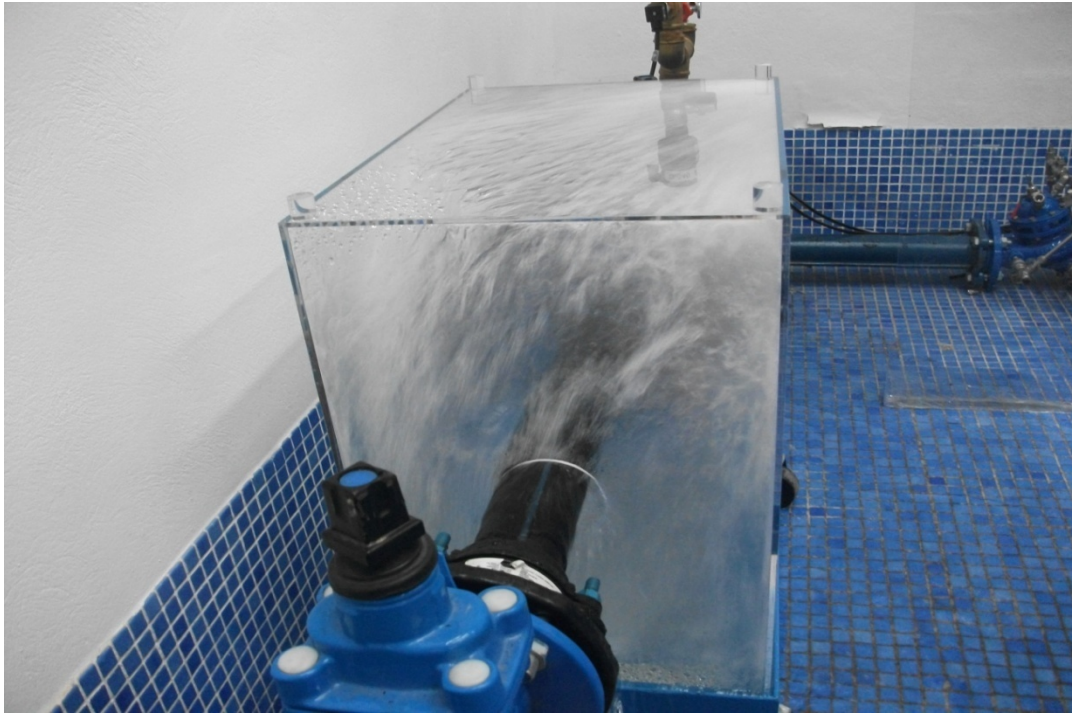


*Figura 76. “Picado” del tubo resultado de presión excesiva sin debilitación previa del material.*

El resumen del defecto es:

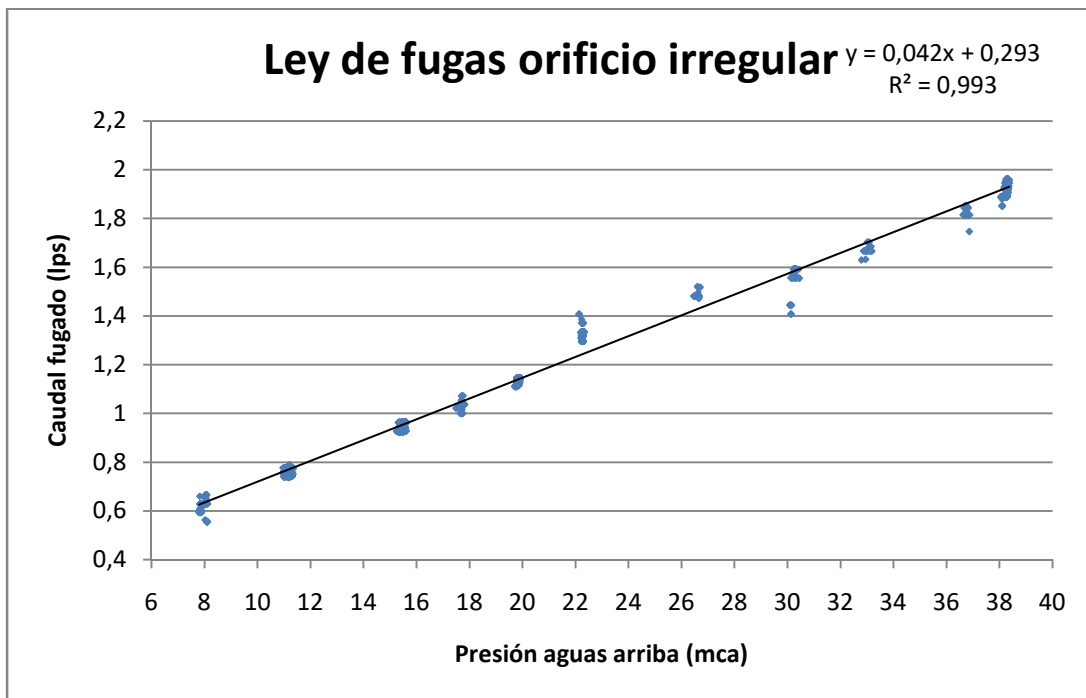
- Material: polietileno.
- Diámetro: DN65.
- Tipo de defecto: orificio.
- Largo: aproximadamente 2cm.
- Ancho: aproximadamente 5mm.

Una foto del comportamiento del caudal fugado durante el ensayo puede verse a continuación:



*Figura 77. Comportamiento del tubo "picado" en el ensayo.*

La ley de fugas con la presión aguas arriba de la misma correspondiente a este defecto es la siguiente:



*Figura 78. Ley de fugas del tubo "picado".*

Se observa que el mejor ajuste para esta fuga es el de una recta.



#### 4.6.2 Ensayo de un tubo “picado” enterrado

Al ser una fuga de un valor de caudal fugado de suficiente magnitud, se ha decidido probar a ensayarla con tierra para mostrar la influencia del terreno en su comportamiento. La tierra usada es arena viva, y se ha compactado manualmente, sin herramientas. Se pueden ver unas fotos de su compactado en las imágenes siguientes:

Aspecto a mitad de su enterramiento:



*Figura 79. Enterramiento del tubo, mitad del proceso.*

Aspecto final antes de ensayar:



*Figura 80. Enterramiento del tubo, resultado final.*

Destacar que la fuga en este caso se instaló con el defecto apuntando en posición vertical hacia abajo.

Para evitar que el agua se saliera libremente por los orificios laterales del cajón donde va acoplado el tubo, se ajustaron unas tiras de plástico a modo de tapón entre el orificio y el tubo, cuyo detalle puede verse a continuación:



*Figura 81. Tapón lateral para contener el agua.*

Y, por último, puede verse el estado final del cajón de tierra, una vez se terminaron los ensayos:



*Figura 82. Resultado del ensayo con tierra.*

Lo que demuestra que la arena viva no es un material adecuado para mantenerse compactada y en el sitio tras un ensayo, sin ayuda de otros materiales auxiliares. Queda por comprobar la influencia que ha tenido en el comportamiento de la fuga, respecto al primer ensayo.

La ley de fugas individual queda:

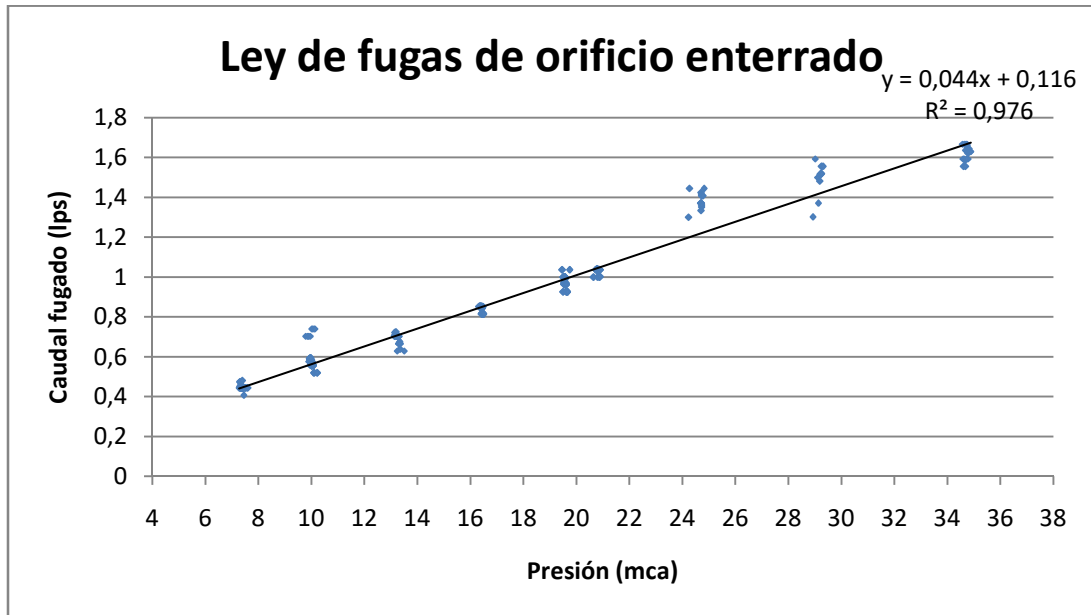


Figura 83. Ley de fugas del tubo "picado" enterrado.

Y graficada junto a la ley de fugas resultado del primer ensayo:

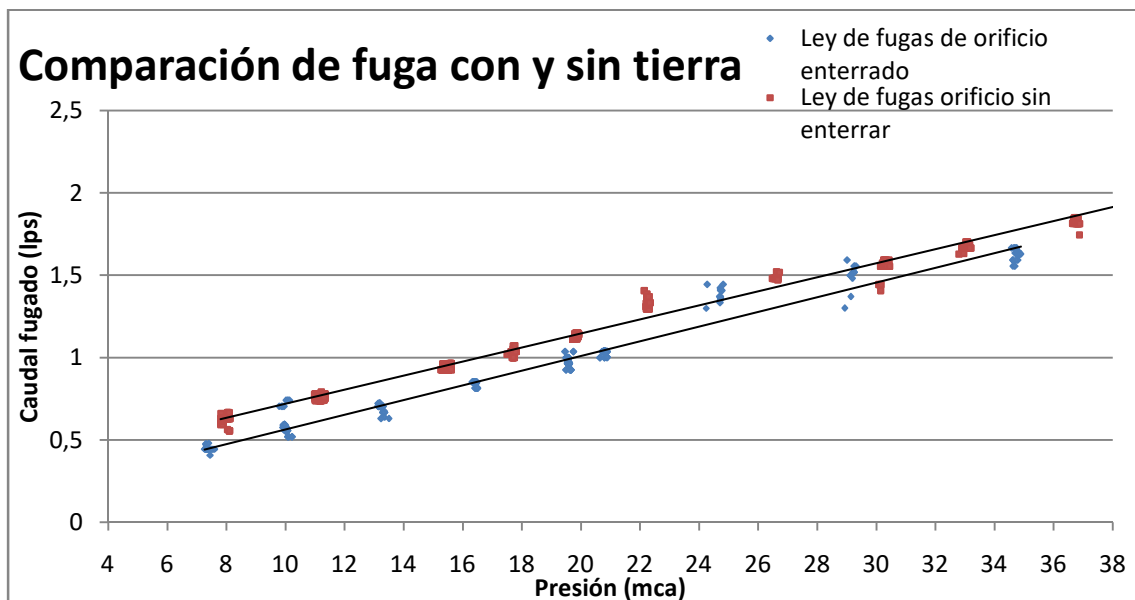


Figura 84. Comparativa de ambas leyes de fugas.

Se observa que, hasta la mitad del ensayo aproximadamente, la tierra sí que frena, en cierta medida, el caudal fugado respecto al caudal sin fugas, hasta que la tierra fue lavada completamente. El comportamiento de la fuga, en este caso, sigue siendo lineal. No se observan diferencias entre apuntar el defecto hacia arriba o hacia abajo.



#### 4.6.3 Ensayo de una grieta longitudinal

Este defecto longitudinal también se realizó con la bomba manual a 200 metros, pero, en este caso, al lograr romper el material por la zona debilitada previamente, su aspecto es relativamente diferente al de la primera fuga. Su foto y sus características son las siguientes:

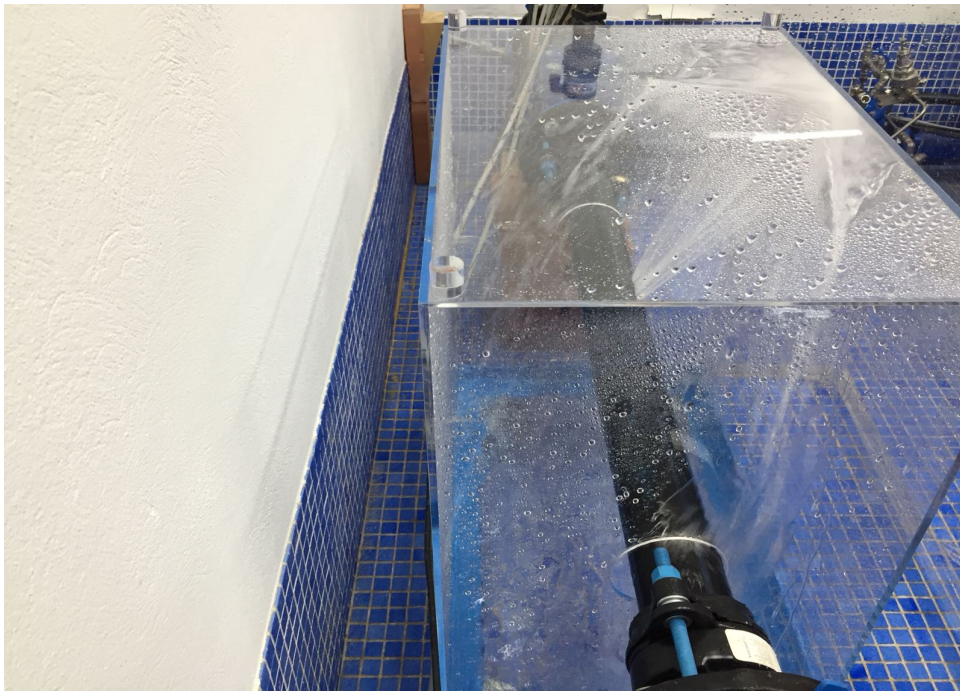


*Figura 85. Imagen del defecto longitudinal.*

El resumen del defecto es:

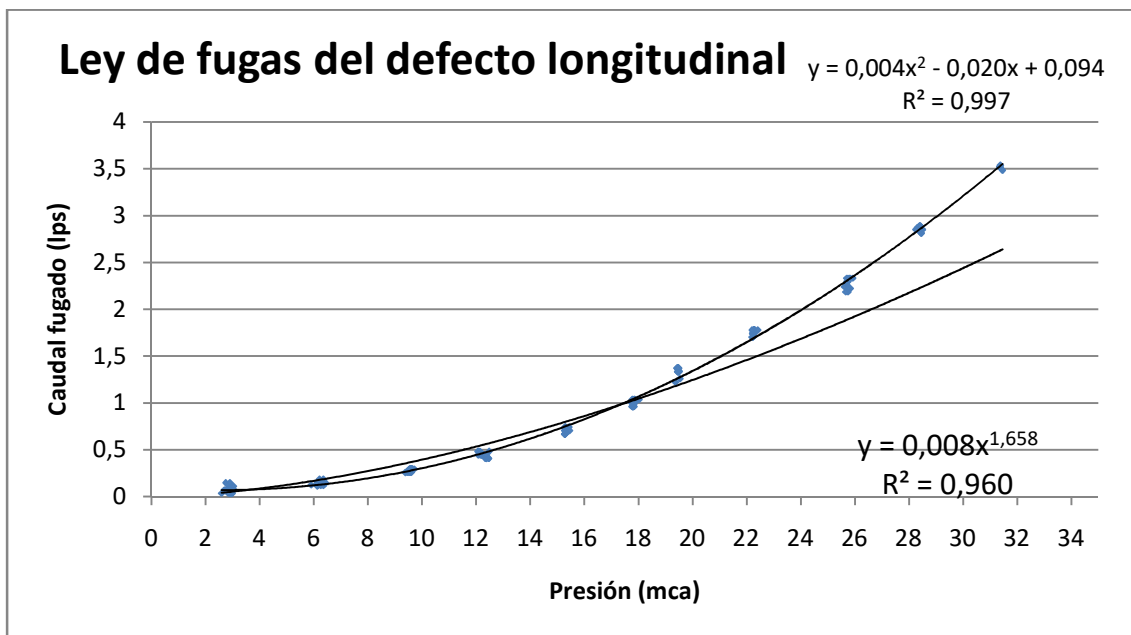
- Material: polietileno.
- Diámetro: DN65.
- Tipo de defecto: longitudinal.
- Largo: aproximadamente 5cm.
- Ancho: aproximadamente 2mm.

Una foto de su comportamiento en el ensayo puede verse a continuación:



*Figura 86. Comportamiento del defecto longitudinal durante el ensayo.*

La ley de fugas correspondiente al defecto es la siguiente:



*Figura 87. Ley de fugas del defecto longitudinal.*

Se observa que, aunque a presiones bajas el caudal es mucho más bajo que en el primer ensayo, esta fuga se rige por una ecuación cuadrática, que curiosamente ajusta mucho mejor que la ecuación exponencial tradicional, y termina con unos caudales de fuga superiores al primer ensayo.

#### 4.6.4 Ensayo de un orificio circular

Para terminar, se decide ensayar un orificio circular de métrica 4.5, realizado con un talado, tal y como puede verse en la siguiente imagen:



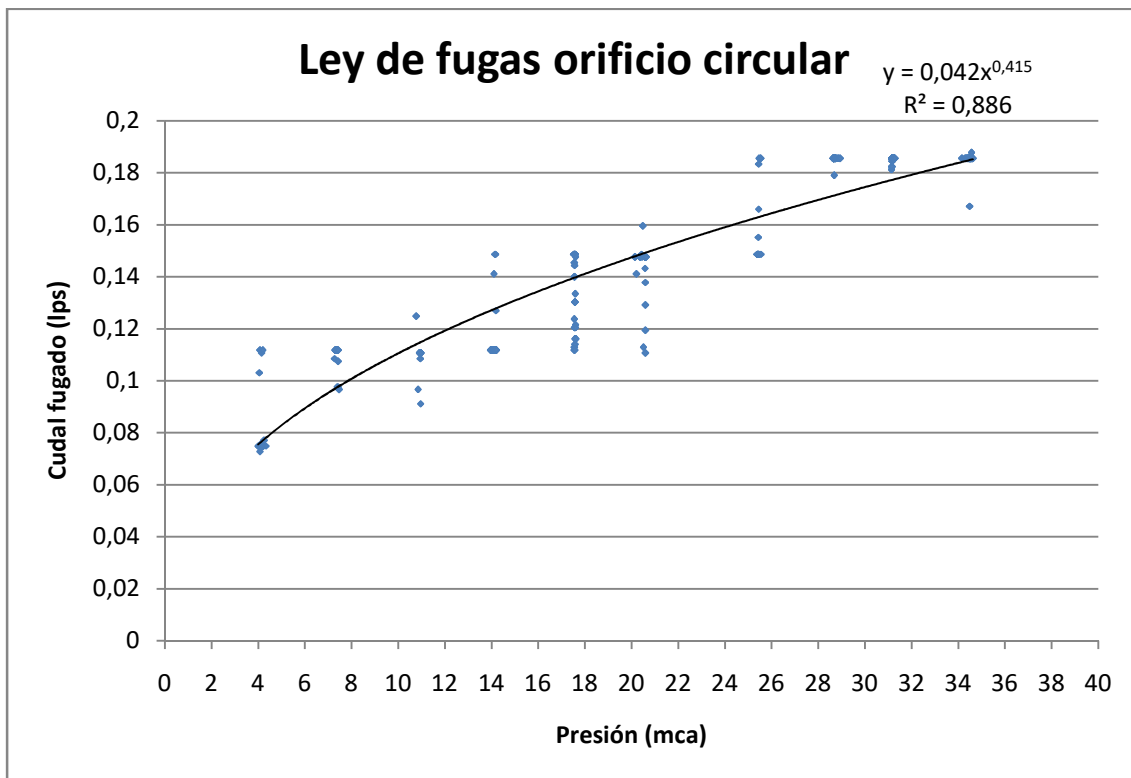
*Figura 88. Imagen del orificio.*

El resumen del defecto es:

- Material: polietileno.
- Diámetro: DN65.
- Tipo de defecto: orificio de métrica 4.5.

Destacar que este defecto fue instalado apuntando verticalmente y hacia arriba.

La ley de fugas de este defecto es:



*Figura 89. Ley de fugas del orificio.*

Se observa que, al ser un orificio tan pequeño, el caudal de fugas es bastante menor y el ruido propio del sistema de toma de datos del banco se nota más que en casos anteriores, de caudales de fuga superiores. Sin embargo, se puede seguir consiguiendo un buen ajuste en las medidas, y se observa que el ajuste tiende a la ecuación de exponente 0,5 tradicional.

El ligero error también puede deberse al haber sido instalado con el defecto hacia arriba. Las otras fugas, al ser de un caudal importante, son menos sensibles a la posición en la que se coloque el defecto. Esta fuga de menor caudal puede verse condicionada por otros factores diferentes a los otros ensayos.

#### **4.7 Conclusiones**

Esta parte del trabajo buscaba, por una parte, comprobar que la instalación funciona correctamente, junto con obtener datos de rangos de funcionamiento, estabildades, etc. y por otra, el ensayo de los primeros elementos con fugas.

Los resultados de las pruebas de funcionamiento de la instalación muestran que la instalación y los sensores funcionan correctamente, y que se encuentra lista para ser usada en la obtención de las leyes de fugas. También se ha comprobado que el programa separa y organiza los datos correctamente, y que el filtro que aplica a los datos erróneos sirve para analizar los resultados de forma más cómoda y limpia, eliminando transitorios y asegurando la obtención de la ley de fugas con la presión en situación estacionaria.

Las fugas ensayadas, una de ellas enterrada, han demostrado comportamientos diversos tanto en el caudal fugado como en la ley del comportamiento del mismo.

La fuga con el “picado” tiene un ajuste lineal cuasi perfecto, independientemente de si se encuentra enterrada o no. En caso de estar enterrada, el caudal fugado resulta ser del orden del 90% del caudal sin fugar, hasta que el efecto del tapón de tierra desaparece por completo.

El ensayo prueba que la arena viva no es suficiente, por sí sola, para ensayar fugas enterradas, y deben de usarse otros materiales más duros que mantengan el efecto del tapón de tierra. Emivasa usa la arena viva junto con otros materiales y es la arena viva la que se encuentra en contacto con el tubo, pero al haber otros materiales, el lavado de material ocurre mucho más lento. Según el conocimiento de los operarios que han reparado este tipo de defectos, la arena se desplaza formando “cuevas” a partir de la fuga, entre dos capas de material resistente al agua, y el caudal, al abandonar el tubo, discurre casi horizontalmente en la capa de arena viva. Ese efecto no ha podido ser estudiado en este ensayo, al tener solamente arena viva y un caudal de fuga tan importante.

El ensayo con la grieta longitudinal es sorprendente por dos motivos. El primero es el buen ajuste obtenido aplicando una ecuación polinómica de segundo orden, incluso mejor que la ecuación de fugas tradicional. El segundo es la magnitud de los caudales de fuga medidos para una grieta que al principio parece pequeña. Se atribuye al efecto de los concentradores de tensión en sus bordes, y se plantea seguir estudiando este tipo de defecto en el futuro.

Los resultados de la fuga del orificio circular, han resultado ser los que más error relativo tienen, debido a que es el caudal fugado es pequeño y los parámetros que influyen tanto en la fuga como en el sistema de toma de medidas se notan en mayor magnitud. Se recomienda para futuros ensayos de grietas pequeñas que el caudal no apunte hacia arriba.

Estos resultados son lo suficientemente diferentes entre sí como para, en un futuro, estimar el porcentaje de defectos de un sector a partir del comportamiento de la ley de fugas agregada del mismo, una vez se hayan ensayado y analizado el suficiente número de defectos individuales, y se puedan asegurar comportamientos globalmente semejantes para cada tipo de defecto.

## 5 Ensayo de un sector real: San Marcelino

### 5.1 Justificación y objetivos

El objetivo de esta parte del trabajo es obtener los resultados de fugas de un sector real y relacionarlos con las leyes de fugas individuales particulares obtenidas en el banco de ensayos en apartados anteriores. Correlacionar los datos agregados de un sector con la ley de fugas individual informa sobre la proporción de defectos presentes en el sector, suponiendo que la suma de fugas individuales mantiene un comportamiento parecido a la fuga original.

Por ello, esta parte del trabajo se organiza de la siguiente manera. Primero, se hace una breve introducción del sector estudiado, su localización, y las fuentes de datos disponibles para su análisis y simulación en EPANET.

Segundo, se muestran los ensayos que van a realizarse en el mismo, a partir del cambio de la presión a la entrada del sector, lo que permite plantear la ley de fugas en el mismo.

A continuación, se detallan ciertos aspectos de la biografía los cuales se desean estudiar, tales como el concepto de mínimos nocturnos, y otras asunciones normalmente aceptadas en el estudio de las leyes de fugas agregadas de sectores.

Tras plantear la introducción matemática, se procede a estudiar los datos brutos, resultado de los ensayos, sobre los cuales, de momento, no se puede sacar ninguna conclusión, y se hace una breve introducción al programa empleado para el análisis de los datos. Una vez trabajados los datos, se muestran los resultados más destacables obtenidos de los mismos.

Con los datos obtenidos de las leyes de fugas del sector, al final de esta parte del trabajo se elaboran unas conclusiones, tanto sobre los datos analizados como sobre su relación con las fuentes bibliográficas antes mencionadas, y se elabora una lista de recomendaciones a seguir en futuros trabajos realizados con el mismo tema.

Este estudio es posible gracias a la avanzada tecnología de toma y transmisión de datos de que dispone la red de Valencia, lo que permite un grado de detalle superior a otros estudios realizados en el mismo campo, pues la mayoría de redes no disponen de registros de demandas con frecuencia horaria en todo su parque de contadores.

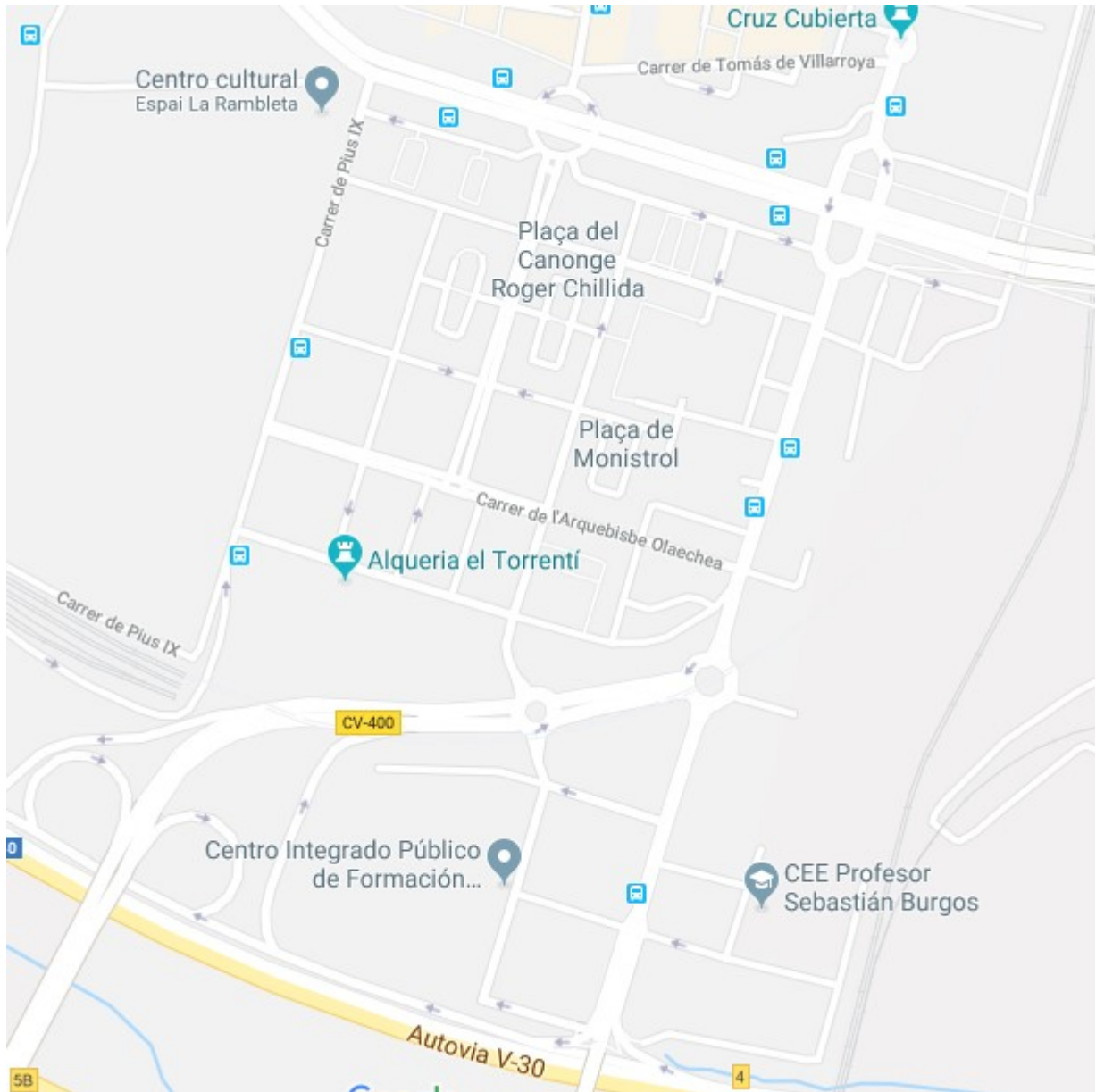
**Nota:** Para este trabajo, y para mantener la información confidencial con Emivasa, se va a suponer que el caudal entrante total se divide en caudal registrado abonado, resultado de los consumos cobrados económicamente a los particulares del sector, y que el resto del caudal entrante se corresponde con el caudal de fugas. Es decir, se han dejado sin usar fuentes de datos de demandas diferentes a las de los consumos particulares para no mostrar porcentajes reales de fugas del sector. Esto lleva a sobredimensionar el caudal fugado en este estudio. Este valor de fugas se ha denominado en este trabajo, como “agua no registrada”.



## 5.2 Selección del sector

Para este ensayo se ha decidido analizar los datos de un sector de la red de Valencia denominado como el sector de San Marcelino. Se trata de un sector relativamente pequeño, con dos entradas, que ya ha sido estudiado con anterioridad de manera satisfactoria en la tesis de Pilar Conejos (2015).

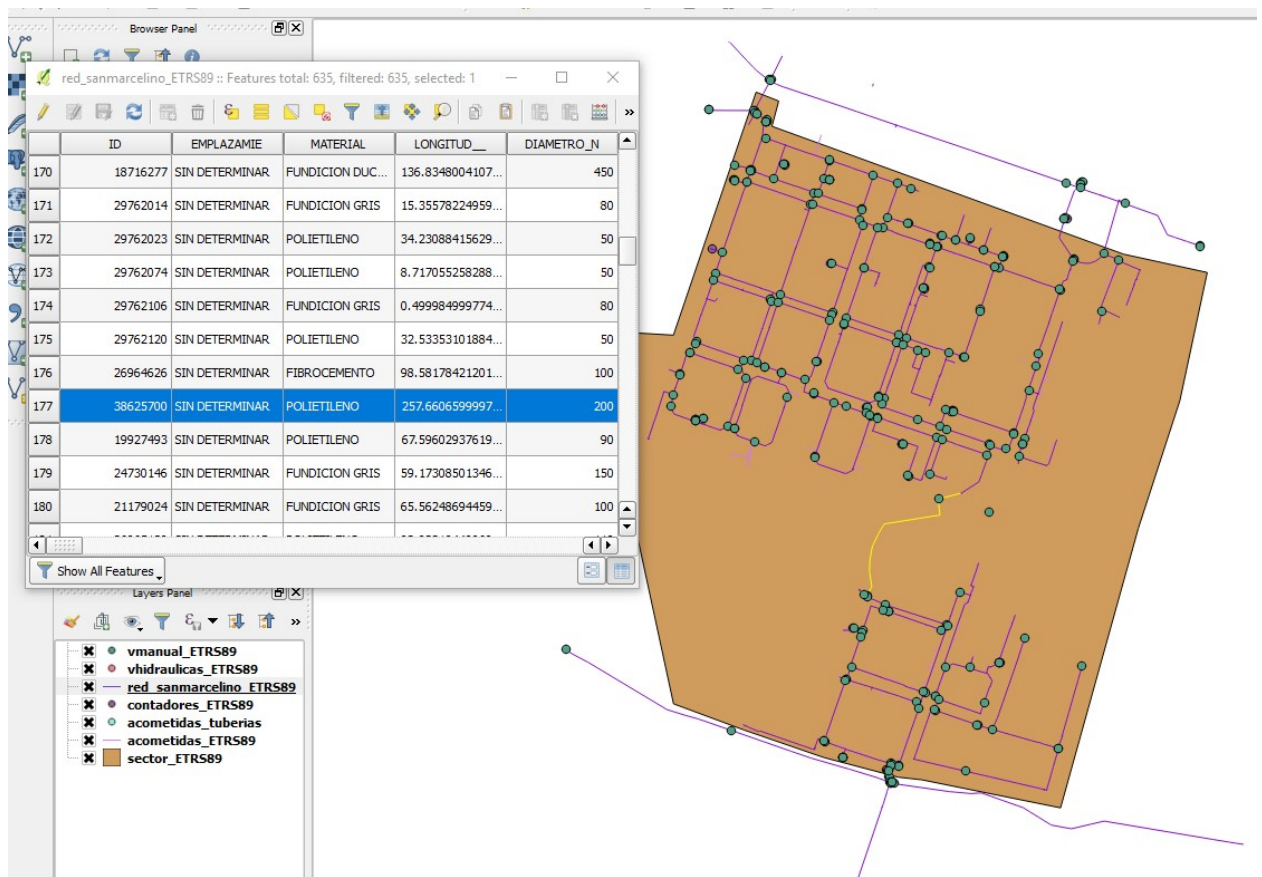
La vista aérea del sector es:



*Figura 90. Vista aérea del sector de San Marcelino.*

Limita al norte con la avenida del Doctor Tomàs Sala, al sur limita con la V-30, y se encuentra en las afueras de la ciudad de Valencia, lo que ayuda a que sea un sector relativamente aislado del resto de la red y con facilidad para realizar ensayos.

Se dispone de todos los datos necesarios para su estudio, como su exportación en QGIS, y la correlación geográfica de cada tubería, acometida y válvula, su material y su tamaño.



*Figura 91. Vista del programa QGIS del sector de San Marcelino.*

En la siguiente imagen puede observarse en detalle una ampliación de la tubería central de la imagen superior.

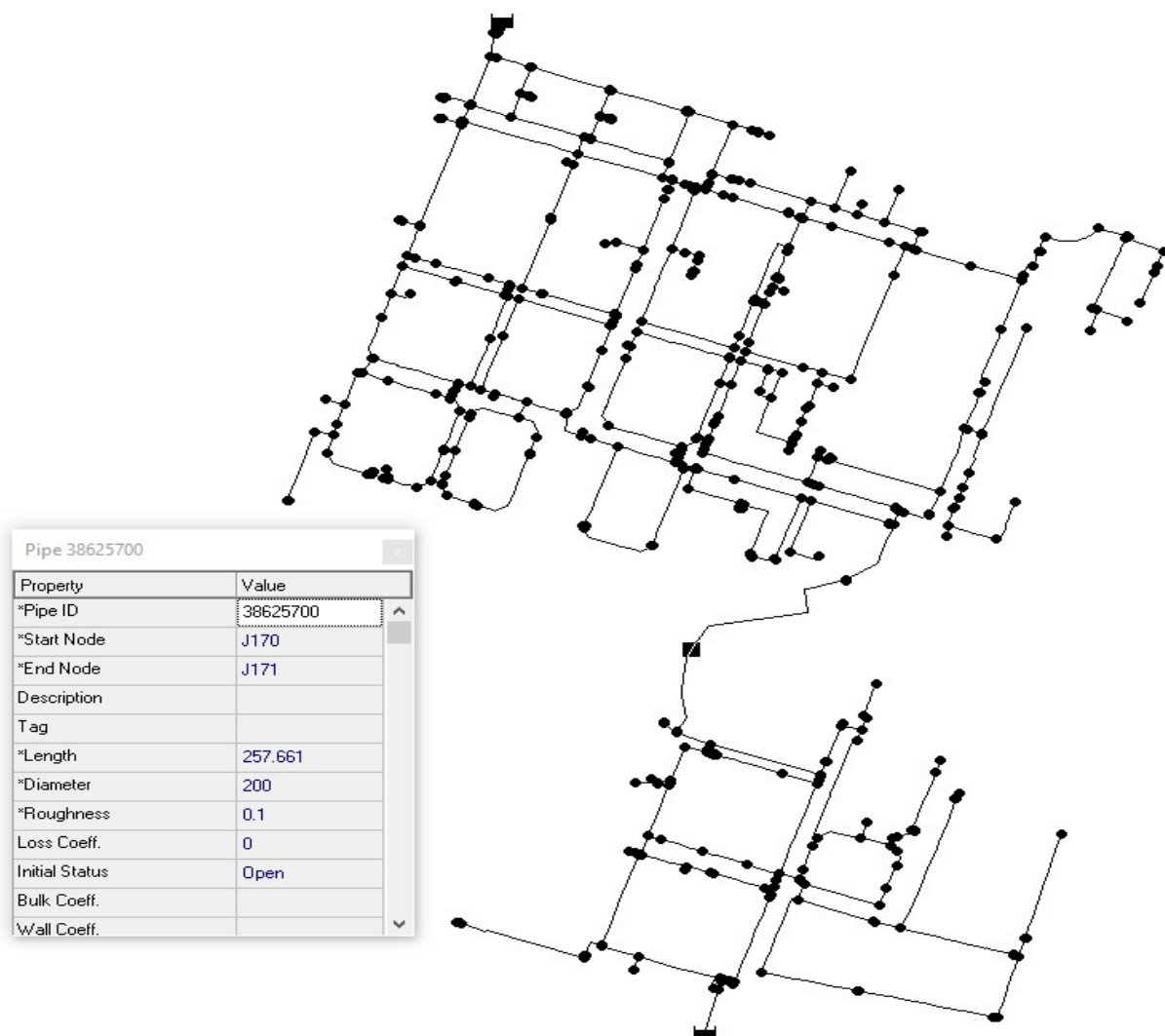
176	26964626	SIN DETERMINAR	FIBROCEMENTO	98.58178421201...	100
177	38625700	SIN DETERMINAR	POLIETILENO	257.6606599997...	200
178	19927493	SIN DETERMINAR	POLIETILENO	67.59602937619...	90

*Figura 92. Ampliación de la imagen anterior.*

En esa tubería se encuentra una válvula que separa el subconjunto superior y el subconjunto inferior. Durante la realización de los ensayos, válvula se cerró para estudiar solamente el subconjunto inferior, de la misma forma que se hizo en la tesis de Pilar Conejos para el estudio de la ley de demandas.



Los datos de QGIS pueden ser trasladados a EPANET para la realización de ensayos, si se realizan ligeras modificaciones en el formato entre ambos programas.



*Figura 93. Vista del programa EPANET del sector de San Marcelino.*

Y como puede verse, existe una correspondencia entre los datos de ambas fuentes.

Se trata de un sector relativamente moderno, en el que abunda el polietileno como material para los tubos, junto con la fundición, y el rango de tamaños es relativamente constante y parecido a los ensayados en el banco, salvo las principales conducciones.

Muchos de los contadores físicamente instalados son de reciente adquisición, por lo que, aparte de la fiabilidad de la lectura, añaden ciertas características novedosas, como la posibilidad de telelectura horaria, lo que facilita la obtención de los mínimos nocturnos.

Para el estudio, se ha decidido cerrar la válvula que se encuentra en la tubería seleccionada en ambas imágenes, para estudiar la zona inferior, de menor tamaño. Este subsector inferior depende únicamente de una entrada, como puede verse en el modelo de EPANET.

### 5.3 Programa de ensayos

Para obtener la ley de fugas de un sector, es necesario el cambio de su presión media. El programa de consignas establecidas a la entrada del sector se indica en la siguiente tabla:

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
A B R I L	2	3	4	5	6	7	8
		<b>INICIO EST. 33 mca</b>	33 mca	31 mca	31 mca		
	9	10	11	12	13	14	15
		29 mca	29 mca	31 mca	31 mca		
	16	17	18	19	20	21	22
	33 mca	33 mca	33 mca	35 mca	35 mca		
23	24	25	26	27	28	29	
37 mca	37 mca	39 mca	39 mca	<b>FIN ESTUDIO 33 mca</b>			

*Figura 94. Calendario con las consignas para los ensayo del sector.*

Como puede verse en la imagen, los ensayos se van a realizar a lo largo de todo el mes de Abril. La consigna se encuentra acotada inferiormente para garantizar el servicio a los usuarios. El periodo de ensayos se prolonga a lo largo del mes debido a que:

- En primer lugar, se tiene el factor de los cambios en los patrones de consumo residenciales, sobretodo nocturnos, de los días festivos. Por ello, se toma la decisión de no ensayar en fiestas, lo que da lugar a diversos días sin toma de datos y sin avance en los ensayos.
- En segundo lugar se establece un periodo de dos días para mantener la consigna de forma estable.
- Por último, antes de subir la presión, y debido a efectos de histéresis sobre las tuberías de polietileno en el sistema, es necesario realizar una bajada progresiva que “reinicie” los tubos y poder sacar los datos sin influencia de deformaciones temporales. Este reinicio se realiza durante la primera semana de Abril, terminando el martes 10 de Abril. Se plantea en este estudio ver la diferencia entre las leyes de fugas ajustadas teniendo en cuenta todo el mes, y solamente los días del mes posteriores al “reinicio” de los materiales plásticos

#### **5.4 Objetivos a estudiar en este ensayo**

En la bibliografía, para el análisis y la obtención de fugas de un sector, es habitual hablar de los mínimos nocturnos como un equivalente al caudal fugado. Se basan en la idea de que, siendo las fugas de valor constante e independiente del tiempo, y las demandas producto de los consumos humanos, en algún momento del día, es posible que ninguno de los usuarios de una red consuma agua. En ese momento, la entrada de agua al sector, suma de fugas y consumos en el mismo, equivale a las fugas del sector, porque los consumos humanos son nulos.

Al ocurrir ese mínimo normalmente en periodo nocturno, cuando la mayoría de abonados a la red se encuentran durmiendo, es la razón por la cual se denominan a estos caudales mínimos nocturnos. Se han estudiado ampliamente para la obtención de la ley de fugas de un sector, con resultados diversos, en multitud de publicaciones, tales como van Zyl et al. (2014), o en <http://www.leakssuite.com>. Se plantea pues, estudiar si realmente en periodos nocturnos el caudal consumido por los abonados es cero, o si en cambio, hay un consumo residual.

Otro punto que se trata normalmente en la biografía es la amplitud de los exponentes encontrados al ajustar las ecuaciones de fuga, que como se ha dicho anteriormente, van de los 0,3 hasta los 2,5 en algunos casos. Esto puede ser debido a varios motivos, como por ejemplo el desconocimiento de la cota de los nudos, los pocos puntos de ajuste, el error en las medidas, etc.

Emivasa, gracias a su tecnología de toma de datos, no tiene el problema antes mencionado de tener pocos puntos para realizar su ajuste, y se tiene la ventaja de que en la red de Valencia, la diferencia en la cota de los nudos es despreciable, sobretodo en un sector tan pequeño, por lo que solamente queda el factor del posible error en las medidas.

Por lo que, en este trabajo se plantea ver si hay problemas de ruido en las medidas, provocados por, entre otros motivos, el uso de 1 valor medio por hora, en vez de segundo a segundo, que es la frecuencia de muestreo usada en el banco de ensayos.

Por otra parte, se plantea ver si es posible relacionar la ley de fugas agregada del sector, a alguna de las leyes de fugas obtenidas experimentalmente en el banco de ensayos.

## 5.5 Carga de las demandas registradas y caudales inyectados

Una vez terminado el análisis del mes, se tienen dos fuentes de datos. En la primera, se muestra toda la información referente a las demandas de cada uno de los edificios, agrupados por acometidas.

Los datos se corresponden al consumo en litros y día, y el formato general de los mismos es (fragmento):

CODACO	TIPCON	FECLEC	NUMTOT	NUMABO	CONSUM	CONS01	NABO01	CONS02	NABO02
149944	H	20180401	17	17	4299	124	8	85	8
149944	V	20180401	2	2	100	0	0	0	0
149944	H	20180402	17	17	4420	62	5	84	7
149944	V	20180402	2	2	100	0	0	0	0
149944	H	20180403	17	17	3957	114	5	95	5
149944	V	20180403	2	2	100	0	0	0	0
149944	H	20180404	17	17	4241	94	5	88	5
149944	V	20180404	2	2	100	0	0	0	0
149944	H	20180405	17	17	4325	73	5	55	5
149944	V	20180405	2	2	100	0	0	0	0
149944	H	20180406	17	17	4393	157	6	84	8
149944	V	20180406	2	2	100	0	0	0	0
149944	H	20180407	17	17	4274	82	7	77	4
149944	V	20180407	2	2	100	0	0	0	0
149944	H	20180408	17	17	4581	122	8	121	6
149944	V	20180408	2	2	100	0	0	0	0

*Figura 95. Formato de datos de las demandas de Emivasa.*

La columna CODACO indica el ID de una acometida particular. En este caso la 149944.

CONSUM muestra el valor de agua consumida en la fecha FECLEC. Viene dado en litros.

La columna FECLEC muestra la fecha a la que el contador ha registrado ese consumo. El formato es AÑO – MES – DÍA, todo en un mismo número: 20180401.

El apartado TIPCON muestra el contador físicamente instalado en esa acometida, y puede ser de tipo H, D o V.

- El tipo H es el mayoritario del sector. Más moderno y con transmisión de lecturas horarias.
- El tipo D transmite los datos de manera diaria.
- El tipo V es el más antiguo, viene prorrateado entre lecturas, y por eso muestra lecturas iguales en la imagen adjunta.

NUMTOT muestra el número total de abonados físicamente conectados a esa tubería. Si, durante un día no consumen agua, o hay problemas en la toma de datos, NUMABO, que representa el número de personas que han consumido en un día, será inferior. En los datos mostrados, ambos números coinciden, por lo que se supone que todo ha funcionado bien.

Sin embargo, eso no ocurre así en todos los casos, como puede verse en la siguiente imagen:

CODACO	TIPCON	FECLEC	NUMTOT	NUMABO	CONSUM
150192	H	20180401	7	5	1192

*Figura 96. Ejemplo de lectura de datos no correctamente transmitidos.*

Debido al fallo en la transmisión de la lectura puntual de algunos usuarios puede ser necesario estimar la lectura horaria, es por lo que para tener un valor fiable de caudal la casilla CONSUM debe ser multiplicada por el ratio entre NUMTOT y NUMABO.

El resto de columnas (CONS01, CONS02, etc.) representan el consumo registrado en la hora 1 (de 00:00 a 01:00 de la noche), en la hora 2, etc. NABO01 y NABO02, por su parte, muestran el número de abonados que han consumido en la hora 01, o en la hora 02. En el caso de la acometida 149944, 8 abonados de los 17 instalados han usado 124 litros de los 4299 registrados totales el día 1 de Abril de 2018.

Como puede verse, una sola acometida puede tener diferentes tipos de contadores instalados. La acometida 149944 tiene un contador de tipo V junto con un contador de tipo H. Debido a que el contador es tipo V, en este caso no hay datos horarios de consumos, y solamente existe el dato de la casilla CONSUM, estando vacíos el resto.

En la segunda fuente, se muestra una lista de las tres variables a la entrada del sector, cada 15 minutos, durante todo el mes de Abril. Se dispone de los valores de presión antes (V3) y después (V2) de la válvula de regulación, en mca, y el caudal que pasa por ésta (V1), en litros por segundo.

Fecha Dato	V1	V2	V3
01/04/2018 00:00	3,22	34,20	38,60
01/04/2018 00:15	3,11	34,10	39,00
01/04/2018 00:30	3,56	34,00	37,90
01/04/2018 00:45	3,22	33,90	38,20

*Figura 97.Formato de datos de la entrada de agua al sector.*

El planteamiento es, pues, preparar un programa que, teniendo en cuenta los formatos propios de los datos de Emivasa y los datos reales suministrados, muestre de forma automática y correcta la ley de fugas del sector, porque, como se ha visto, el formato de los datos de salida no permite la visualización de resultados.

## 5.6 Tratamiento de la información

Con el objetivo de sacar resultados entendibles, se elaboran varios programas en VBA (Visual Basic for Applications) de Excel para que separe y organice los datos. Sabiendo la forma en la que están estructurados los datos, que hay datos de varios días, desordenados tanto en acometidas como en días, y que entre diferentes días puede haber lecturas no disponibles, se ha elaborado de forma que pueda ser aplicado a cualquier sector de la red de Valencia, mediante la identificación automática de días, acometidas y tipo de acometidas en los datos suministrados.

El programa que trata los consumos particulares de agua efectúa los siguientes cálculos:

- División de datos por días.
- Comprobación de que los datos son correctos, como la existencia de datos diarios de cada clase (H, V y D).
- Cálculo de curvas de modulación horarias para cada día y su aplicación a contadores tipo D y V (de los cuales solo hay un dato de consumo diario total).
- Suma de consumos que tengan acometidas con la misma ID.
- Cambios de unidades en litros a litros por segundo.
- Trasposición del subconjunto de datos necesarios (pues solo se estudia el pequeño subsector inferior) en un formato que permite su modelado en EPANET.

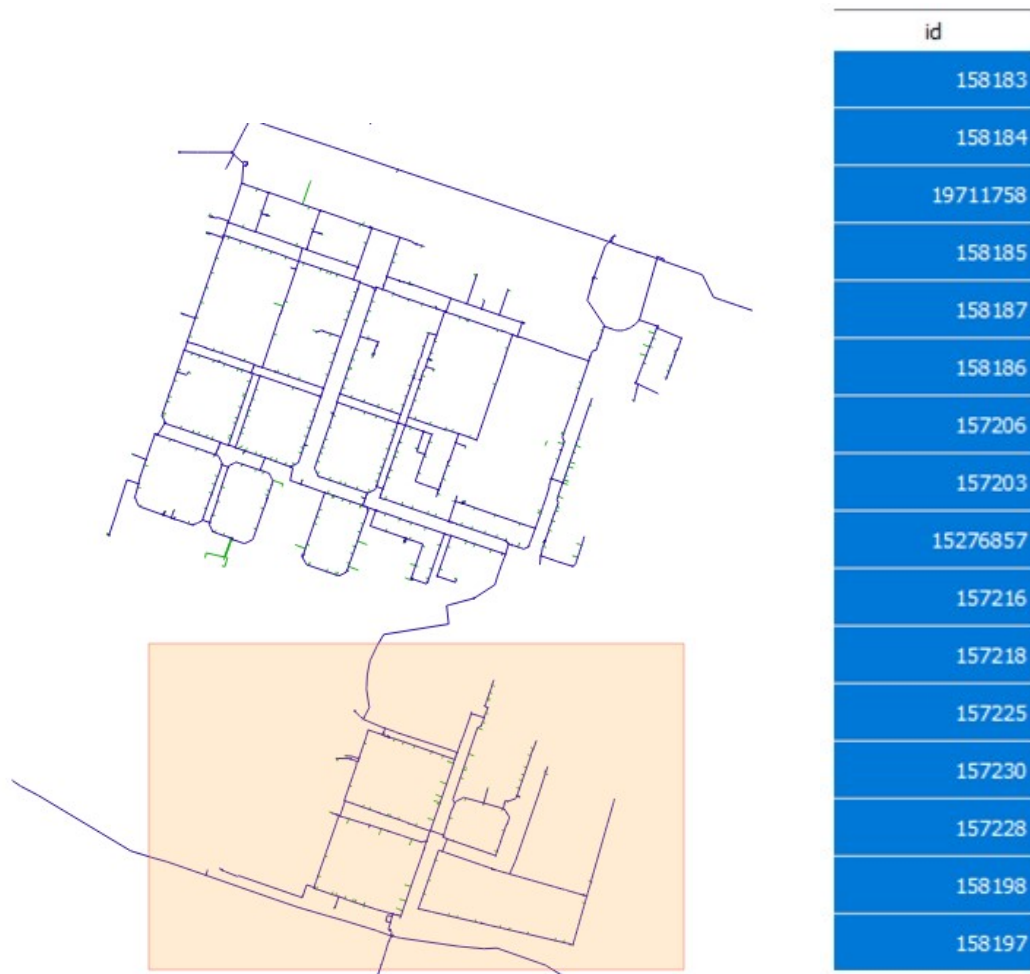
Algunos resultados del programa de consumos pueden verse a continuación:

Día válido	Día tipo	Cont V. H	Cont V. D	Cont V. V	Día fecha
No	1	314	0	71	20180401
Si	2	323	26	71	20180402
Si	3	323	25	71	20180403
Si	4	324	26	71	20180404
Si	5	326	25	71	20180405
Si	6	326	25	71	20180406
Si	7	324	24	71	20180407
Si	8	322	23	71	20180408
Si	9	316	21	71	20180409
Si	10	327	22	71	20180410
Si	11	322	21	71	20180411
Si	12	307	16	71	20180412
Si	13	299	13	71	20180413
Si	14	316	15	71	20180414
Si	15	313	16	71	20180415

*Figura 98. Resultados diarios del programa para calcular las demandas.*

Como puede verse, hay ciertas diferencias entre los datos de cada día, e incluso hay un día que no se ha extrapolado correctamente (día 1, sin contadores tipo D).

Por otra parte, se debe de separar el subsector necesario a mano, mediante una lista de acometidas físicamente instaladas en esa zona, tal y como se ve en la imagen siguiente:



*Figura 99. Subsector estudiado y las acometidas instaladas en éste.*

De las casi 400 acometidas distintas de las que se tienen datos, solamente 86 de ellas conforman el subsector inferior. El programa calcula el sector entero, pero solamente coge el subsector deseado gracias a la lista superior, que es la que se corresponde con los datos de la entrada inferior.

En esta parte del programa se muestra la lista de las demandas ya preparada para la obtención de la ley de fugas.

Total (lps)	1,3066744	1,0473623	0,7424049	0,8032094	0,7516286
Hora	1	2	3	4	5
Día	2	2	2	2	2

*Figura 100. Lista de las demandas preparadas para la obtención de resultados.*

Los datos de consumos del subsector inferior son principalmente residenciales, con una curva de modulación relativamente constante para todos los días, y que tiene la siguiente forma:

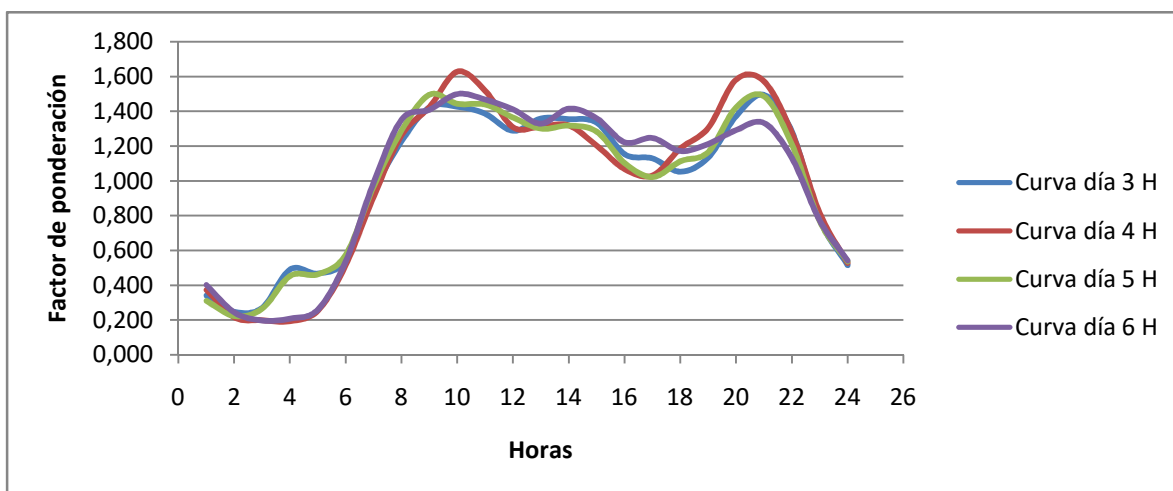


Figura 101. Diferentes curvas de modulación de demandas horarias del sector de San Marcelino.

Destaca el bajo (pero no nulo) consumo nocturno, un gran pico durante las primeras horas de la mañana, coincidiendo con el uso de agua asociado a las tareas del hogar, un llano relativamente constante en las horas medias del día, y un último pico, antes de volver a los bajos consumos nocturnos. El factor día – noche, es decir, el ratio entre el consumo diurno y el nocturno, se encuentra entre los valores 6-8. Estos resultados indican que es incorrecto suponer demandas nocturnas nulas.

Los datos de caudales a la entrada tienen una forma muy parecida, pues son resultado de sumar a los consumos anteriores el valor relativamente constante del agua no registrada del sector.

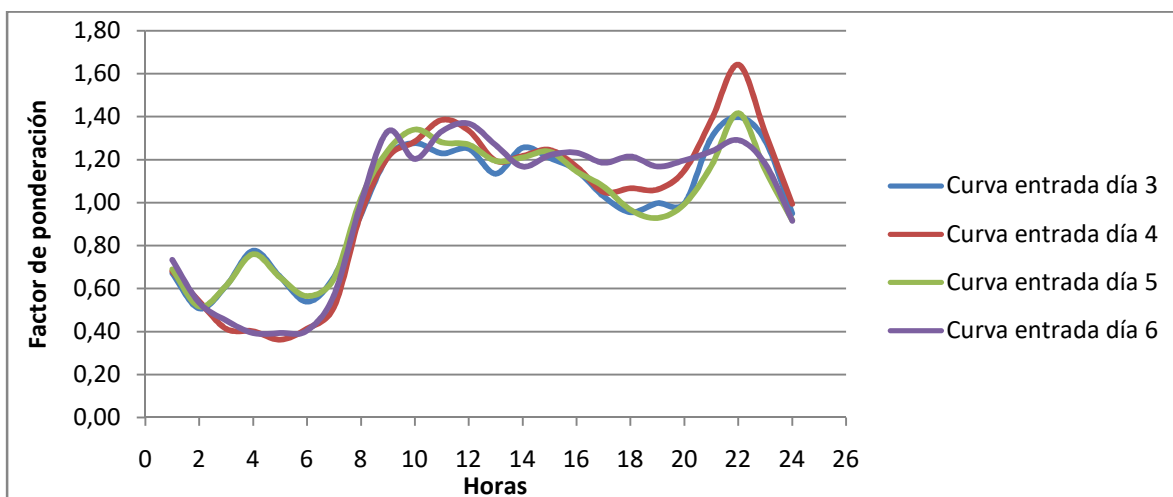


Figura 102. Diferentes curvas de modulación horarias de la entrada del sector de San Marcelino.

La mayor diferencia entre la entrada y la demanda registrada es que en el caso de los datos de entrada, el factor día – noche se encuentra más cercano al 4.

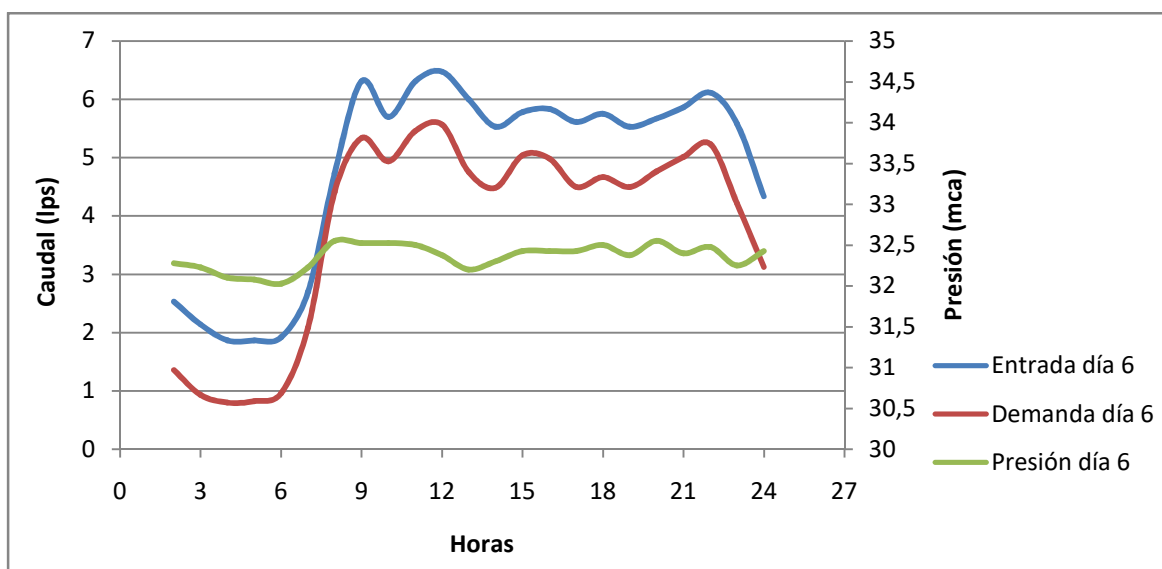


## 5.7 Resultado de los ensayos

Una vez preparada la carga de demandas en el sector, y el tratamiento de los datos del mismo, se puede plantear la obtención de la ley del agua no registrada con la presión.

Un análisis de los datos indica que los menores caudales, aquellos que en la bibliografía se corresponden con los mínimos nocturnos, ocurren entre las 2:00 am y las 6:00 am ambas incluidas, es decir, durante 5 horas. Estos mínimos nocturnos son los comúnmente encontrados en las fuentes bibliográficas que tratan sobre fugas, tales como van Zyl et al. (2014), que escoge como horario de mínimos nocturnos entre las 1:00 y las 3:00 am.

De los resultados destaca la precisión de las curvas obtenidas, gracias a la tecnología de lectura horaria que Emivasa tiene a su disposición, como puede verse en la siguiente imagen:



*Figura 103. Resultados de demandas, presiones y caudal entrante total para el día 6 de Abril.*

Para una presión constante dada, el valor del agua no registrada a lo largo del día debería tener siempre aproximadamente el mismo valor. Como puede verse en la imagen, los resultados de datos entre ambas fuentes respetan ese planteamiento. El valor del agua no registrada del sector entero tiene, para un valor aproximado de presión de 32mca, una magnitud de 1 litro por segundo., independientemente de la hora del día.

Si escogemos otro día, que tenga una consigna de presión superior, puede verse la influencia de la presión en ambas curvas. Los datos mostrados en la imagen siguiente coinciden con los expuestos en la tesis de Pilar Conejos, en la cual se mostraba la influencia de la presión tanto en el valor de las fugas como en el valor de los consumos. Para el mismo sector, los picos de consumo suben de los 5 litros por segundo aproximadamente hasta los 8 litros por segundo. Y el valor del agua no registrada del sector pasa del 1 litro por segundo aproximadamente constante a valores más cercanos a los 2 litros por segundo.

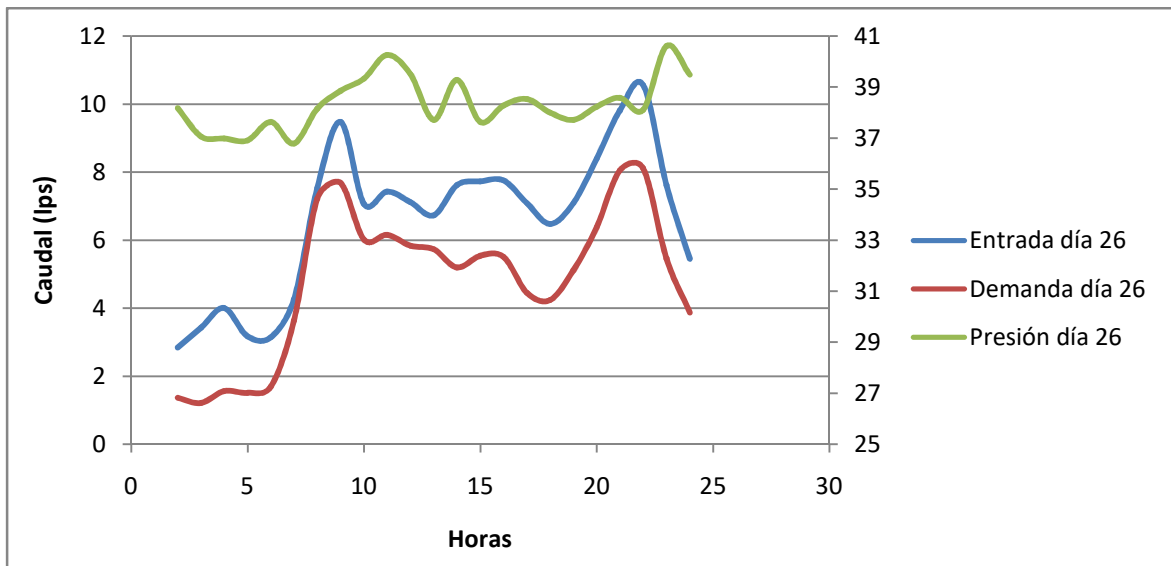


Figura 104. Resultados de demandas, presiones y caudal entrante total para el día 26 de Abril.

También destaca lo bien que es mantenida la consigna de presión a lo largo del día, lo que permite sacar correlaciones y resultados tanto diarios como nocturnos. Como puede verse en la siguiente imagen, la cual tiene valores medios nocturnos y diurnos de fugas graficados superpuestos junto con los valores horarios. El agua no registrada se obtiene con la resta entre los caudales registrados y los caudales a la entrada, hora a hora.

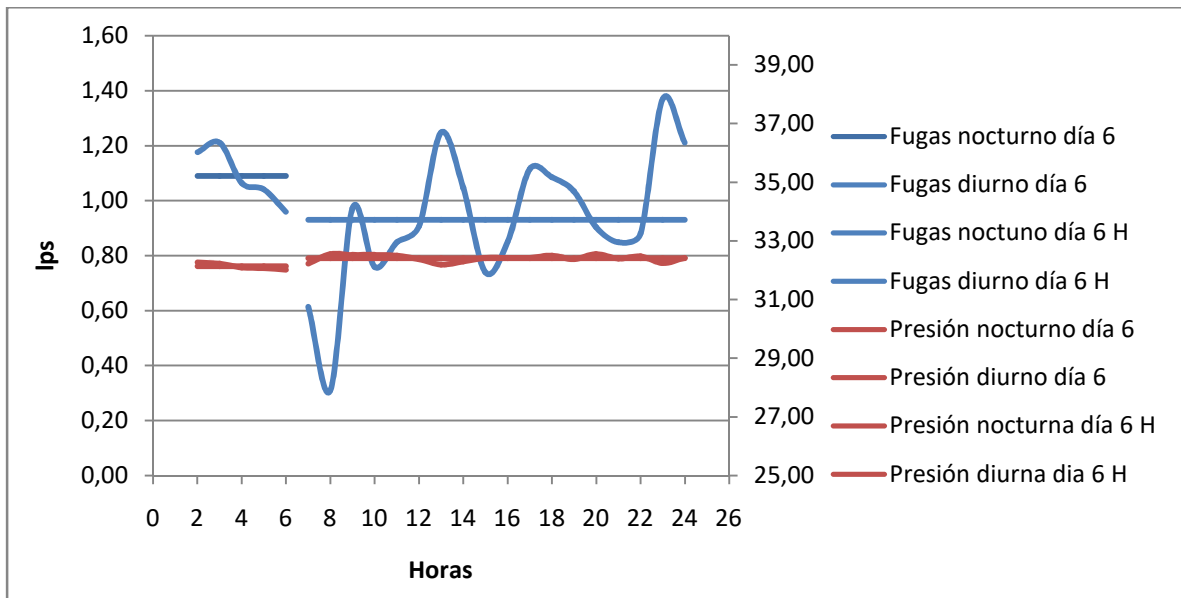


Figura 105. Diferencia entre los valores medios respecto a los horarios de caudal y presión, para el día 6 de Abril.

La imagen también muestra que, una vez se entra en el detalle del comportamiento del sector en su conjunto, y se empiezan a obtener los caudales de agua no registrada se observa cierto "ruido" en las medidas, sobretodo en el caudal, producto de la frecuencia de muestreo horaria.

### 5.8 Ley de fugas para el sector

Se procede ahora a graficar la ley de agua no registrada del sector, ajustada potencialmente, y a mostrar el valor de  $R^2$  obtenido en los ajustes. Primero, se coge la media de las 5 horas nocturnas (1 valor medio cada 5 horas por día) que forman los mínimos nocturnos, y dan el siguiente ajuste:

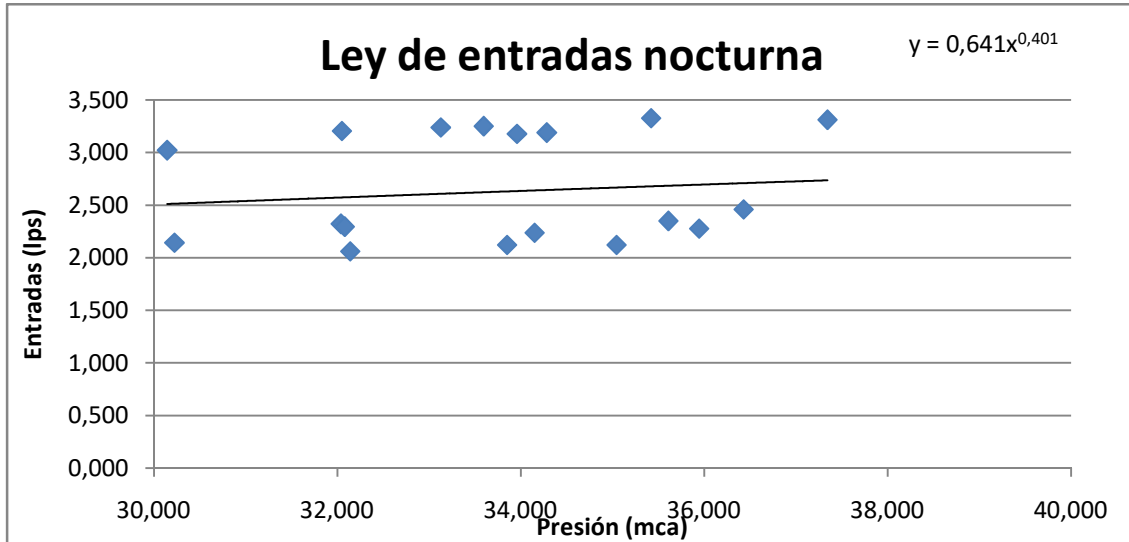


Figura 106. Ley de entradas nocturna, tomando valores medios de 5 horas de mínimos nocturnos.

Como puede verse, se tiene bastante dispersión en sus medidas, y el ajuste es bastante malo. También, como se comentó anteriormente en las curvas de modulación, es incorrecto suponer que las entradas se corresponden con el caudal de fugas nocturno. Ahora puede verse de forma clara, al comparar numéricamente ambas leyes de ajuste. La siguiente imagen muestra la ley de agua no registrada, una vez se han restado las demandas registradas.

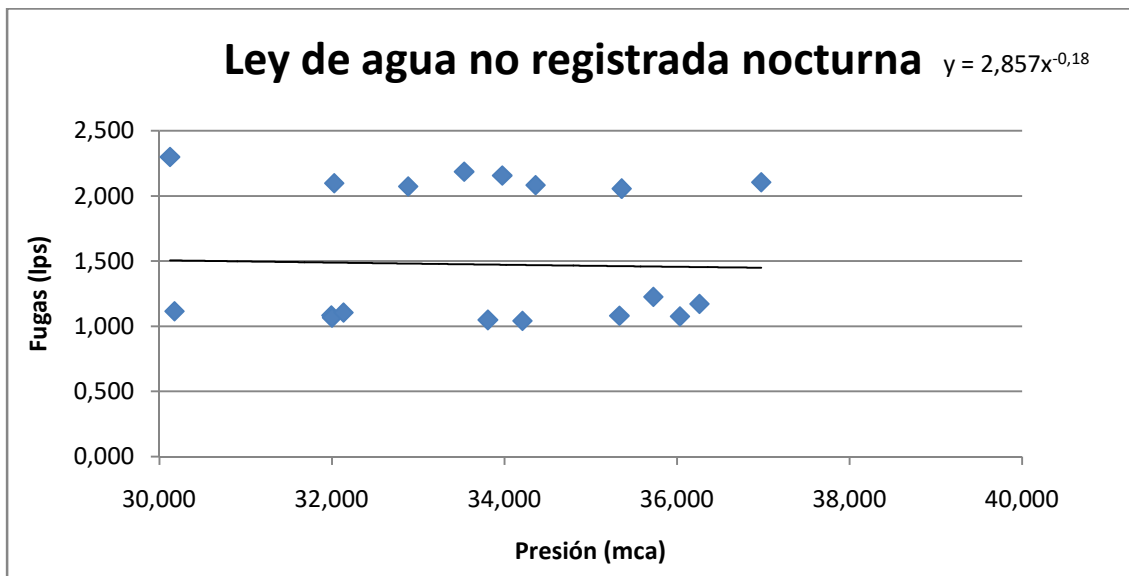


Figura 107. Ley de agua no registrada nocturna, tomando valores medios de 5 horas de mínimos nocturnos.

Como puede verse, se pasa de un exponente de fugas ajustado de 0,4 a un ajuste negativo de -0,18. El ajuste sigue siendo malo, ya que al trabajar con medias de 5 horas, la dispersión es muy grande. Puede arreglarse cogiendo el valor de solamente 1 de las horas, en vez de la media de las 5. El resultado, tanto para la entrada como para las fugas, una vez restadas las demandas, queda, para la 1 de la mañana, como sigue:

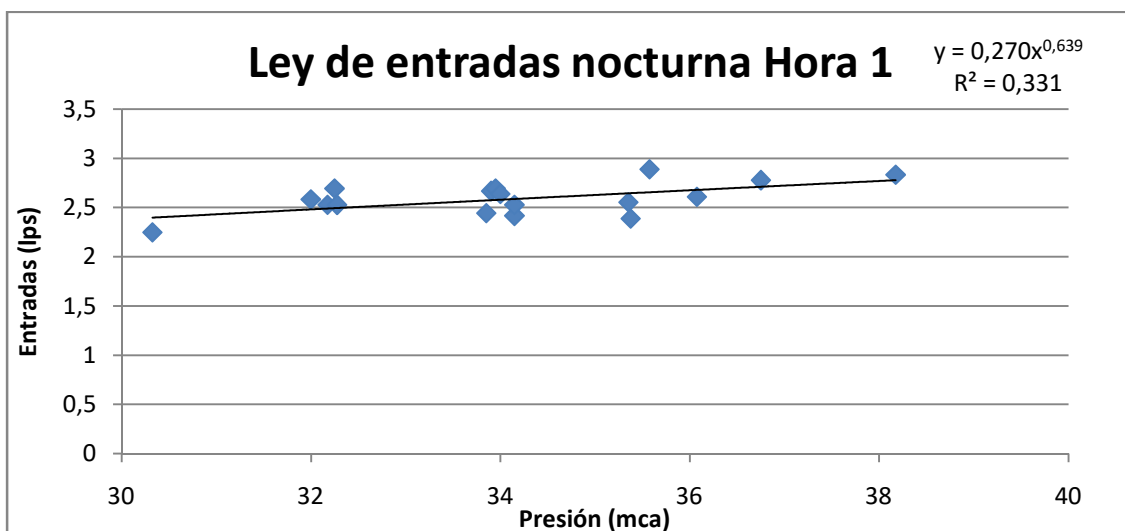


Figura 108. Ley de entradas nocturna, tomando la hora 1:00 de la noche de todos los días del mes.

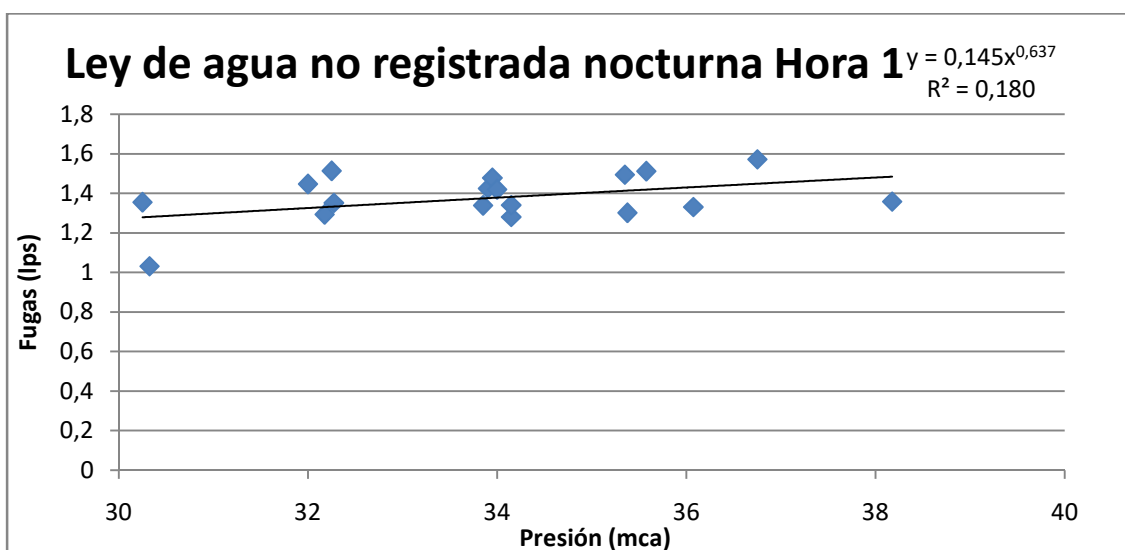


Figura 109. Ley de agua no registrada nocturna, tomando la hora 1:00 de la noche de todos los días del mes.

El ajuste, ahora, resulta mucho mejor. También se observa que el exponente ajustado ahora es muy similar. Sin embargo, la constante de la ecuación de ajuste pasa de los 0,27, en el caso de la ley de entradas, a 0,145, en el caso de la ley de agua no registrada. El eje Y de ambas gráficas demuestra el error cometido con los mínimos nocturnos. Suponer que las entradas se corresponden con el agua no registrada en su totalidad lleva a suponer que el agua no registrada tiene el doble del valor que realmente tiene.

La ley de agua no registrada y la ley de entradas al sector se han obtenido para todas las horas del día, por lo que pueden mostrarse los resultados de los ajustes hora a hora. En el caso de las 5 de la mañana, se tienen los siguientes resultados:

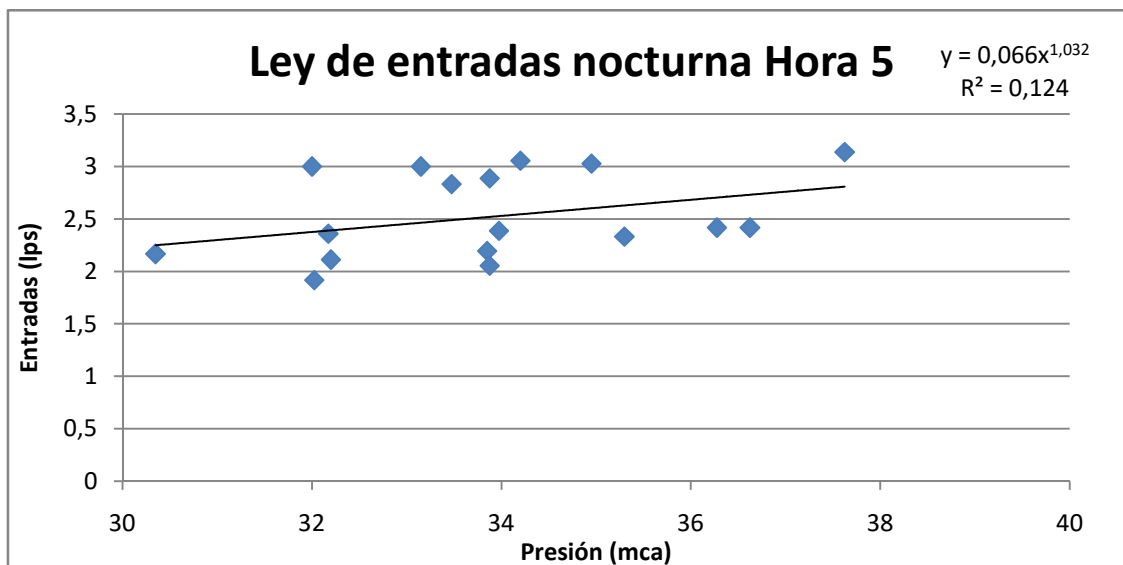


Figura 110. Ley de entradas nocturna, tomando la hora 5:00 de la noche de todos los días del mes.

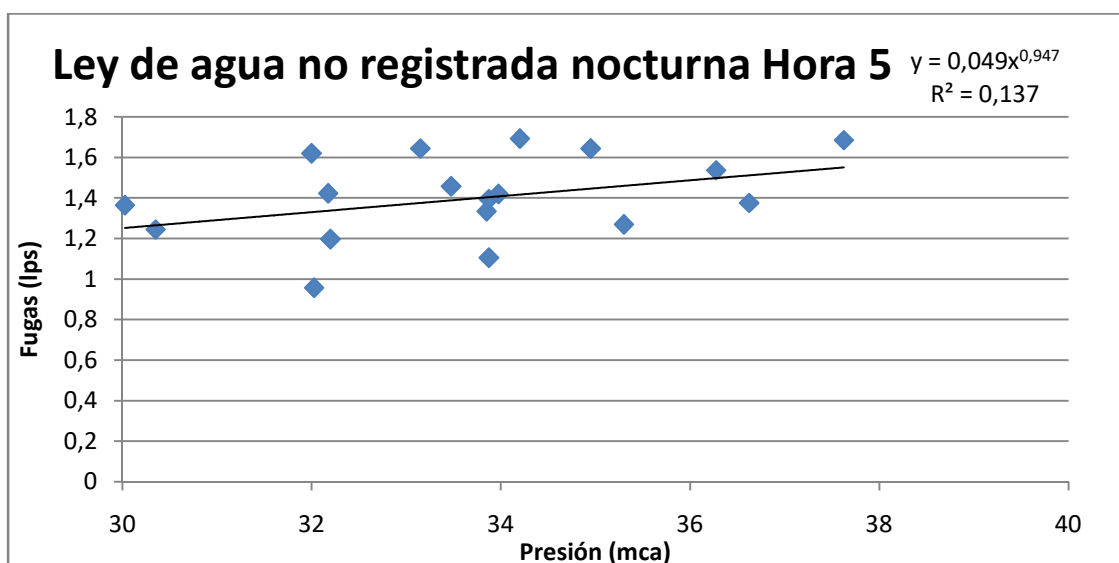
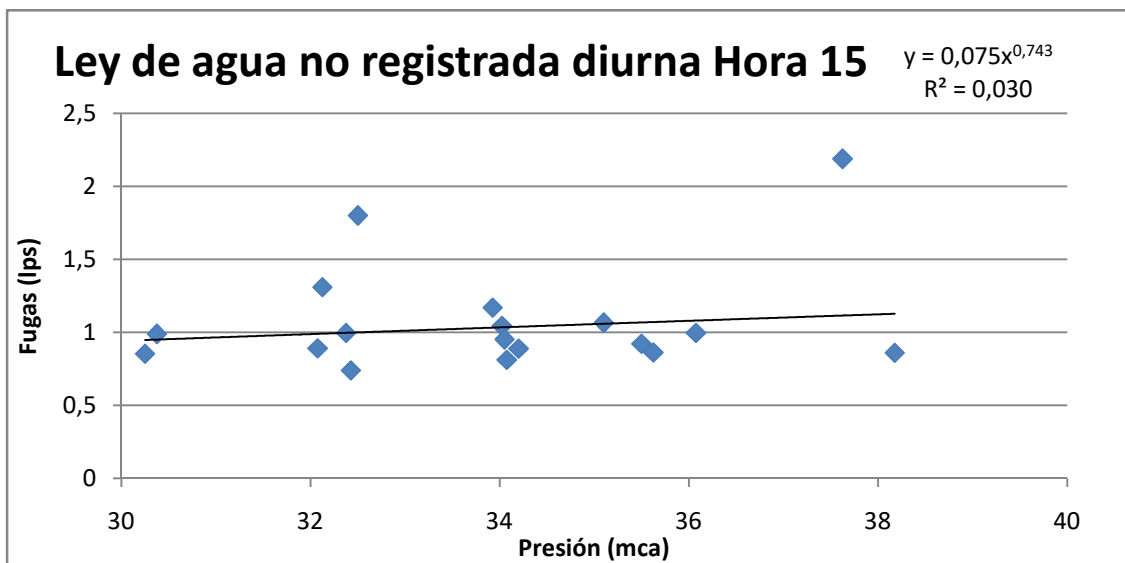


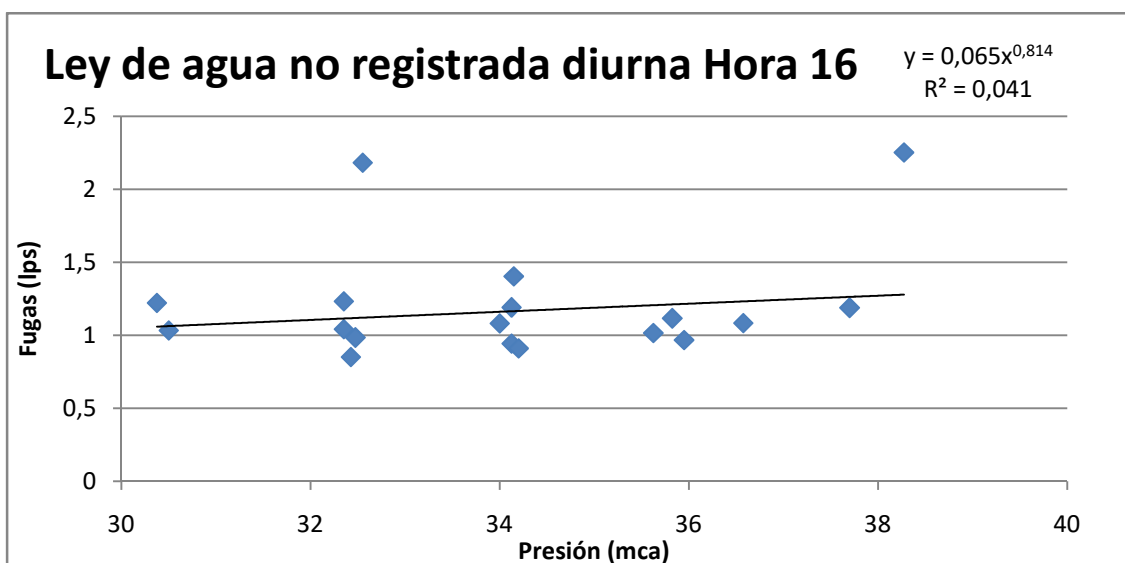
Figura 111. Ley de agua no registrada nocturna, tomando la hora 5:00 de la noche de todos los días del mes.

El exponente, en este caso, tiene un valor más cercano al 1, y el agua no registrada vuelve a ser del orden del 50% de los mínimos nocturnos, siendo el otro 50% correspondiente a demandas no nulas. La variación en el exponente demuestra que hay una variabilidad entre los días que no se explica solamente mediante la variación de la presión media en la red.

Se pueden sacar también conclusiones del comportamiento del agua no registrada para el periodo diurno. En las siguientes gráficas se muestran los resultados correspondientes a las 3 y 4 de la tarde:



*Figura 112. Ley de agua no registrada diurna, tomando la hora 15:00 del día de todos los días del mes.*



*Figura 113. Ley de agua no registrada diurna, tomando la hora 16:00 del día de todos los días del mes.*

El agua no registrada tiene, durante el día, el mismo valor aproximado que tienen durante la noche. Como último resultado a analizar, se va a mostrar la ley de agua no registrada ajustada eliminando, de los días de los ensayos, los primeros realizados, que se corresponden con los días del 3 al 6 de Abril, antes de bajar la presión y eliminar el efecto de histéresis de las tuberías plásticas.

La bibliografía dice que, en los materiales plásticos, para un valor constante de presión, con el tiempo el valor de las fugas aumenta, por lo que se procede a eliminar los primeros días para comprobar si se puede visualizar ese efecto en la ley de fugas.

La ley de fugas y entradas ajustada, eliminando los primeros días del ensayo, queda, para la 1am, como sigue:

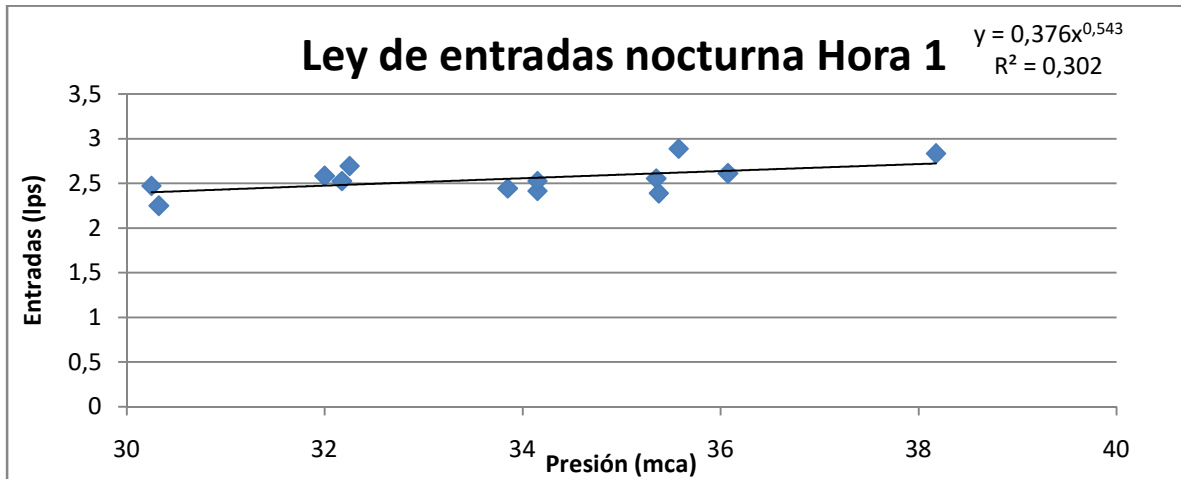


Figura 114. Ley de entradas nocturna, tomando la hora 1:00 de la noche a partir del 6 de Abril.

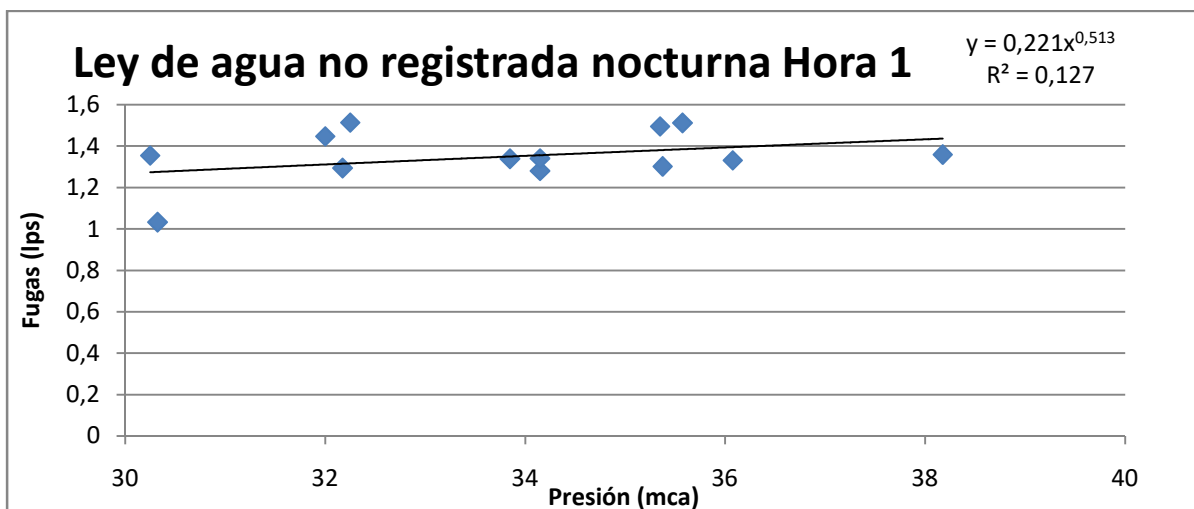


Figura 115. Ley de agua no registrada nocturna, tomando la hora 1:00 de la noche a partir del 6 de Abril.

Se puede observar que, aunque el exponente calculado es ligeramente menor, lo que parece ir acorde a lo que la bibliografía dice, el valor de  $R^2$  no es lo suficientemente bueno ni cambia lo suficiente como para asegurar que la bajada de presión durante la primera semana de Abril (3 - 6 de Abril) ha arreglado los problemas de histéresis encontrados en la bibliografía por otros autores.

## 5.9 Conclusiones

Se ha hecho un breve resumen de las posibilidades de análisis que tiene la empresa gestora a su disposición, así como determinados factores de la bibliografía que se tienen en cuenta a la hora de analizar las fugas de un sector. Algunos de los resultados que conviene destacar son los siguientes:

Se han elaborado unas funciones y programas que permiten calcular resultados de demandas y entradas de la red real para obtener la ley de agua no registrada de un sector, independientemente de su tamaño y del sector estudiado, y se ha comprobado su validez al aplicarse al sector de San Marcelino en su conjunto, aunque luego se estudie solamente un subsector del mismo. Además, los programas dan información valiosa sobre la validez de los datos, curvas de modulación diaria, reparto de esas demandas en el sector, etc.

Se ha comprobado, de forma experimental, que los datos suministrados por la empresa gestora son correctos. Las curvas de demandas registradas y de entradas al sector presentan un comportamiento muy similar, viniendo de dos fuentes de datos distintas.

Se ha demostrado, gracias a la tecnología de tele lectura horaria de la empresa gestora, que los mínimos nocturnos no son una buena aproximación para calcular la ley de agua no registrada de un sector. Conviene aplicar este estudio a sectores de mayor tamaño, para sacar la influencia del mismo en el ratio fugas/demandas nocturnas, porque en este caso es un sector muy pequeño.

Al obtener la ley de agua no registrada, se ha demostrado que existe una variabilidad no controlada y desconocida que lleva a que las fugas tengan un ratio de ajuste bajo. Ese ratio de ajuste mejora si se usan los valores obtenidos hora a hora y no valores medios, pero sigue existiendo. Para futuros estudios se plantea, para eliminar esa variabilidad, el cambio de la consigna de presión varias veces por noche, en vez de mantener una sola consigna por noche. También, para futuros trabajos, se plantea el estudio de las fugas de un sector tomando el valor real de las fugas, y no el valor agregado tomado en este trabajo, causado por la necesidad de mantener la información confidencial de Emivasa, y que parece haber tenido una influencia mayor que lo que se había supuesto inicialmente, debido a que el sector es muy pequeño.

Esa misma variabilidad incontrolada hace que no se haya podido observar el efecto de histéresis en las tuberías plásticas de la red, las cuales son un alto porcentaje en el subsector de San Marcelino estudiado.

El tipo de fuga dominante en el sector parece ser el de fuga tradicional de orificio, tal y como se ensayó en el banco de pruebas, con baja dependencia de la presión, de exponente cercano a 0,5. Esa baja dependencia de la presión hace que la influencia de los factores no conocidos en el comportamiento de las fugas destaque aún más.

Para futuros ensayos, puede plantearse el uso de sensores internos de presión y caudal en el sector estudiado, lo que puede dar mejor información sobre los procesos que están ocurriendo.



## **6 Conclusiones generales del trabajo**

En este Trabajo de Fin de Máster, resultado de una beca de colaboración entre Emivasa y la Universidad Politécnica de Valencia, se han realizado multitud de trabajos agrupados y resumidos en las cuatro partes principales explicadas anteriormente.

La revisión bibliográfica ha servido tanto para acotar y definir este trabajo, como para marcar pasos futuros en el mismo. También ha servido para recopilar y estudiar las vías de investigación principales que se están trabajando actualmente. También ha servido para crear una biblioteca de publicaciones que Emivasa puede consultar, para este trabajo y para otros en años futuros.

El diseño y montaje de la instalación, por otra parte, ha servido, aparte de para preparar para Emivasa la instalación para trabajos futuros, profundizar sobre manejo de catálogos, contacto con vendedores, manejo de tiempos de entrega y fechas, ordenación de pedidos y pedido de presupuestos.

El uso de esa misma instalación se ha usado para obtener la ley de fugas de elementos reales, lo que es el objetivo principal del presente trabajo. Pero, además, ha servido para conocer cómo funcionan en realidad los elementos instalados, esto es, el grupo de bombeo con un variador de frecuencia programable, las válvulas de control, etc. También ha servido para conocer los elementos de fontanería usados, los acoples, materiales, forma de instalarlos y herramientas que se utilizan.

Las leyes de fugas han demostrado tener comportamientos muy diferentes entre sí. Este comportamiento particular debe de ser validado con ensayos experimentales futuros para asegurar que cada tipo de defecto se comporta siguiendo la misma ecuación. El comportamiento diferente entre los diferentes tipos de defectos refuerza la idea de crear una biblioteca de fugas para la clasificación de las mismas.

Durante el montaje y uso de la instalación, también se ha analizado un sector de la red real de Valencia. Gracias a Emivasa, se ha podido cambiar la consigna de presión del mismo, sin dejar de satisfacer las demandas de los consumidores. Se ha obtenido la ley de agua no registrada y caudal entrante total del mismo durante todo el mes, y se ha demostrado que el planteamiento de los mínimos nocturnos no tiene por qué ser cierto.

Tanto para el ensayo del sector de la red de Valencia como para la obtención de resultados del banco, se ha aprendido y usado el lenguaje de programación VBA (Visual Basic para Aplicaciones). Los programas realizados permitirán obtener resultados futuros de ensayos similares de una forma cómoda y rápida. Destaca el programa para calcular las demandas de un sector, que es capaz de ser aplicado a cualquier sector de cualquier red, siempre que se conserve el formato de los datos, y durante cualquier periodo de tiempo.

Y en resumen, se ha dado el primer paso para, en un futuro, desarrollar mejores planes de manejo de la red, de inversiones de equipos, de reemplazo de tuberías y planes de mantenimiento, y de mejores algoritmos de cuantificación y localización de fugas.

## 7 Bibliografía. Fuentes consultadas

En este apartado se pretende mostrar todas las fuentes consultadas, divididas por apartado del TFM en el que han sido necesarias.

### 6.1 Revisión bibliográfica

Los enlaces de las publicaciones científicas consultadas en esta parte son:

1. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815025291>
2. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815026442>
3. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001684>
4. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814000368>
5. <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000813>
6. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001374>
7. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11265-012-0690-6>
8. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815026569>
9. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814000757>
10. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023030>
11. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023637>
12. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815025539>
13. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581402565X>
14. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023224>
15. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023212>
16. [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000360](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000360)
17. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814000733>
18. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000510981630231X>
19. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023558>
20. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001027>
21. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001635>
22. <http://aqua.iwaponline.com/content/62/4/214>
23. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034613000141>
24. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001933>
25. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315016596>
26. <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0001433>
27. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313541400459X>
28. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313954>
29. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815025242>
30. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023443>
31. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28624733>
32. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224113004478>
33. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315018212>
34. <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0000592>
35. <https://www.hindawi.com/journals/sv/2015/165304/>
36. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580515002113>
37. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066116301526>
38. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034615000695>
39. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135417305924>
40. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001209>
41. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135416305292>

42. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598616302679>
43. <http://www.mdpi.com/2073-4441/8/7/274/htm>
44. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815025412>
45. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581631815X>
46. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217316193>
47. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315016602>
48. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001398>
49. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613003272>
50. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001416>
51. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816318173>
52. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815025837>
53. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814025624>
54. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001350>
55. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814000290>
56. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814026253>
57. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224112002412>
58. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023121>
59. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117307498>
60. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817314017>
61. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313656>
62. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-014-0704-1>
63. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217311803>
64. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581731408X>
65. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313498>
66. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-016-1504-6>
67. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389417304363>
68. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X17300099>
69. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016117300364>
70. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971632068X>
71. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212428416300238>
72. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740317305751>
73. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389417301279>
74. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815217303092>
75. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817314285>
76. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800916300180>
77. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616319394>
78. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817314054>
79. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581815001032>
80. [http://www.ijdonline.com/article/S1201-9712\(17\)30246-1/pdf](http://www.ijdonline.com/article/S1201-9712(17)30246-1/pdf)
81. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616321114>
82. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917300418>
83. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454916311550>
84. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985116304542>
85. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170807000103>
86. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023042>
87. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221067071630453X>
88. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423016300353>
89. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468312416300268>

90. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706516300420>
91. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817338353>
92. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275116308605>
93. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815217300828>
94. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706516301152>
95. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116304373>
96. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178717300437>
97. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016111000962>
98. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210600616301058>
99. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016817302363>
100. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352431614000029>
101. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11269-013-0419-8.pdf>
102. <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40430%281999%2946>
103. [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000578](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000578)
104. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814022747>
105. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815026703>
106. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313838>
107. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15730621003610878>
108. <http://aqua.iwaponline.com/content/64/2/130.full>
109. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313760>
110. <http://jh.iwaponline.com/content/15/4/1203>
111. <http://www.mdpi.com/2073-4441/9/11/820>
112. <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0000506>
113. <http://jh.iwaponline.com/content/15/3/666>
114. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313802>
115. <http://iahr.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1573062X.2017.1414272>
116. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814025703>
117. <https://www.researchgate.net/publication/281748075>
118. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313796>
119. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001095>
120. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-012-0247-2>
121. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001410>
122. [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14\\_06-0084.PDF](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_06-0084.PDF)
123. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8397573/>

## **6.2 Búsqueda de equipos y componentes comerciales**

Las fuentes de información consultadas para la construcción del banco de ensayos son, junto con el conocimiento experto de Emivasa:

- UNE-EN 1267: “Ensayo de resistencia al flujo utilizando agua como fluido de ensayo”.
- UNE-EN 10226-1: “Roscas de tuberías para uniones con estanquidad en la rosca. Parte 1: Roscas exteriores cónicas y roscas interiores cilíndricas. Dimensiones, tolerancias y designación”.
- UNE-EN 10226-2: “Roscas de tuberías para uniones con estanquidad en la rosca. Parte 2: Roscas exteriores cónicas y roscas interiores cónicas. Dimensiones, tolerancias y designación”.
- UNE-EN 10226-3: “Roscas de tuberías para uniones con estanquidad en la rosca. Parte 3: Verificación mediante calibres de límites”.
- UNE-EN 24006: “Medición del caudal de fluidos en conductos cerrados. Vocabulario y símbolos”.
- ISO 4064-1: “Measurement of water flow in fully charged closed conduits – Meters for cold potable water and hot water – Part 1: Specifications”.
- ISO 4064-2: “Measurement of water flow in fully charged closed conduits – Meters for cold potable water and hot water – Part 2: Installation requirements”.

## **6.3 Manuales de funcionamiento**

Los manuales de funcionamiento para el uso de los equipos instalados son:

- Manual de funcionamiento del visor de la báscula, modelo WDESK-R/L, versión 1.06.
- Manual de funcionamiento del variador, modelo VACON V20.

## 6.4 Tratamiento de datos

Toda la información necesaria para el tratamiento de datos ha sido obtenida de:

Matlab y repaso de conceptos de tratamiento de señales:

- Apuntes de la asignatura de Métodos Matemáticos.
- Apuntes de la asignatura de Sistemas Automáticos.
- Apuntes de la asignatura de Tecnología Automática.

Visual Basic for Applications de Excel:

- <http://www.excel-avanzado.com/vba-excel>
- <https://www.lawebdelprogramador.com/>
- <https://exceltotal.com/>

Entre otras.

## 6.5 Otras fuentes

Necesarias para la obtención de datos acumulados, tipos de roturas para el banco de ensayos y estudios previos sobre el tema:

- Canal de Isabel II:
  - Cuaderno de I+D+I número 23.
  - Cuaderno de I+D+I número 24.
- Tesis de Pilar Conejos.
- Libro de prácticas de laboratorio de Iban Balbastre, referencia 3-24-75 en la biblioteca de la ETSII.

Página de Allan Lambert para la obtención de conceptos introductorios, y conceptos necesarios para ensayar el sector de San Marcelino.

- <http://www.leakssuite.com/iws-info/>





Al ser un sector relativamente pequeño, y ser el efecto de la cota de los nudos despreciable, se propone como método para calcular el AZP la siguiente ecuación:

$$AZP(X_{opt}, Y_{opt}) = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i, Y_i) * Q_i}{\sum_{i=1}^N Q_i}$$

Siendo  $X_i, Y_i$  los valores de coordenadas para cada uno de los nodos  $i$ .  $N$  es el conjunto de todos los nodos del sector, y  $Q_i$  cada una de las demandas horarias para cada nodo  $i$ .

Se trata de una media de cada una de las coordenadas X e Y de cada uno de los nodos del subsector, ponderada por la demanda de cada uno de los nodos.

El planteamiento seguido para calcular el AZP, y con él, la presión representativa de la red, ha sido el siguiente:

- Primero, se han escalado los valores de los consumos de cada uno de los nodos para que el total tenga el mismo valor que el caudal entrante total. Es decir, a cada nodo se ha añadido su parte proporcional de fugas.

Esto es válido solamente si el conjunto de la red tiene una edad similar, lo que lleva a que los defectos estén uniformemente distribuidos. Hay otras formas de distribuir las fugas, como por ejemplo distribuir las fugas uniformemente por los tubos, y luego traspasarlas a los nodos. Esta forma tiene en cuenta las longitudes de los tubos, y es una buena herramienta en redes con tubos de tamaño disperso, o redes más grandes. También pueden usarse datos estadísticos de roturas por material, al ser una red compuesta fundamentalmente por polietileno y fundición gris, o ponderar el material con su edad.

- Segundo, se ha sacado la coordenada X e Y de todos los nodos presentes en el sector, gracias a las fuentes de datos de Emivasa.

Al tener solamente demandas en el subsector, y el resto ser nulas, el resultado no varía entre coger las coordenadas del sector entero o coger solamente las coordenadas del pequeño subsector inferior. Se han sacado todas las coordenadas por si, en un futuro, se decide ampliar el AZP a todo el sector, o aplicarse al subsector superior, dejando nulo el inferior.

Como ejemplo del formato de las coordenadas, se muestra la siguiente tabla:

J100	208489,2534	4371526,886
J101	208501,6572	4371521,172
J102	208351,2308	4371589,838
J103	208303,5239	4371605,992
J104	208259,4525	4371687,391
J105	208257,868	4371683,056



- Tercero, se ha aplicado la fórmula planteada arriba, y, debido a la diferencia entre consumos diurnos y nocturnos propia de un sector residencial, ha decidido aplicarse distinguiendo entre periodos nocturnos y diurnos.

Al tener datos de todos los nodos para cada una de las horas de un mes, hay tantos resultados de coordenadas como horas ha tenido ese mes, por lo que tras realizar el primer cálculo, debe de hacerse una media simple agrupando todas las horas nocturnas y diurnas por separado. Las horas nocturnas corresponden a las de los mínimos nocturnos, y van de las 2:00 am hasta las 6:00 am, ambos incluidos. Las horas diurnas son las restantes. Las coordenadas resultantes son.

Coordenada X del nodo en periodo nocturno: 208311.

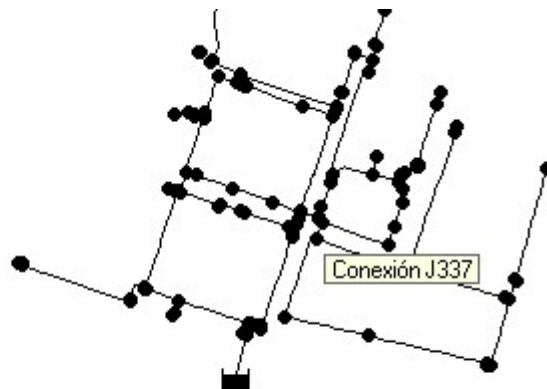
Coordenada Y del nodo en periodo nocturno: 4371083.

Coordenada X del nodo en periodo diurno: 208339.

Coordenada Y del nodo en periodo diurno: 4371061.

Como puede verse, hay una ligera diferencia entre los valores diurnos y nocturnos, lo que indica que las demandas no tienen exactamente el mismo comportamiento proporcional entre ambos periodos.

- Cuarto, se obtiene el nodo cuyas coordenadas se ajusten mejor al punto considerado. Se abre el modelo de EPANET del que se han sacado las coordenadas de los nodos y se busca manualmente.



X,Y: 208353.10, 4371072.97

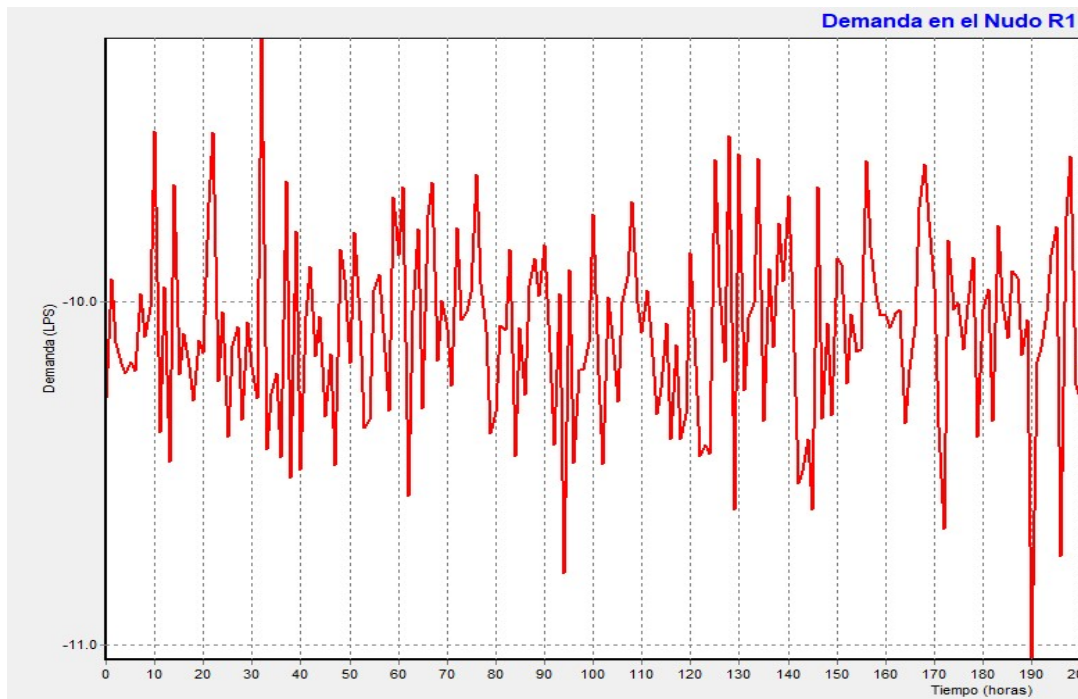
Hay varios nodos que se encuentran cerca del punto deseado, y se escoge el J337 como valor de presión.

Este resultado indica que, aunque hay nodos con consumos más elevados que el resto (del orden de las 3 veces), se encuentran uniformemente distribuidos, y no hay una zona que concentre esos caudales.

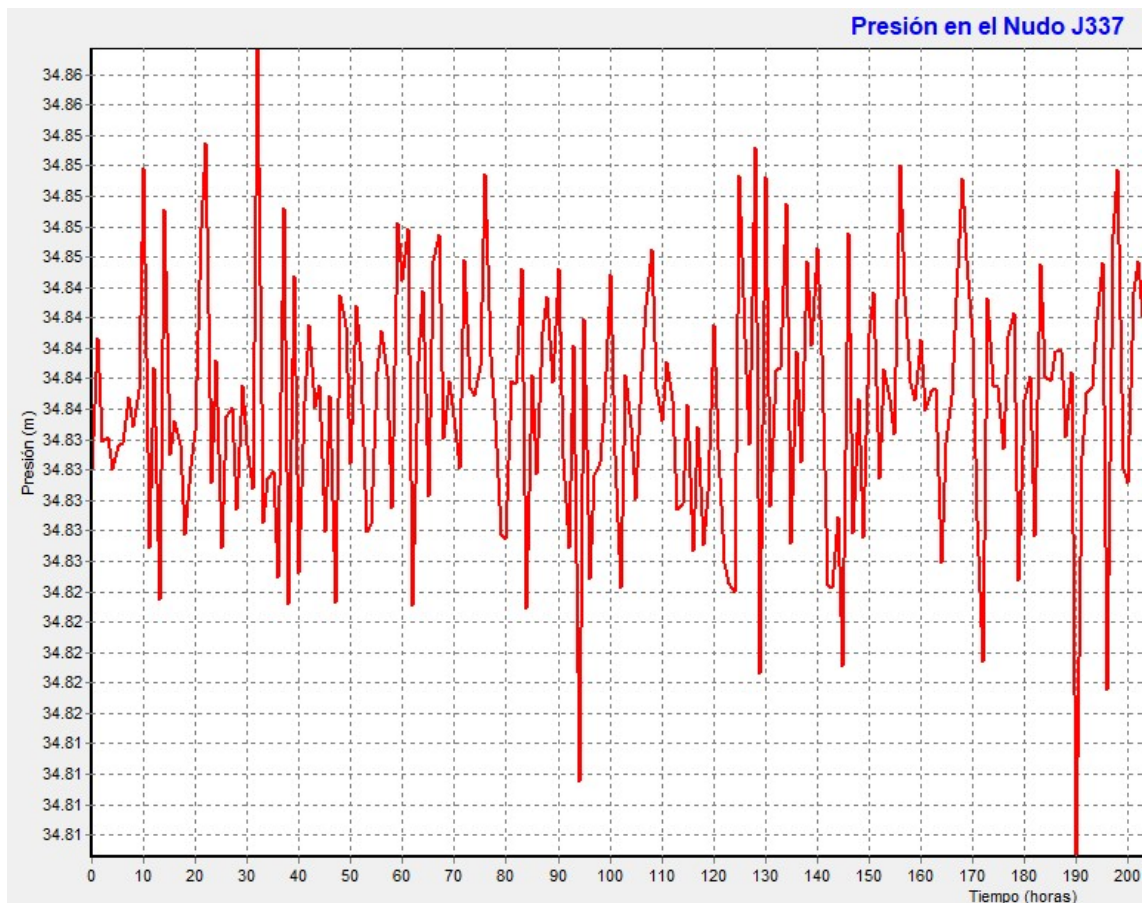
La elección del nodo también se ha realizado matemáticamente, mediante una función que calcule las diferencias entre todos los puntos y se quede con aquel nodo cuya distancia entre su coordenada y lo buscado sea lo más bajo posible. Los resultados pueden verse en la siguiente imagen, y se encuentran muy próximos al seleccionado.

J285	Nodo más cercano X nocturno
208311	Coordenada X nocturno
J302	Nodo más cercano Y nocturno
4371083	Coordenada Y nocturno
J334	Nodo más cercano X diurno
J331	Nodo más cercano Y diurno

- Quinto, se prepara un modelo de EPANET sustituyendo, del fichero .INP, las partes de [DEMANDS] y [PATTERNS] para simular el mes de Abril con los caudales entrantes totales reales. Se observa la curva de caudales entrantes para comprobar que todo se ha realizado satisfactoriamente:



Se muestra la imagen del único depósito de entrada al sector, y los caudales negativos indican caudal saliente. Una vez comprobado que todo funciona correctamente, se decide graficar la variación de la presión del nodo seleccionado como AZP:



La presión baja de una consigna de 35 metros, mantenida por el depósito, a un valor variable alrededor de 34,83 metros, lo que indica que la bajada de presión no es lo suficientemente grande como para descartar la entrada al sector como valor de presión válida para el sector. Por eso, la ley de fugas del sector se ha modelado con el valor del sensor de presión a la entrada.

Aunque los resultados han demostrado ser poco influyentes en el comportamiento global del sistema, debido a que el subsector es muy pequeño, se deja esta metodología para futuros estudios de leyes de fugas, en sectores más grandes, en los que la caída de presión interior puede ser muy importante, tanto por tener mayores caudales, como por ser las distancias mucho mayores.

Para futuros trabajos se puede plantear el ampliar esta metodología con el valor de la cota de los nudos, en ciudades en las que sea un factor a tener en cuenta.

## **Anexo II. Informe de visitas a las reparaciones de fugas**

Este es un resumen de las visitas organizadas por Emivasa entre los días 23 de Enero, martes y 26 de Enero, viernes de 2018. Las visitas tienen como objetivos principales:

- Ver una fuga real, su proceso de reparación, lo que engloba tanto la excavación, como su posterior arreglo y enterramiento.
- Hablar con los responsables de las reparaciones, para saber la frecuencia de cada tipo de roturas por material en la red de Valencia.
- Aprender, en la medida de lo posible, de la forma en la que se trabaja en Emivasa, los elementos físicamente instalados en la red, su manejo, etc.

Las visitas, cada día bajo la supervisión de un capataz distinto, se han centrado en acompañar al encargado de ese día en su jornada de trabajo, y ver las actividades realizadas y los problemas solucionados ese día. Como cada capataz tiene un trabajo relativamente distinto (mantenimientos, obras, traídas), cada día se han podido ver diferentes aspectos del trabajo relacionado con la red de Valencia. Los capataces con los que se han realizado las visitas son:

- 25 martes: visita con el capataz de mantenimiento encargado de la Zona Sur.
- 26 miércoles: visita con el capataz de obras, encargado de la Zona Norte.
- 27 jueves: visita con otro capataz de la Zona Sur, pero al que le encargaron ese mismo día solucionar una urgencia de la Zona Norte.
- 28 viernes: visita con el capataz de traídas.

Durante las visitas, en todos los casos, se tomaron fotos de los elementos instalados y de ciertas maniobras realizadas, algunas de las cuales acompañan al presente anexo.

Al final del anexo se acompañan ciertos aspectos a tener en cuenta con vistas a realizar los ensayos en el banco de ensayos de fugas.



## Martes 23 de Enero

El primer día de la visita se realizaron dos obras de mantenimiento. La primera obra, fue la reparación de una fuga localizada la semana anterior.



Al principio, nada indica que haya ningún defecto.



El agua empieza a salir de forma suave al principio de la excavación.





La fuga, con el aspecto que tiene una vez está completamente destapada.

Tras cerrar las válvulas y aislar la zona, el caudal de fuga baja considerablemente, y sigue saliendo porque queda agua almacenada en la red.



Se trata de una fuga en un tubo de hierro, de tipo circunferencial, resultado de bajadas de temperatura de días anteriores.

Tras la colocación del manguito, se observa que la fuga se encuentra reparada, y queda el proceso de vuelta a enterrar. Por necesidad de ir a otra reparación, el enterramiento se vio otro día, con otro defecto diferente.





La segunda obra, se trata de la sustitución de una acometida, en la cual un tercero realizó obras de sustitución sin permiso y añadió unos codos que dan problemas.



Los codos y la válvula de la acometida se sustituyen. Debe de cambiarse toda la T instalada.



En esta obra se vio el proceso de colocar la T nueva, y el corte del tubo antiguo para hacer el empalme y el añadido de los extremos.





En este día se vio cómo colocar nuevos tubos, cómo reparar fugas, las piezas usadas, herramientas, etc. y se pudo ver el comportamiento real de un defecto.

### **Miércoles 24 de Enero**

El segundo día se acompañó al capataz en su ruta de inspección del estado de todas las obras a su cargo. No pudo hacerse un seguimiento de situación en detalle de cada una, pero se vieron multitud de elementos diferentes.



El encofrado de una válvula en una nueva conducción que se está instalando.



El uso de una acometida temporal, mientras las obras se realizan durante varias semanas.





La instalación de una nueva conducción, mientras se sustituye el fibrocemento antiguo.



El fibrocemento no fue sustituido mientras ocurría la visita, porque se necesitan ciertos equipos especiales. Se encontraba al aire para ser cortado y hacer el empalme necesario más adelante, una vez los equipos de tratamiento de fibrocemento llegaran.





Un modelo antiguo de válvula, de gran calidad, pero con la necesidad de sustituir el cordón de estanqueidad, el cual se observa lleno de tierra en el centro de la imagen.

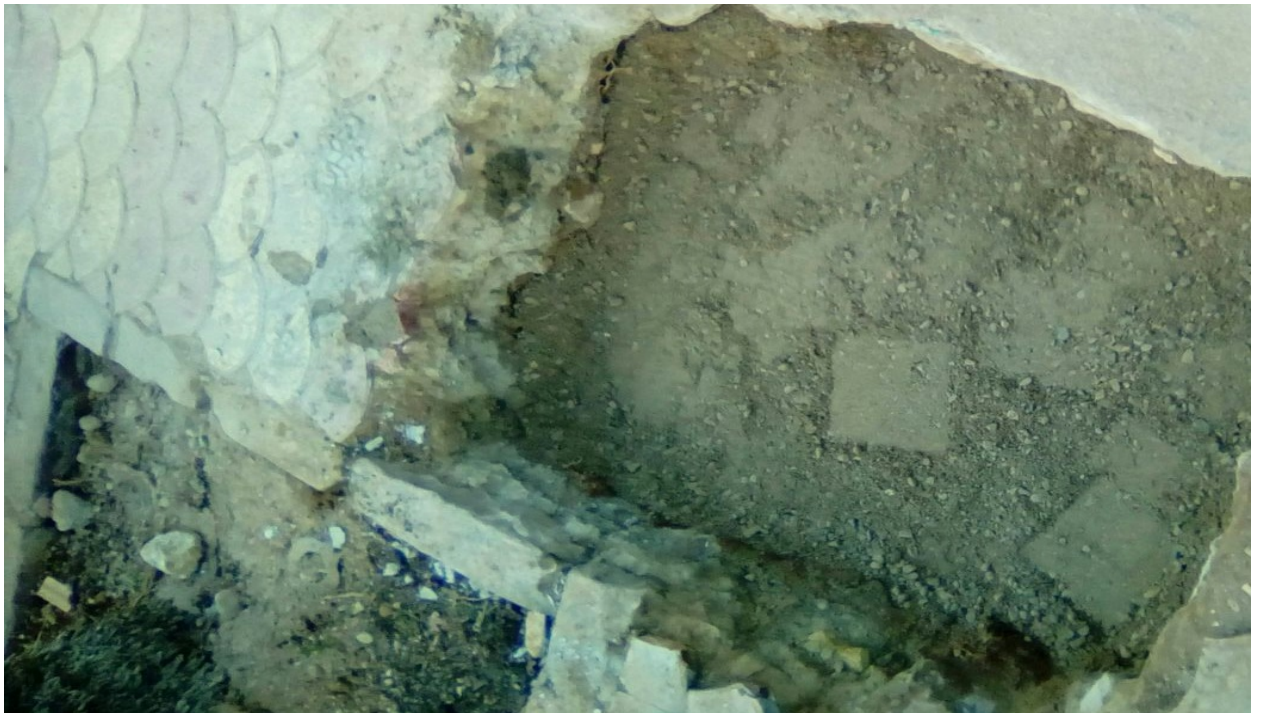


El manejo de una válvula.

Este día, y por petición propia, se pidió ver el proceso de enterramiento y compactación, una vez la reparación se ha hecho, para completar lo que faltó ver el día martes 23.



Se vio cómo se añadía la tierra y se compactaba con un pisón.



Y el añadido de agua una vez la tierra se ha compactado.



Y el proceso de mezcla y añadido del hormigón se realiza una vez la tierra ha sido compactada, con la comprobación de la profundidad necesaria y la igualación para la colocación de los ladrillos de la acera.





### **Jueves 25 de Enero**

El capataz encargado de las visitas del jueves, antes de salir, recibió un encargo urgente, en el que había ocurrido una fuga de gran magnitud, pero con la peculiaridad de que la fuga se conducía al colector de residuales, por lo que no era visible ni se sabía su procedencia ni localización.



La obra se complicó porque tanto la válvula de consumos como la de incendios se encontraban muy próximas, y en los datos hidráulicos de Emivasa aparecían cada una en la posición de la otra.



Al llegar, las válvulas se encontraban completamente inundadas.





Tras el uso de la escucha, cerrar las válvulas y esperar a que la fuga cierre, y quitar el agua inundada en las válvulas, se descubrió que había una gran fuga en consumos y una pequeña en la de incendios, pero al estar ambas dentro de la propiedad no pudo repararse nada.

La segunda obra fue el trazado de una conducción paralela a una ya existente, que pasa por una boca de residuales, y en la que el metano liberado por esas residuales había corroído el tubo.



En esta obra se pudo ver el aspecto de los tubos quitados, los cuales, gracias a una capa interna de cemento, se encontraban prácticamente sin incrustaciones de minerales.







Una vez la instalación se ha montado y comprobado que está bien hecha, se toman las medidas respecto a dos referencias de edificios existentes, para en línea recta, trazar las distancias y saber la situación de los codos, para añadirlos al modelo.

### **Viernes 26 de Enero**

El viernes la visita ocurrió en traídas, con el objetivo de inspeccionar los depósitos y los elementos instalados en cada uno. Los depósitos requieren permisos especiales y el realizar ciertas maniobras de seguridad, lo que sumando el tiempo de desplazamiento, ocupó el día entero. Se pudieron ver todos, y también se vio el denominado kilómetro 0 y un grupo de bombeo aparte.



La balsa de excedentes, en la cual se tira el último palmo de agua de cada depósito, pues por ley no puede ser recirculado en caso de tener que vaciarlo.



Para ahorrar espacio, y al ser el nivel del depósito variable, no se sabe exactamente el punto de las escaleras en el que empieza el agua.



Sistema de añadido de cloro de uno de los depósitos, el cual, en mínimo funcionamiento, normalmente coge el caudal mínimo posible de la bomba y lo divide sin clorar, y solamente a una pequeña parte del caudal mínimo se le añade el cloro. El resto es devuelto al depósito sin cambios.





Conjunto de dos bombas de 126kW por unidad, en una estación de bombeo alejada de los depósitos.



Tuberías de diámetro 300mm en adelante, en el kilómetro 0.





Sistema fotovoltaico del depósito. Suministra la energía necesaria para los elementos auxiliares (luz, bomba del sistema clorador, sensores y sistemas electrónicos, etc.).

### **Detalles a remarcar para el banco de ensayos**

Tras hablar con los capataces de los tres primeros días, y preguntar sobre la frecuencia de fugas que más se encuentran en sus reparaciones, se han llegado a las siguientes conclusiones.

En el informe del Canal de Isabel II se explican 5 tipos de roturas principales: longitudinal, circunferencial o transversal, espiral o inclinado, poro (agujeros pequeños) y orificio (agujeros relativamente grandes).

En Emivasa los fallos más comunes encontrados son circunferencial (como el mostrado en este informe) y longitudinal. El longitudinal lleva a veces asociado el desprendimiento del material del tubo en forma de astillas.

Los materiales más perjudicados son fibrocemento y hierro en sus dos formas (no hay distinción entre fundido y dulce) y en ambos la proporción de defectos anteriores es muy similar. En el caso de los defectos en materiales plásticos, saben que existen, pero de forma muy esporádica.

De ser necesario, puede convenir el estudio de los históricos de roturas de Emivasa para más precisión, junto con el estudio de detalle del TFM de David Mogollón, antiguo becario de la Cátedra de Emivasa, quien estudió ciertos aspectos de roturas por material.

La tierra de Valencia es fundamentalmente arcillosa y arenosa cerca de la playa. Hay bastantes piedras pequeñas las cuales pueden influir en determinados defectos. A la hora de los montajes y la puesta a punto se tiene especial cuidado con que no haya piedras cerca de uniones. La falta de defectos de tipo poro u orificio parece ser debida a la baja corrosión externa de los materiales instalados. Los tubos instalados con la capa de cemento interna parecen resistir bien la corrosión y las incrustaciones.

Las dimensiones del cajón de tierra previsto parecen ser suficientes para el rango de tuberías que se van a ensayar.

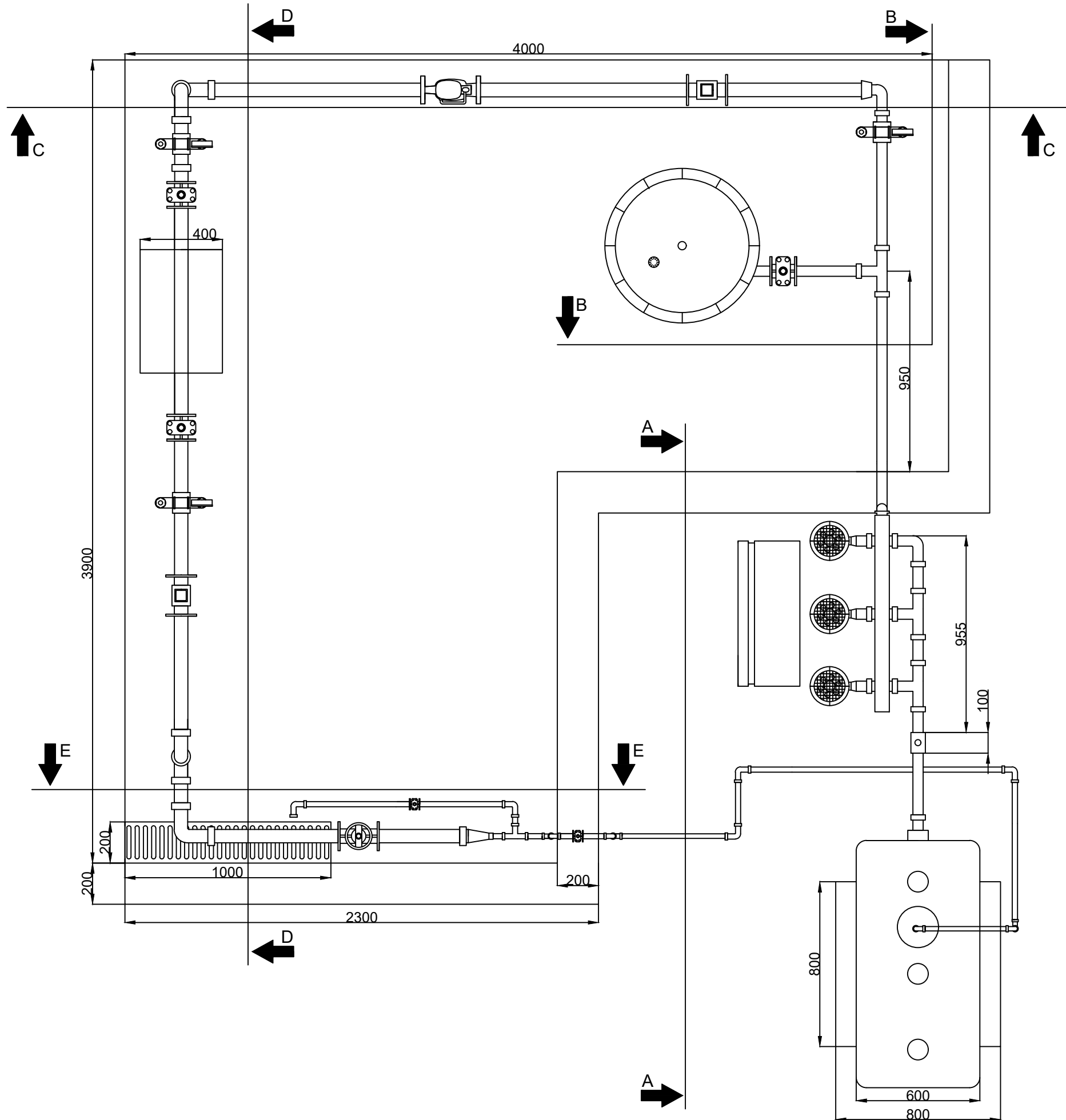
El efecto del tapón de tierra en el comportamiento de la fuga se ha visto de gran relevancia. En los ensayos, junto con el material transparente seleccionado para hacer el cajón de tierra, debe planearse el añadir un segundo cajón de hierro que soporte el gran peso de la tierra. Por dureza en las uniones, conviene que sea soldado.

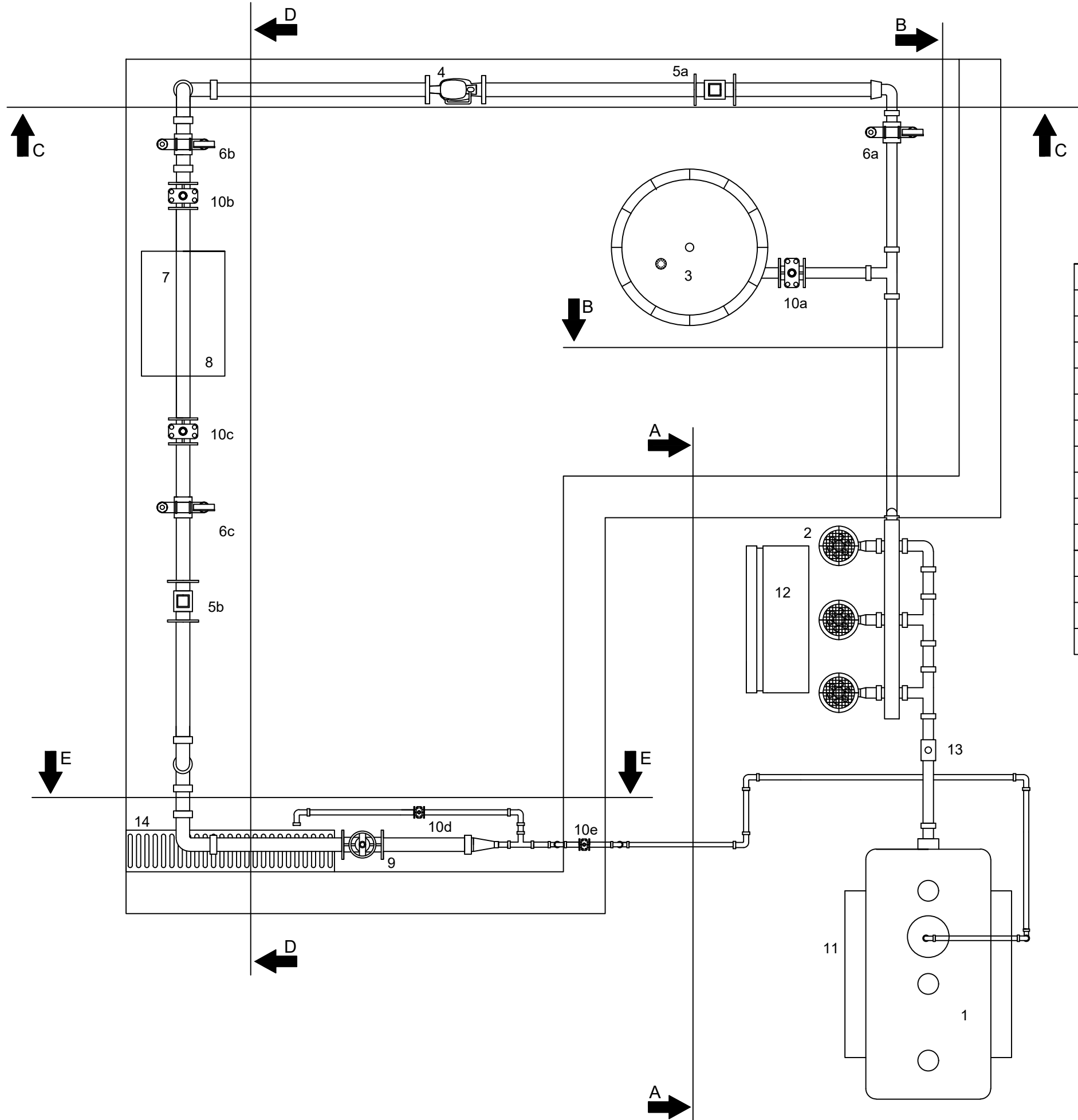
### Anexo III. Presupuesto y planos generales del banco de ensayos

El presupuesto del banco de ensayos queda reflejado en la siguiente tabla:

Componente	Modelo/Referencia	Cantidad	P. Unitario (€/ud)	Precio Total (€)
Depósito no presurizado	DRC-50 Diám. salida 100mm	1	€ 200,00	€ 200,00
Bomba	VIPV 10-65T	1	€ 3.458,30	€ 3.458,30
Calderín	500 AMR-B160			
Variador de Frecuencia	Vacon V20			
Báscula	BMM 1 800X800 rs-232 a PC	1	€ 910,00	€ 910,00
Válvula de regulación de presión	M1 DN 100 PN 16	1	€ 676,00	€ 676,00
Caudalímetro	Sensor MAG 5100 W P11 DN65	2	€ 1.199,57	€ 2.399,14
Sensor de presión	SENSOTEC 26600 G	3	€ 150,00	€ 450,00
Válvula de regulación de caudal	DN 65	1	€ 215,00	€ 215,00
Válvula de corte	DN 65	2	€ 100,00	€ 200,00
Autómata		1	€ 1.224,84	€ 1.224,84
Grúa de 1000 Kg	Novodinámica	1	€ 2.000,00	€ 2.000,00
Cajón de ensayos metálico	A medida	1	€ 125,50	€ 125,50
Cajón de ensayos metacrilato	A medida	1	€ 200,00	€ 200,00
			<b>TOTAL</b>	<b>€ 12.058,78</b>

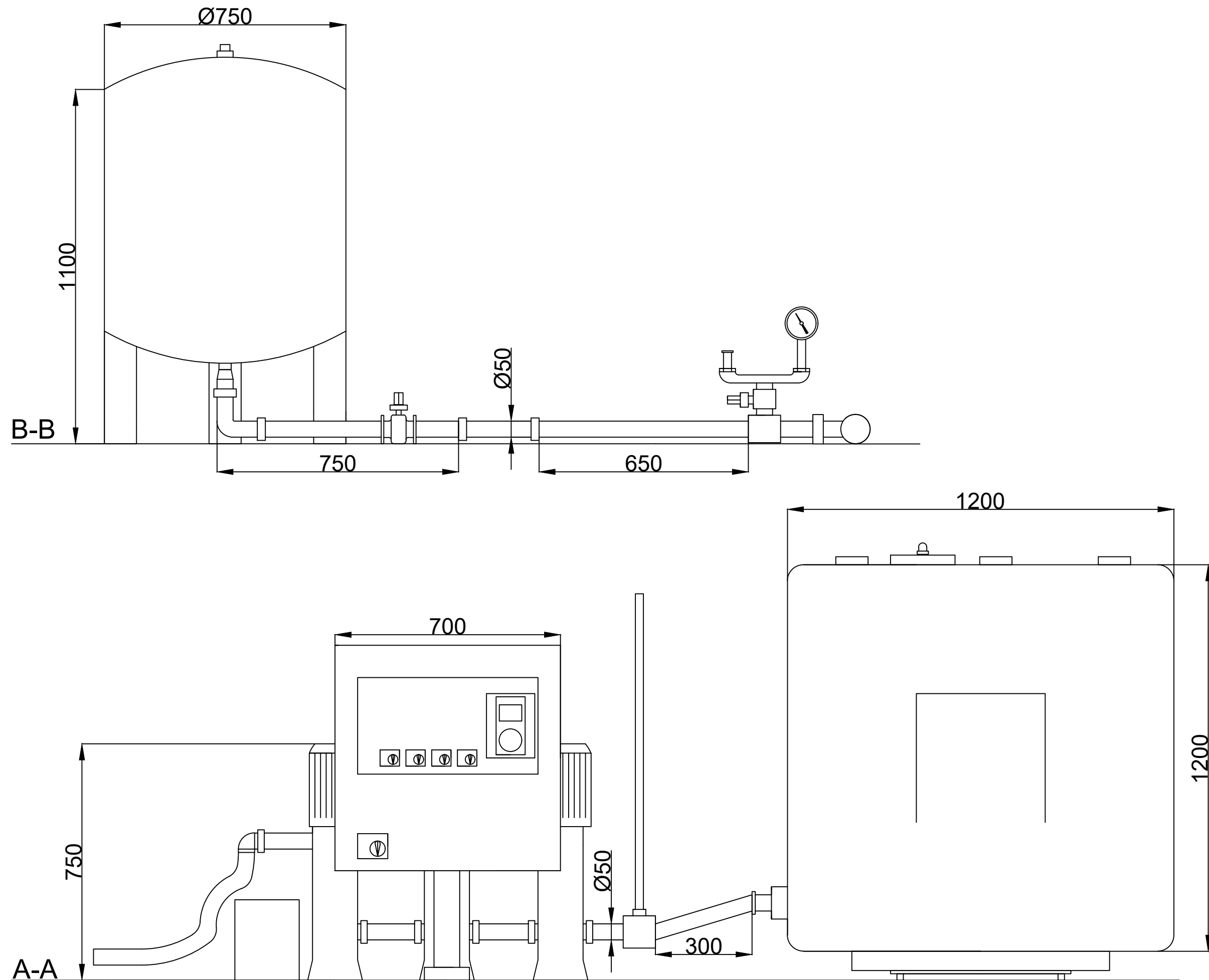


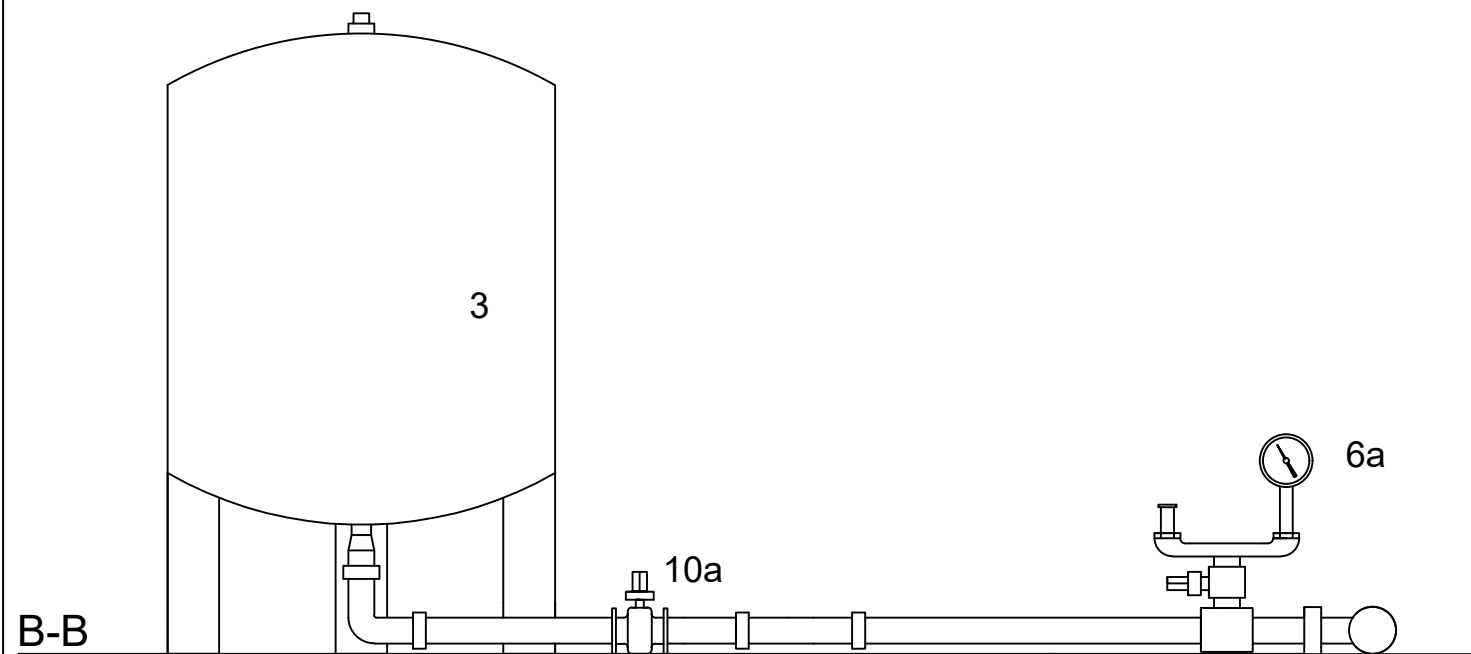




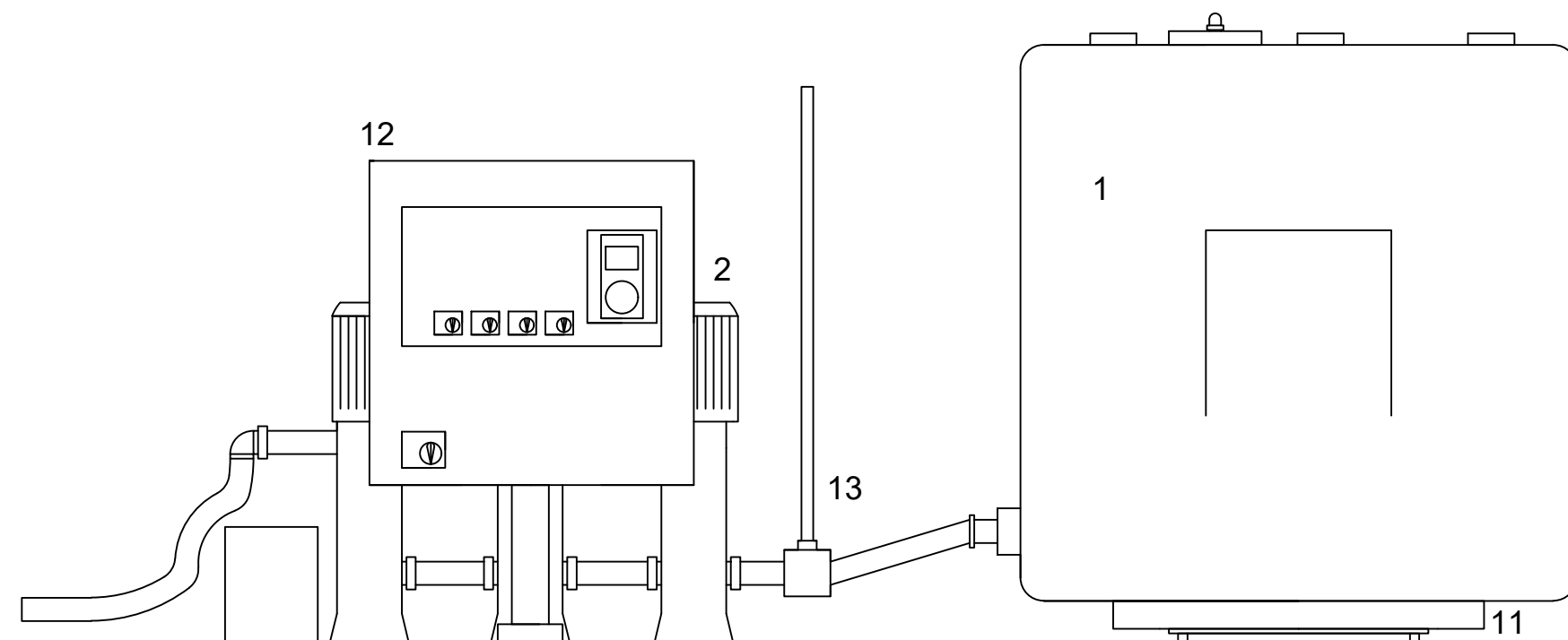
Número	Elemento
1	Depósito no presurizado
2	Bombas
3	Calderín
4	Válvula reguladora de presión
5a-b	Caudalímetros
6a-b-c	Sensores de presión
7	Tubería con defecto a ensayar
8	Cajón
9	Válvula de regulación
10a-e	Válvula de corte
11	Báscula
12	Variador de frecuencia
13	Visor de nivel del depósito no presurizado
14	Sumidero de caudal fugado





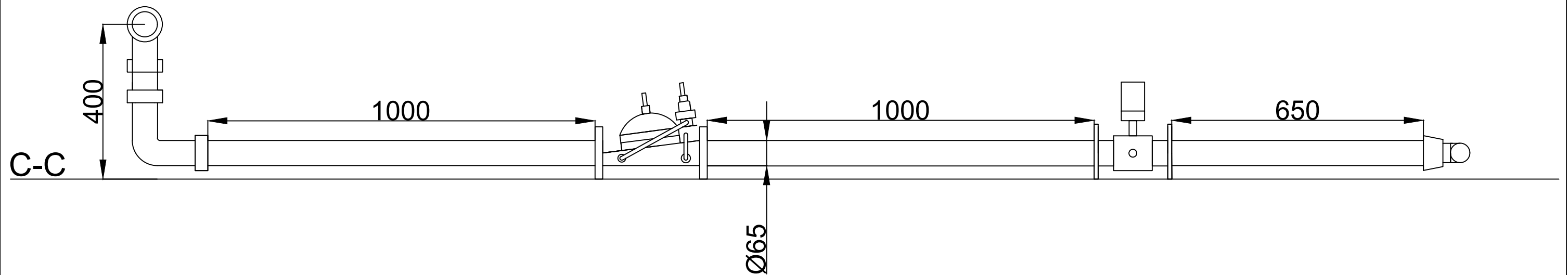
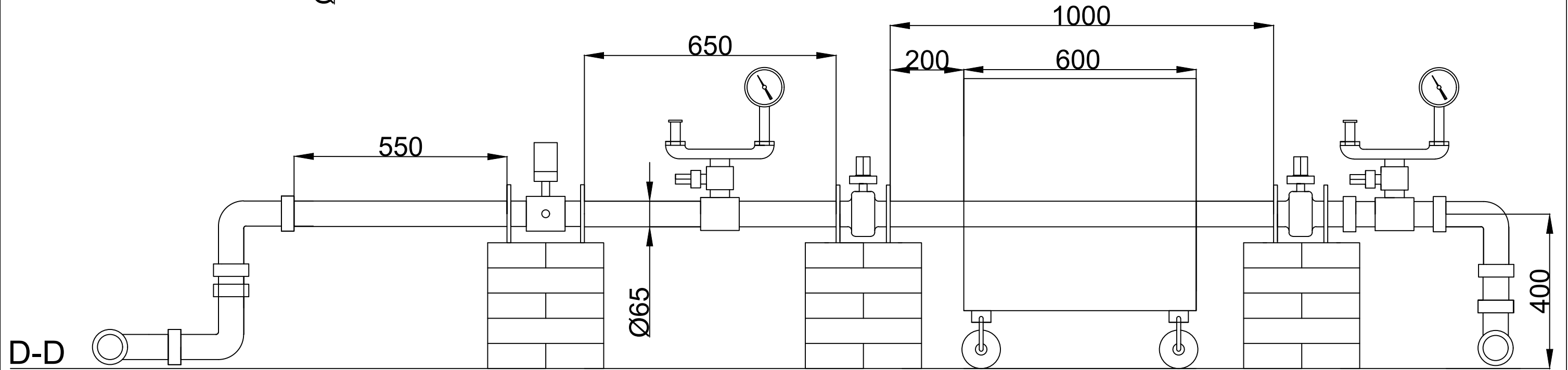
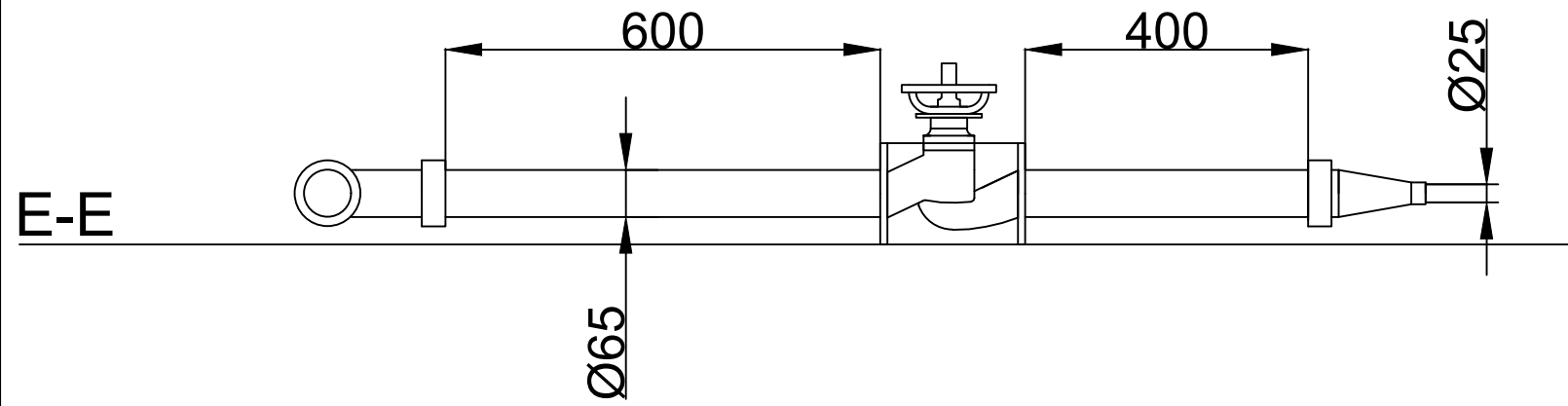


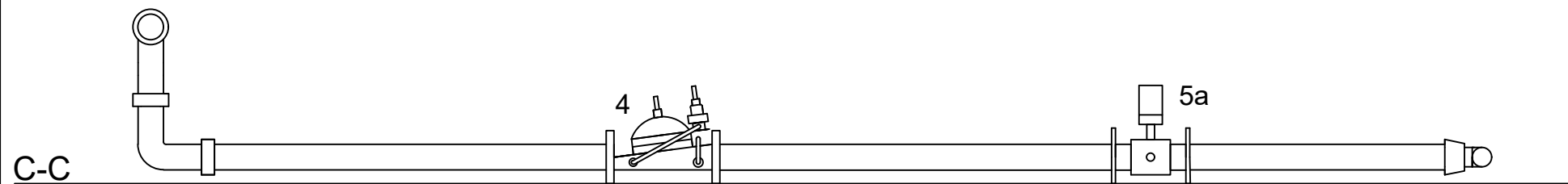
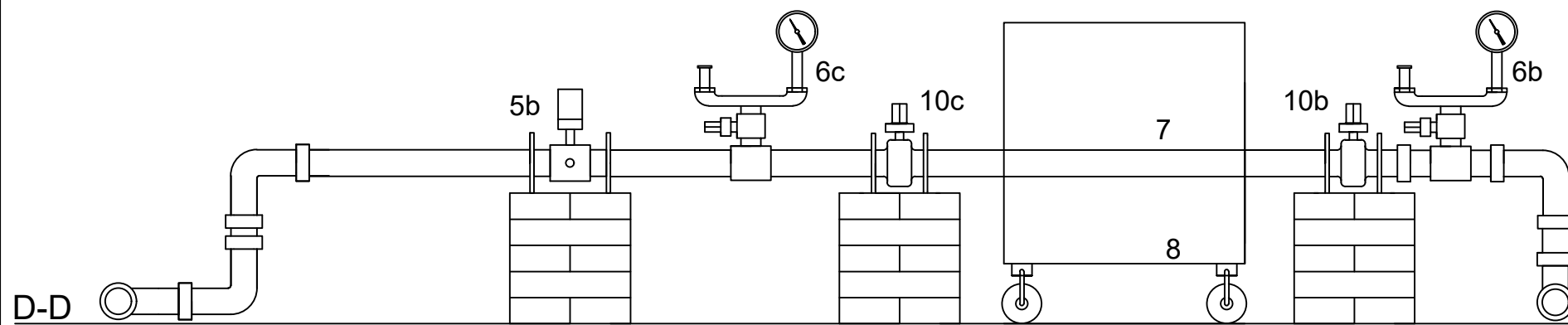
B-B



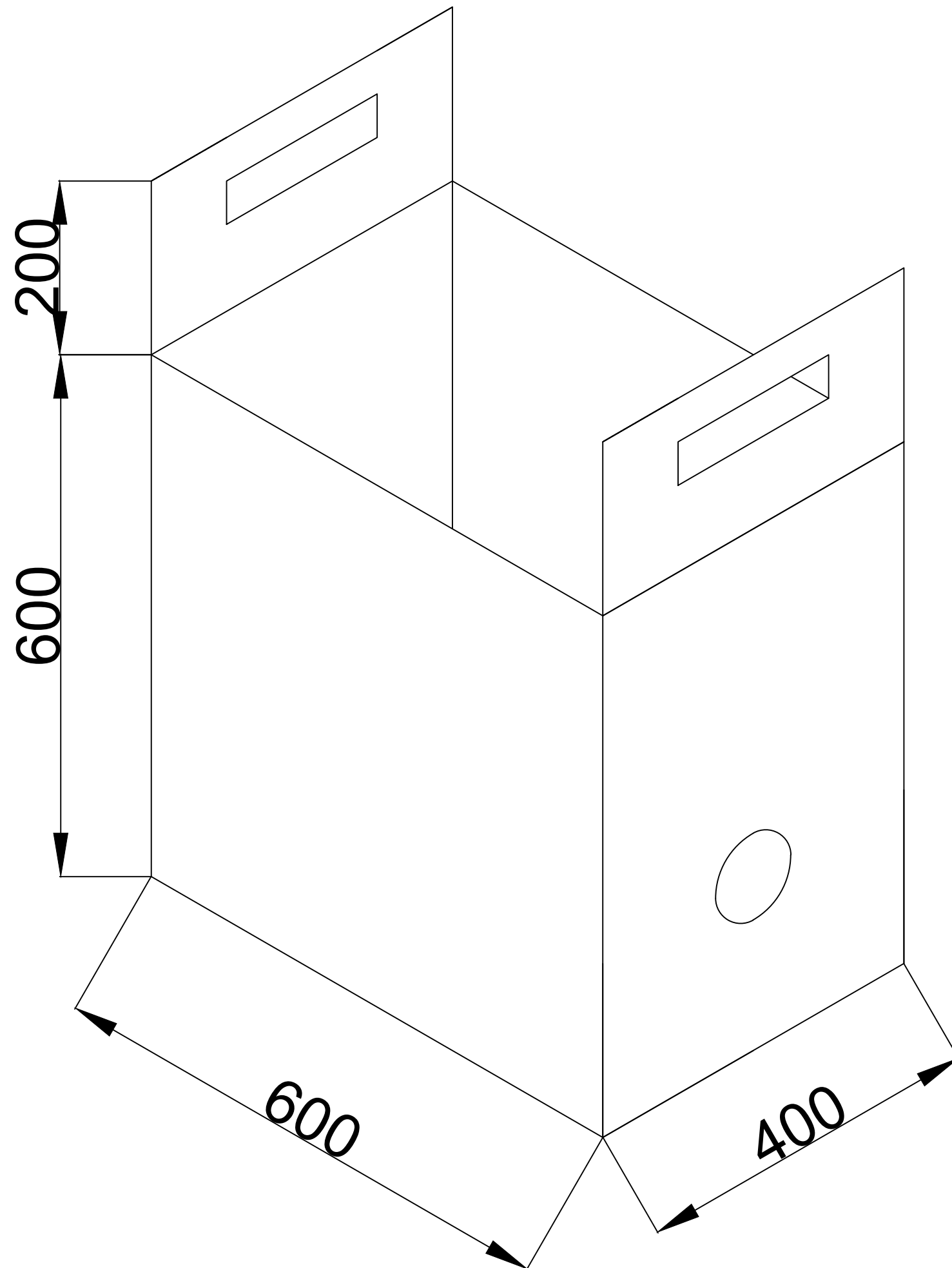
A-A

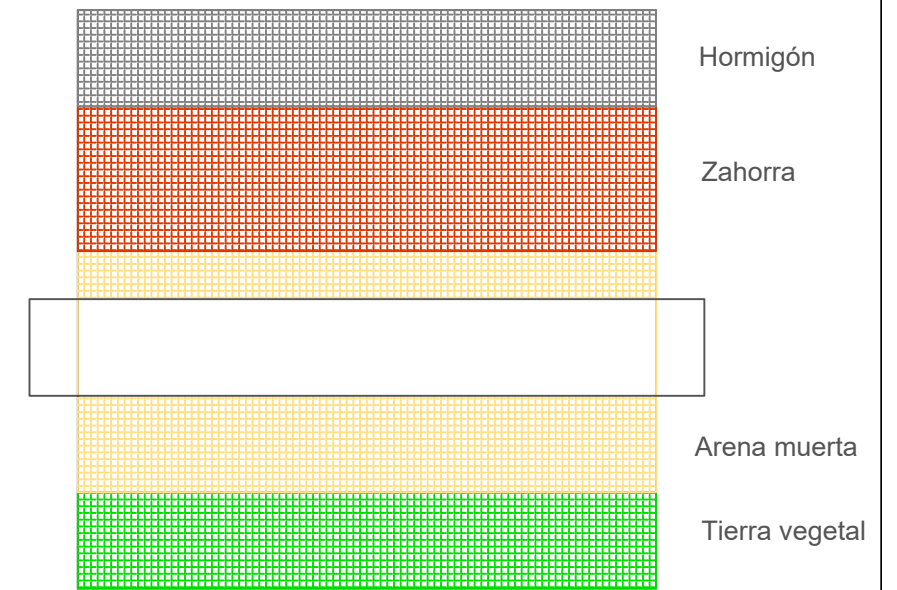
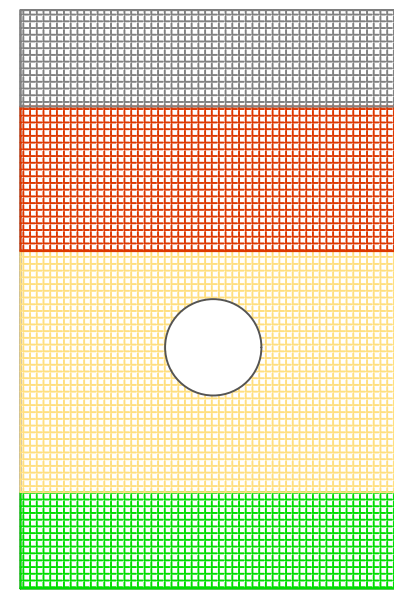
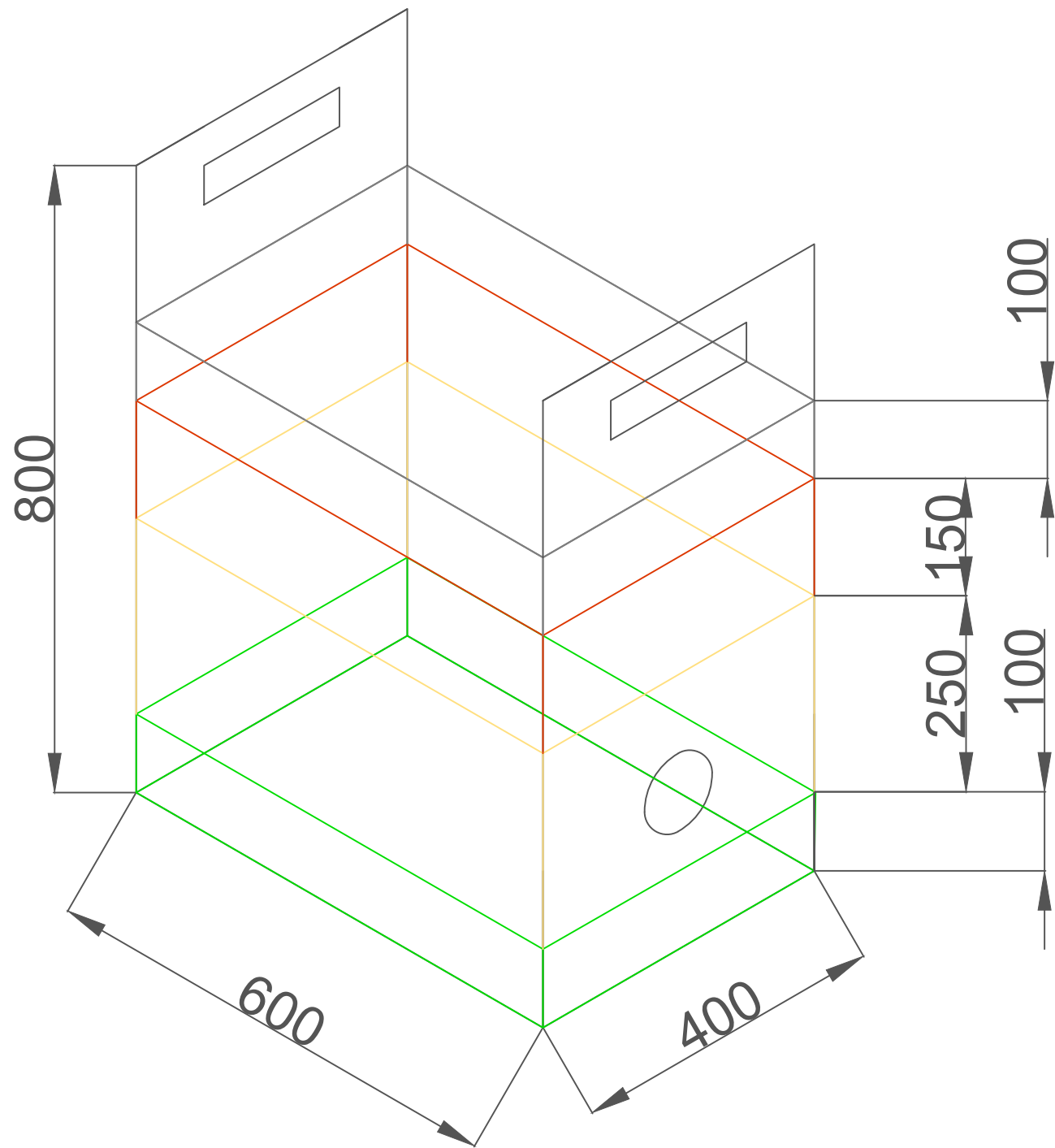
Número	Elemento
1	Depósito no presurizado
2	Bombas
3	Calderín
4	Válvula reguladora de presión
5a-b	Caudalímetros
6a-b-c	Sensores de presión
7	Tubería con defecto a ensayar
8	Cajón
9	Válvula de regulación
10a-b-c-d	Válvula de corte
11	Báscula
12	Variador de frecuencia
13	Visor de nivel del depósito no presurizado
14	Sumidero de caudal fugado



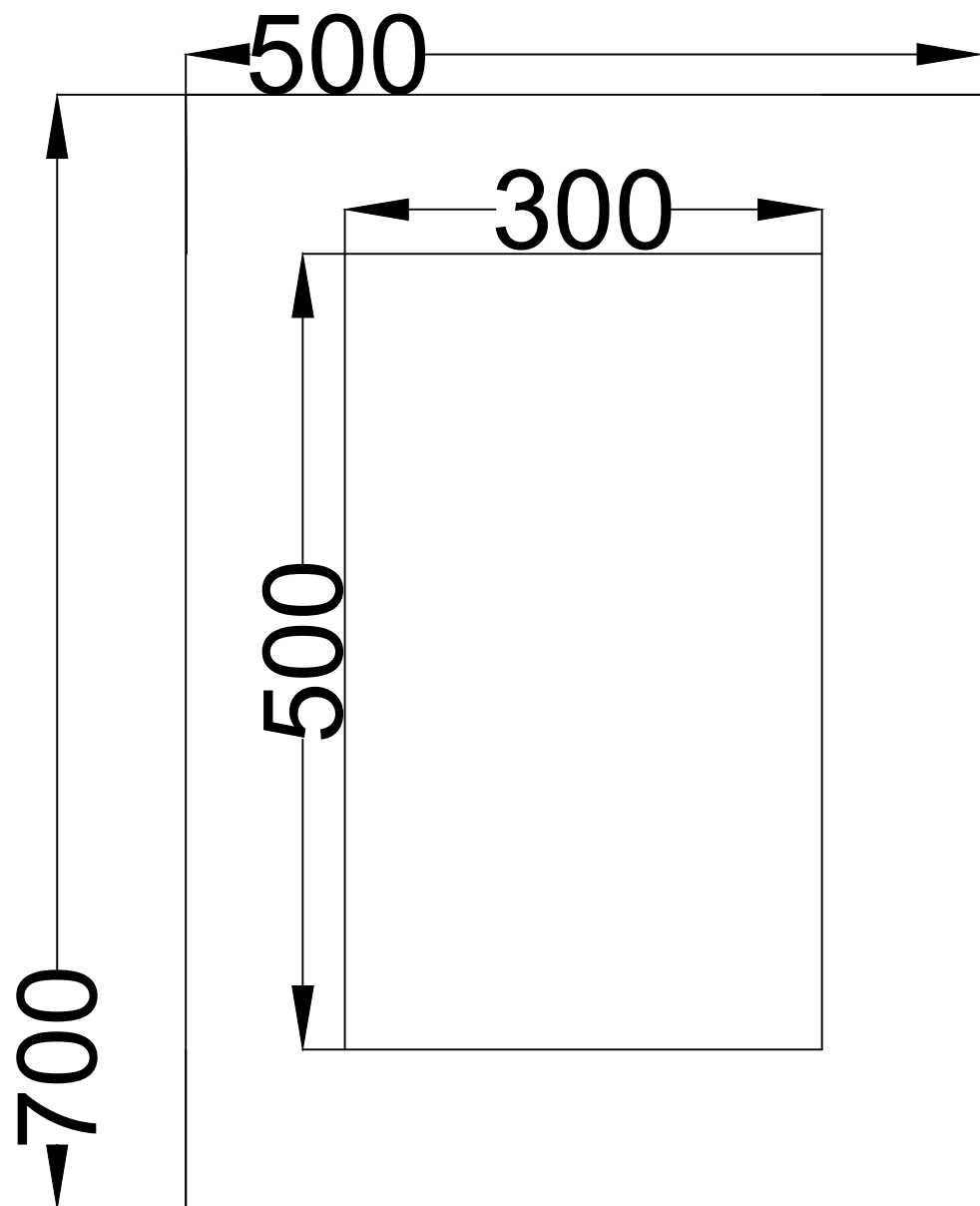
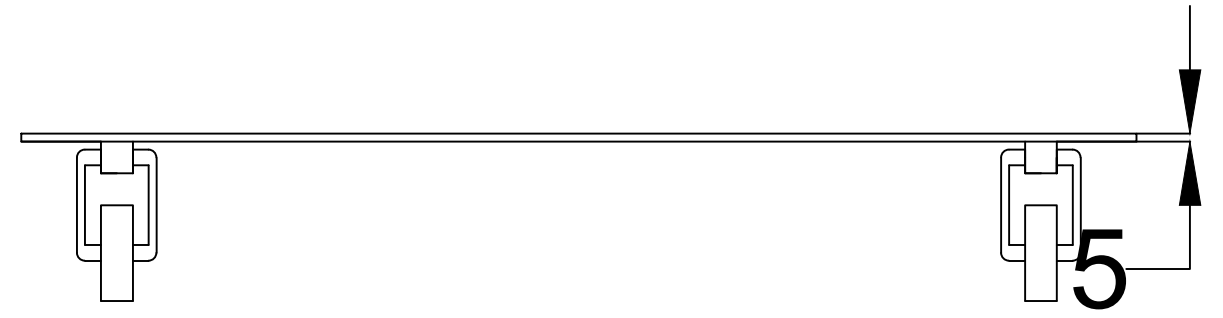
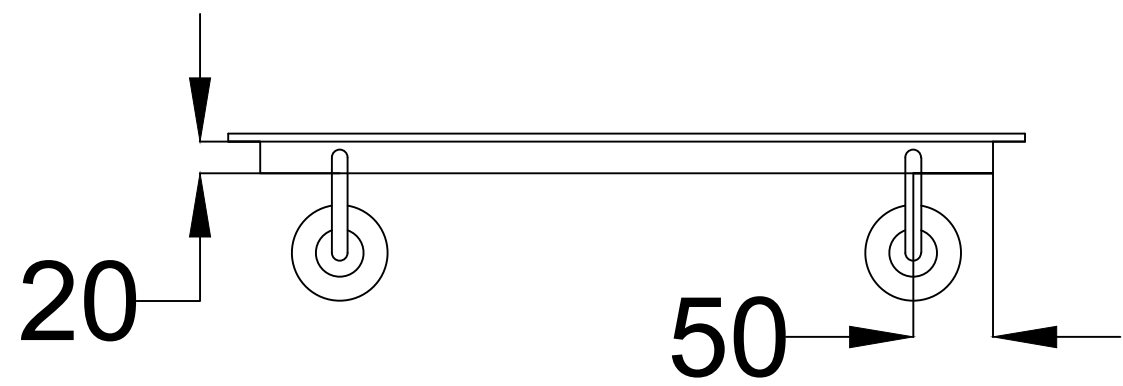


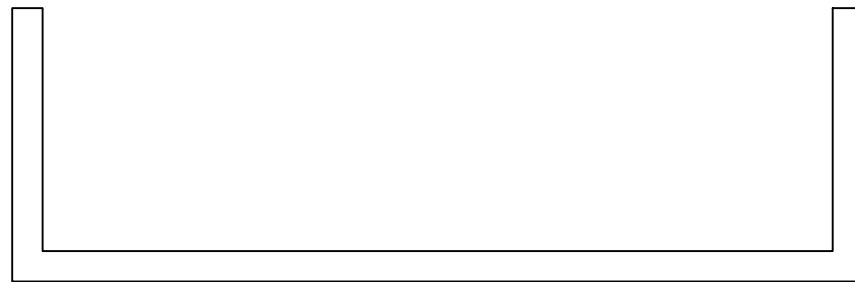
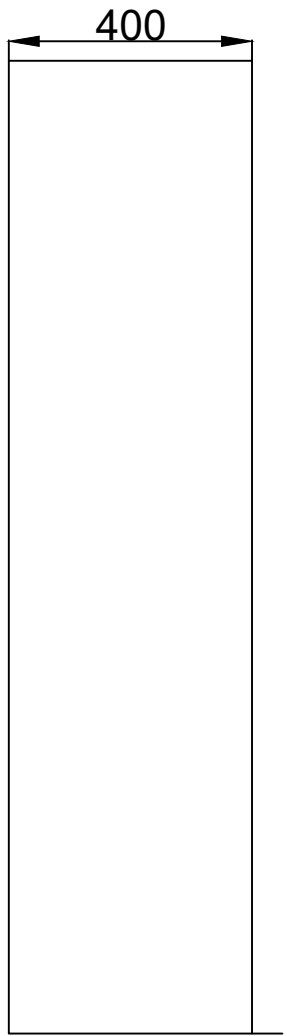
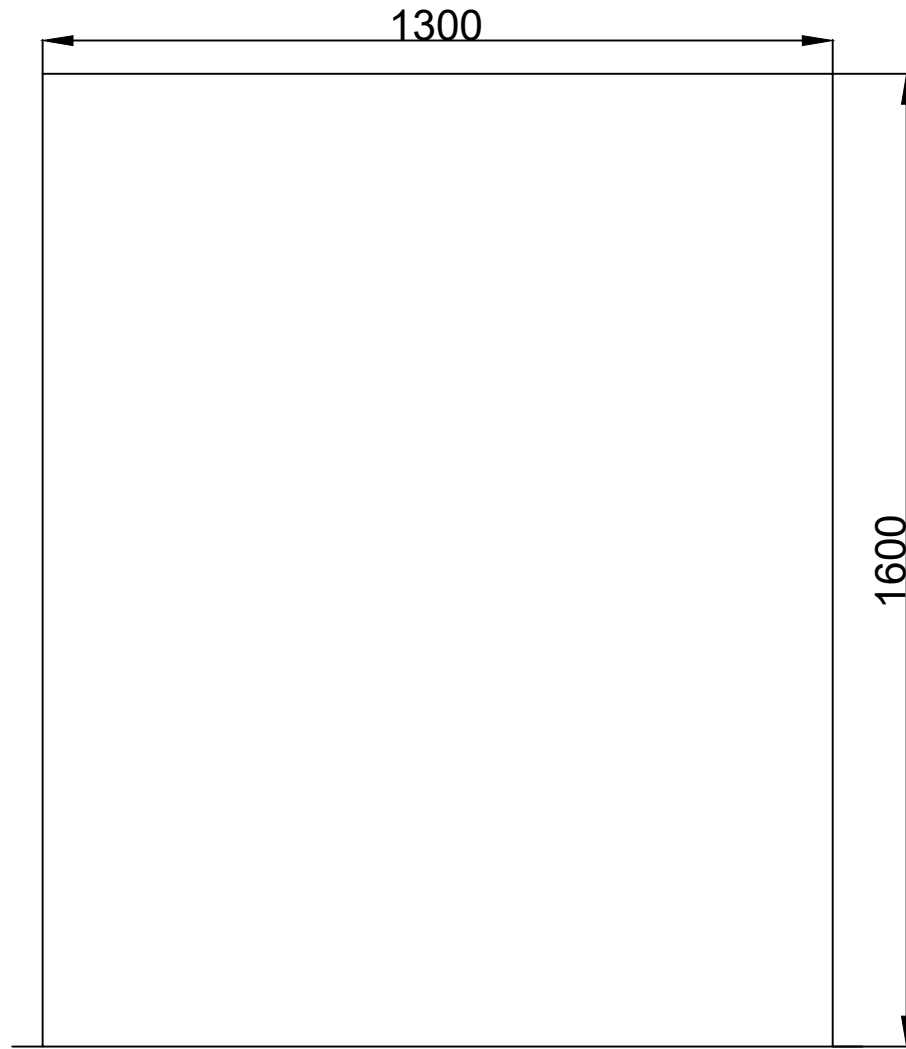
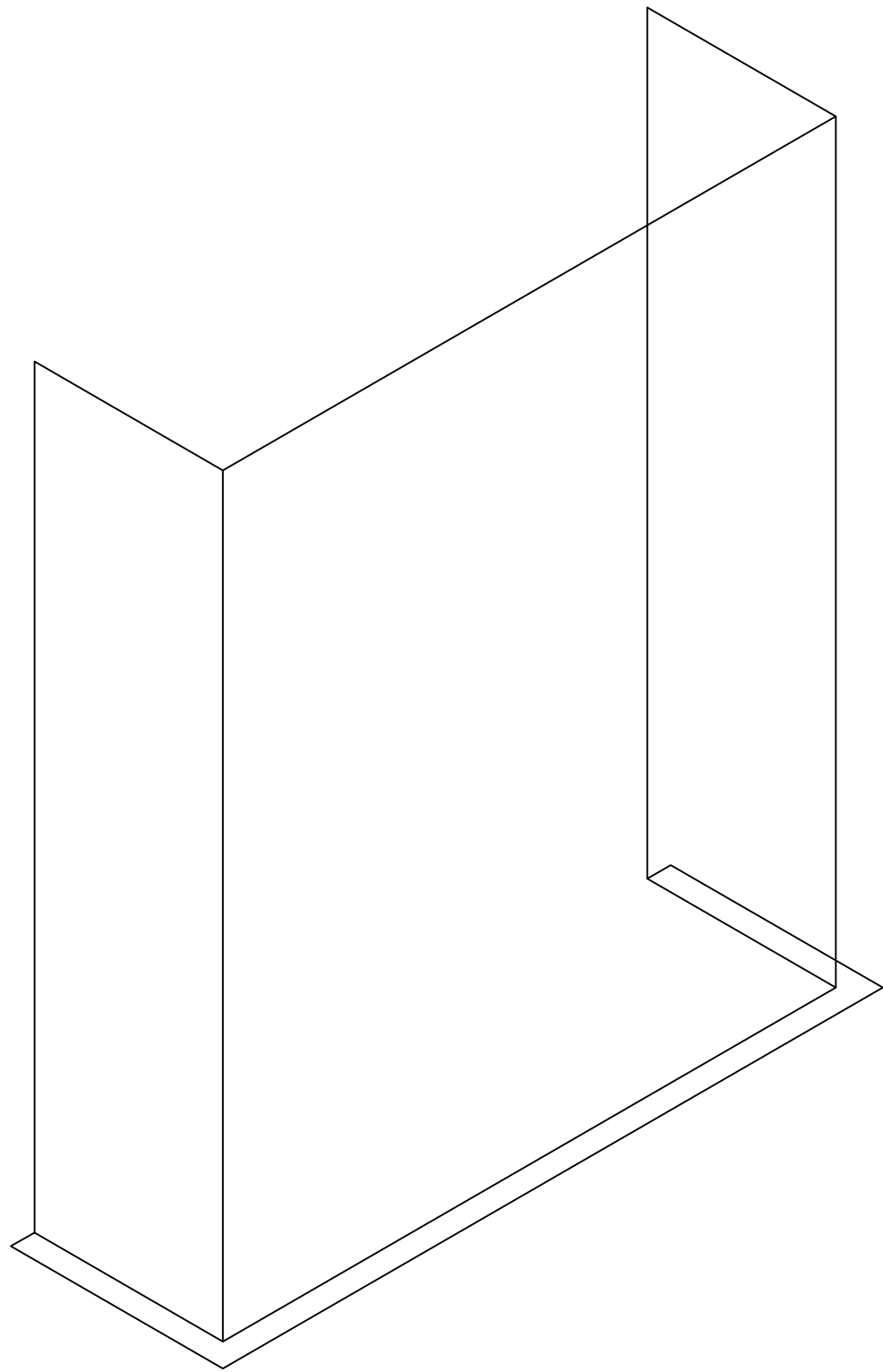
Número	Elemento
1	Depósito no presurizado
2	Bombas
3	Calderín
4	Válvula reguladora de presión
5a-b	Caudalímetros
6a-b-c	Sensores de presión
7	Tubería con defecto a ensayar
8	Cajón
9	Válvula de regulación
10a-b-c-d	Válvula de corte
11	Báscula
12	Variador de frecuencia
13	Visor de nivel del depósito no presurizado
14	Sumidero de caudal fugado



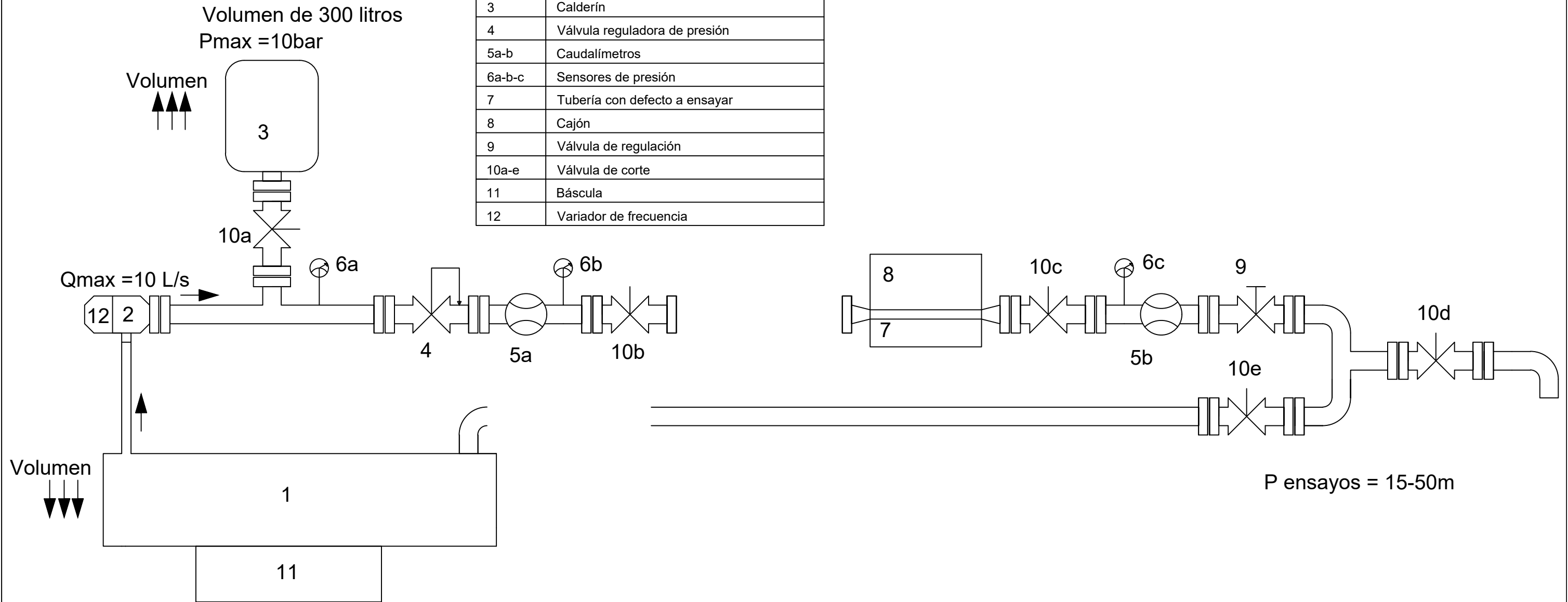




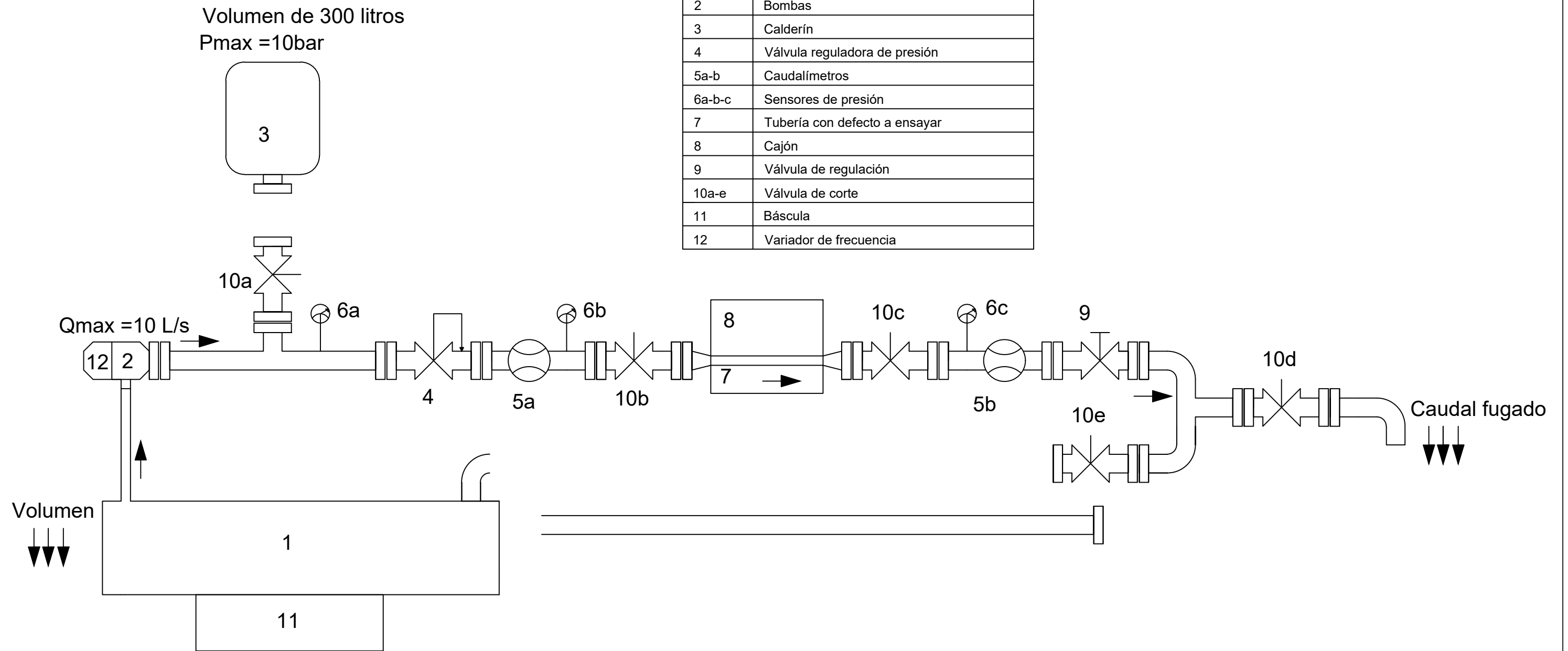




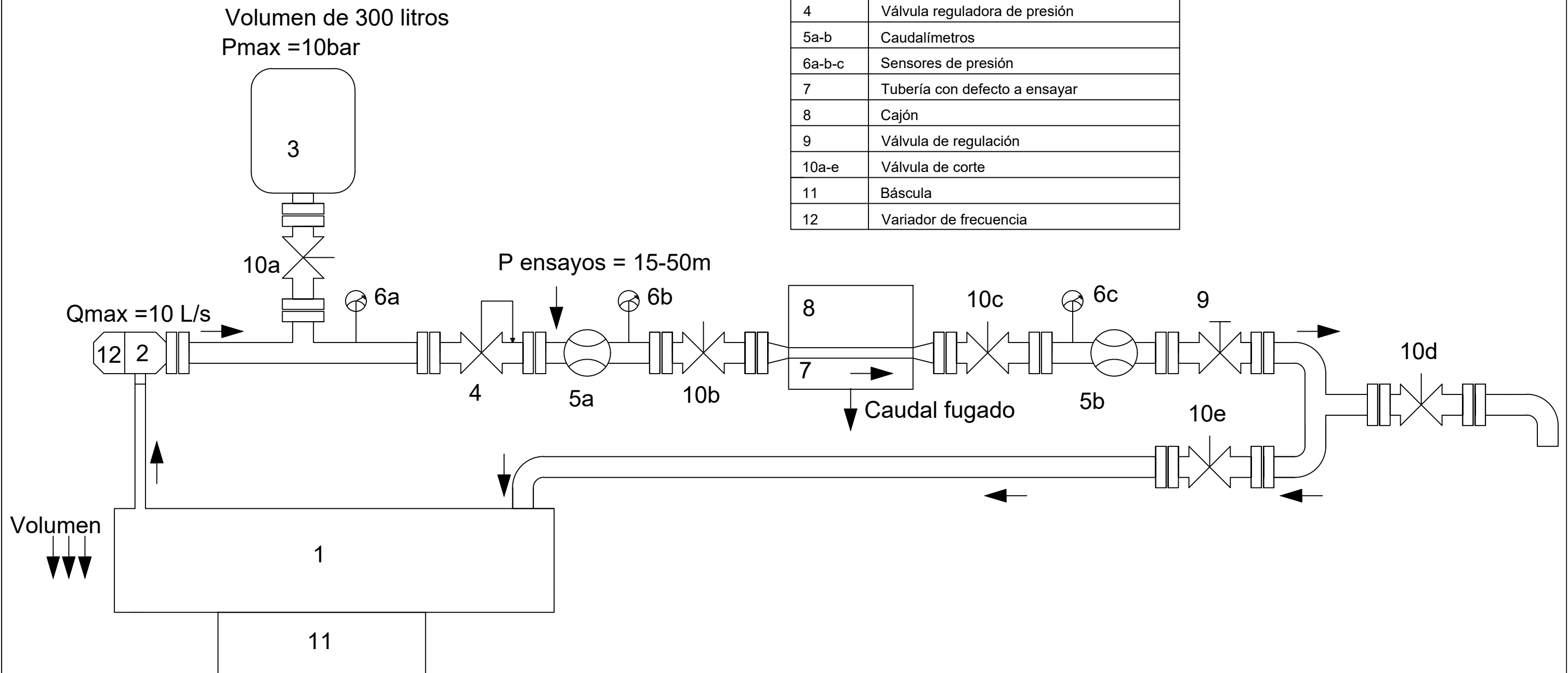
Número	Elemento
1	Depósito no presurizado
2	Bombas
3	Calderín
4	Válvula reguladora de presión
5a-b	Caudalímetros
6a-b-c	Sensores de presión
7	Tubería con defecto a ensayar
8	Cajón
9	Válvula de regulación
10a-e	Válvula de corte
11	Báscula
12	Variador de frecuencia



Número	Elemento
1	Depósito no presurizado
2	Bombas
3	Calderín
4	Válvula reguladora de presión
5a-b	Caudalímetros
6a-b-c	Sensores de presión
7	Tubería con defecto a ensayar
8	Cajón
9	Válvula de regulación
10a-e	Válvula de corte
11	Báscula
12	Variador de frecuencia



Número	Elemento
1	Depósito no presurizado
2	Bombas
3	Calderín
4	Válvula reguladora de presión
5a-b	Caudalímetros
6a-b-c	Sensores de presión
7	Tubería con defecto a ensayar
8	Cajón
9	Válvula de regulación
10a-e	Válvula de corte
11	Báscula
12	Variador de frecuencia



Número	Elemento
1	Depósito no presurizado
2	Bombas
3	Calderín
4	Válvula reguladora de presión
5a-b	Caudalímetros
6a-b-c	Sensores de presión
7	Tubería con defecto a ensayar
8	Cajón
9	Válvula de regulación
10a-e	Válvula de corte
11	Báscula
12	Variador de frecuencia

