

BENCHMARK DE CONTROL Y SUPERVISIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Gerard Sanz, Ramon Pérez

gerard.sanz@upc.edu, ramon.perez@upc.edu

Grupo Sistemas de Control Avanzado de la Universidad Politécnica de Catalunya, Terrassa 08222, España

Resumen

La disponibilidad de agua potable es posible gracias a las infraestructuras construidas que conforman las redes de distribución. Las compañías de agua son las encargadas de mantener estas redes en buen estado, así como asegurar unas condiciones de calidad y presión en el consumidor final. Estas condiciones se verifican mediante medidas realizadas en los sensores de la red. Si se dispone del modelo de la red de distribución de agua, estas medidas pueden utilizarse también para su calibración, así como en metodologías de detección de fugas [3], control de la calidad del agua [2], etc. Estas metodologías se desarrollan en lenguaje Matlab, combinadas con otros entornos que permiten la simulación de redes hidráulicas, como EPANET [4]. Este trabajo presenta una interfaz gráfica que combina ambas herramientas, permitiendo su interconexión y facilitando la aplicación por parte del usuario de funciones ya existentes, a la vez que permite incorporar nuevos módulos personalizados.

Palabras clave: Redes de distribución de agua, modelos, simulación, control de presión.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación son la base de una gran parte de la investigación y transferencia de tecnología relacionada con las redes de distribución de agua. La herramienta EPANET permite simular el comportamiento de redes hidráulicas dadas unas condiciones de contorno, mientras que existen otros software con gran poder de cálculo matemático, así como un extenso abanico de funciones ya programadas. La interacción de ambos tipos de herramientas permite el análisis del comportamiento de las redes y el estudio del funcionamiento de diferentes metodologías de control y supervisión. Durante el desarrollo de la tesis del autor se programará una interfaz gráfica para facilitar la manipulación e interacción de las herramientas nombradas. En este trabajo se presenta el estado de la interfaz actual, que incluye un módulo de simulación y un módulo de control de pre-

sión con el que ya se ha podido trabajar y obtener resultados [5]. En la página web¹ del grupo de investigación de los autores se puede descargar la interfaz, juntamente con un manual de uso, algunas redes académicas y propuestas didácticas.

2. MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Existen diferentes representaciones de redes de distribución de agua, como pueden ser los modelos matemáticos, redes neuronales o modelos borrosos. Todos estos modelos son válidos si cumplen la función para la cual han sido diseñados. En este trabajo se utiliza un modelo de simulación donde cada elemento tiene su comportamiento físico representado matemáticamente, teniendo en cuenta también la interacción entre los diversos elementos.

A continuación se presentan los componentes básicos de un modelo de distribución de agua potable [1][7].

2.1. Elementos físicos

Una red de distribución de agua está formada por tuberías, bombas, válvulas, tanques, depósitos y consumos. Los diversos elementos se interconectan para producir una red formada de nodos y ramas. Las bombas, tuberías y válvulas constituyen las ramas de la red, mientras que las uniones de estas ramas son los nodos: tanques, depósitos y consumos. Las propiedades físicas para describir el comportamiento de los elementos son los caudales en las tuberías y las alturas piezométricas o cargas de los nodos. En la figura 1 se puede observar una red académica con dos válvulas de reducción de presión en las entradas que conectan un sector de seis consumidores con dos depósitos fuente.

2.2. Elementos no físicos

Por otro lado, es necesario describir tres objetos informativos encargados de describir el compor-

¹<http://sac.upc.edu/training-benchmarks/simulador-de-xarxes-de-distribucio-daigues>

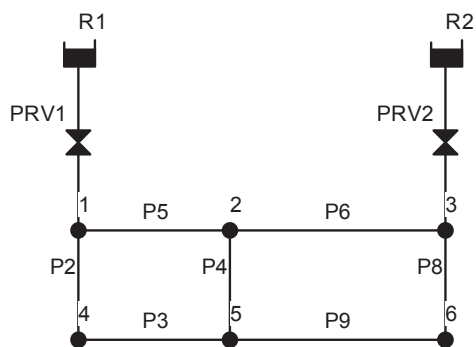


Figura 1: Representación de una red de agua en EPANET

tamiento y los aspectos operacionales del sistema de distribución de agua: las curvas, los patrones temporales y los controles.

Las curvas se utilizan para representar la relación existente entre dos magnitudes de los elementos de la red, como por ejemplo la curva de rendimiento de una bomba, la curva de volumen de un tanque o la curva de pérdidas en una válvula.

Los patrones temporales son colecciones de factores multiplicativos que se aplican a un valor constante para representar su variación en el tiempo. Se utilizan en el caso de las demandas de los nodos, alturas de los depósitos, programas de bombas, etc.

Finalmente, los controles son consignas que determinan cómo trabaja la red, especificando el estado de las tuberías seleccionadas, el nivel de agua en un tanque o las presiones de determinados puntos de la red.

3. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

En esta sección se presentan las diferentes herramientas informáticas utilizadas tanto para la simulación de los modelos de las redes de agua, como para la programación y desarrollo de metodologías a aplicar en las mismas redes.

3.1. EPANET

EPANET es un programa de simulación para el análisis del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de distribución a presión. EPANET se encarga de determinar el caudal circulante, presión, niveles de agua y concentración de componentes químicos en la red durante un determinado período de tiempo. Existen otros tipos de software dedicados al análisis de redes de agua, como Piccolo o Waterworks.

Sin embargo, todos estos simuladores ofrecen muchas limitaciones para la programación de funciones. Uno de los programas más utilizados en ingeniería automática para poder desarrollar y validar diferentes metodologías es el Matlab.

3.2. Matlab

Matlab es un lenguaje de computación técnico de alto nivel y un entorno interactivo para el desarrollo de algoritmos, visualización y análisis de datos, cálculo numérico, etc. La utilización de Matlab está abierta a muchas aplicaciones, desde procesamiento de señales e imágenes hasta el análisis financiero y biología computacional, pasando por diseño de sistemas de control y modelado de sistemas.

Con la disponibilidad del simulador EPANET y del software de cálculo Matlab, se requiere una herramienta que permita trabajar en un solo entorno aprovechando las funcionalidades de cada uno de los software anteriormente nombrados. Esta herramienta es la toolkit EPANET-Matlab.

3.3. Toolkit EPANET-Matlab

La toolkit es una DLL (Dynamic Link Library) que permite a los programadores personalizar el motor de cálculo de EPANET para sus propias necesidades. Esta herramienta se puede incorporar a cualquier aplicación de Windows que comprenda el lenguaje C/C++, Delphi Pascal o Visual Basic; o que sea capaz de hacer llamadas a funciones de una DLL, como es el caso de Matlab. Gracias a esta DLL es posible integrar todas las funciones propias de EPANET en otras aplicaciones, permitiendo así una mayor libertad para tratar y modificar los datos de la red.

Una vez se han conectado EPANET y Matlab, el usuario habitual del simulador se puede encontrar con la dificultad de desconocer el entorno de programación Matlab, de la misma forma que el usuario que domina Matlab puede carecer de altos conocimientos en redes de distribución de agua.

3.4. Interfaz gráfica desarrollada

Este artículo presenta una interfaz cuyo objetivo principal es facilitar el trabajo a todos los usuarios, ofreciendo un entorno gráfico donde el conocimiento de programación Matlab y de los detalles de redes de distribución de agua pasan a un segundo plano. Asimismo, ofrece muchas posibilidades tanto de desarrollo como de prueba de diferentes metodologías sobre redes complejas.

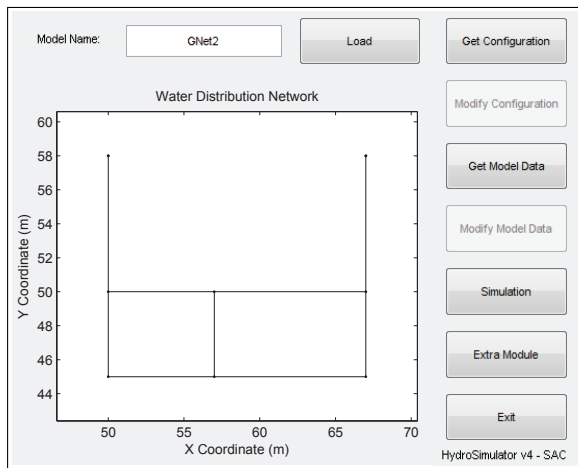


Figura 2: Interfaz del módulo de simulación

4. SIMULACIÓN

La interfaz desarrollada está formada por un conjunto de módulos independientes. El módulo principal incluye funciones para el análisis y simulación de la red. Desde este módulo es posible llamar a otros módulos, que a su vez pueden hacer uso de las funcionalidades de la interfaz principal. En la figura 2 se visualiza la interfaz del módulo de simulación y análisis.

El módulo principal permite obtener las características propias de los elementos de la red. El usuario puede generar de forma rápida una matriz que contiene los identificadores de todos los nodos, sus cotas, demandas, patrones de comportamiento asociados y sus tipos. De la misma forma se puede generar una matriz con las características propias de las ramas de la red: identificador, longitud, diámetro, rugosidad, estado y tipo. También es posible obtener los diferentes patrones de comportamiento.

Sin embargo, la función principal del módulo básico es la de realizar simulaciones. Indicando las condiciones de contorno de la red (presiones en las entradas y demandas en los nodos), el usuario puede obtener las medidas de presión y caudal en los sensores que se definan durante el período de tiempo deseado.

En la figura 3 se observa el resultado de una simulación con muestreo diez-minutal en la que se han medido las presiones de los seis nodos de la red de la figura 1, también disponible en la web.

Uno de los usos potenciales de este módulo (incluyendo pequeñas modificaciones) sería la monitorización de la red. La principal ventaja de la herramienta es la libertad de programación desde la línea de comandos de Matlab una vez se han al-

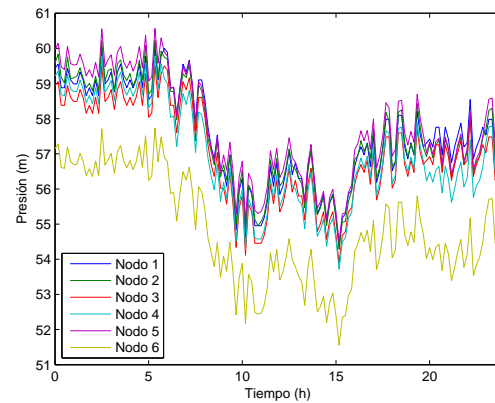


Figura 3: Presiones obtenidas en los 6 nodos de la red

macenado todos los resultados de las simulaciones en el espacio de trabajo, permitiendo su manipulación de forma fácil y rápida.

5. CONTROL DE PRESIÓN

Como ejemplo de las posibilidades que ofrece el benchmark se ha implementado un módulo de control de presión que permite mantener la presión de un nodo determinado en una consigna deseada. El actuador usado en este caso es una válvula de reducción de presión cuya entrada es la consigna aguas abajo. Estas válvulas (en el ejemplo hay dos) suelen aparecer en las entradas de los sectores de redes complejas. El control de presión es una práctica usada habitualmente para la reducción de fugas en redes [6]. Asignando una consigna de baja presión a la entrada se garantiza de forma simple la reducción de la presión en todo el sector. Sin embargo, para garantizar un servicio de calidad y debido a que la presión depende de la demanda en la red, en este benchmark se ejemplifica un control en lazo cerrado de la zona (nodo) más crítica del sector. La figura 4 representa el control aplicado.

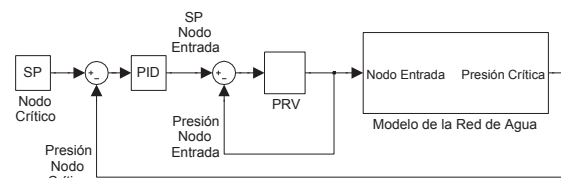


Figura 4: diagrama de bloques del control de presión

El sistema es estático y el comportamiento varía cuando varían sus entradas: condiciones de contorno (presiones) y demandas. El módulo de control de presión tiene, igual que el de simulación,

Simulation Data		Control Parameters	
Demand matrix:	demands	Controlled Node:	
PRV 1:	PRV1	Pressure Set Point:	
Vector with pressure SP 1:		<input type="checkbox"/> Control mean value of defined nodes	
PRV 2:	PRV2	<input checked="" type="checkbox"/> Control with PRV1	Ki 1: 1
Vector with pressure SP 2:		<input checked="" type="checkbox"/> Control with PRV2	Ki 2: 1
Initial Sample:	1	<input checked="" type="checkbox"/> Anti wind-up	
Final Sample:	24		
<input checked="" type="checkbox"/> Multivariable Control			
Multivariable Control			
Node controlled by PRV 1:	5	Node controlled by PRV 2:	6
Pressure Set Point 1:	53.75	Pressure Set Point 2:	51.55
Start		Close	

Figura 5: Interfaz gráfica del módulo de presión

una interfaz gráfica que podemos observar en la figura 5. En la parte izquierda se introducen los datos correspondientes a la simulación puesto que el benchmark trabaja con la simulación ejecutada en EPANET del sistema controlado desde Matlab. En la parte derecha se introducen las características del control a efectuar. En caso de marcar el control multivariable aparece un cuadro en la parte inferior para configurarlo. El benchmark y el material didáctico disponible está pensado para trabajar las siguientes estructuras de control:

- Control monovariable usando un actuador (PRV1 o PRV2) con un integrador
- Inclusión del antiwindup
- Control rango partido (usando ambas válvulas)
- Control multivariable

Inicialmente se decide realizar el control con un único actuador. Se escoge controlar la presión en el nodo más crítico, que es aquel cuya presión se observó mínima durante la simulación en lazo abierto (figura 3). Como consigna se elige la presión mínima que alcanzó, en este caso, el nodo 6: $P_{SP_6} = 51,55 m$. Se elige la válvula PRV2 como actuador puesto que es la más próxima, por lo cual el efecto será mayor. Como controlador se usa un integrador con el fin de eliminar el error. El sistema carece de dinámica y es el integrador quien la introduce. La constante unitaria del integrador significa que a cada muestra se añade a la acción de control el error anterior (ambas variables son metros). En la figura 6 se muestran los resultados de este control, donde se pueden observar dos fenómenos. Por un lado, durante la noche, debido a la influencia de la otra válvula, el actuador no puede reducir más la presión puesto que llega a

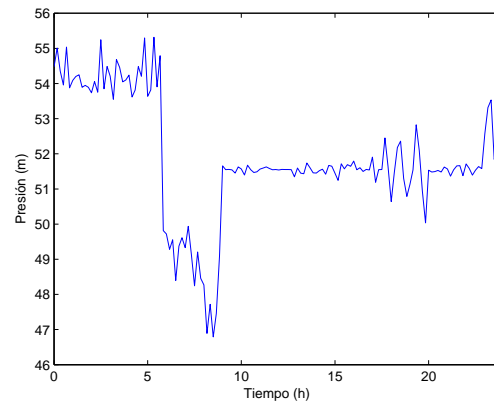


Figura 6: Presión en el nodo 6 aplicando control monovariable $P_{SP_6} = 51,55 m$ con PRV2 sin antiwindup

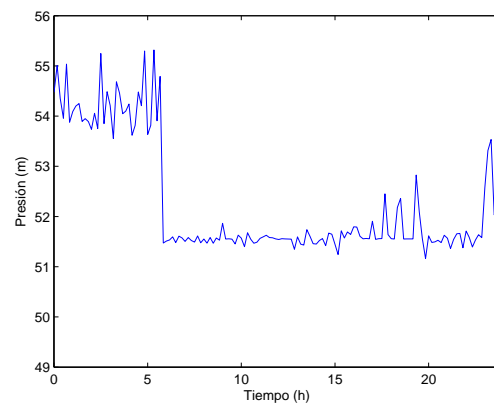


Figura 7: Presión en el nodo 6 aplicando control monovariable $P_{SP_6} = 51,55 m$ con PRV2 y antiwindup

su saturación (completamente cerrada). Además se observa que la presión cae al empezar el día (6 de la madrugada) pero no se corrige hasta pasar un tiempo demasiado largo, fenómeno relacionado con el windup.

En la figura 7 se observa que al introducir el antiwindup en el controlador la respuesta del control mejora. Obviamente la saturación sigue presente, pero no tiene un efecto pernicioso en el control una vez se ha entrado en la zona no saturada. Esta saturación es debida al efecto de la segunda válvula de la red (PRV1), que fija una presión más alta que la de la consigna, impidiendo que la presión pueda bajar en el nodo 6 debido al poco caudal nocturno.

Si se usan los dos actuadores disponibles con una estructura rango partido, compartiendo ambos actuadores la misma ley de control, el control mejora

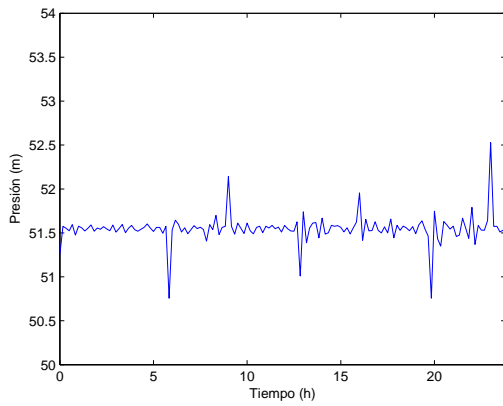


Figura 8: Presión en el nodo 6 aplicando control monovariante rango partido $P_{SP_6} = 51,55 \text{ m}$ con antiwindup

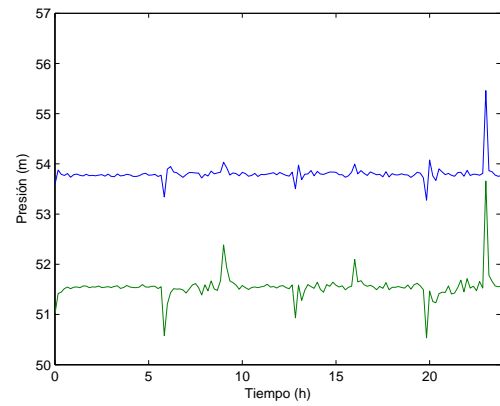


Figura 10: Presión en los nodos 5 y 6 aplicando control multivariable $P_{SP_5} = 53,75 \text{ m}$; $P_{SP_6} = 51,55 \text{ m}$ con antiwindup

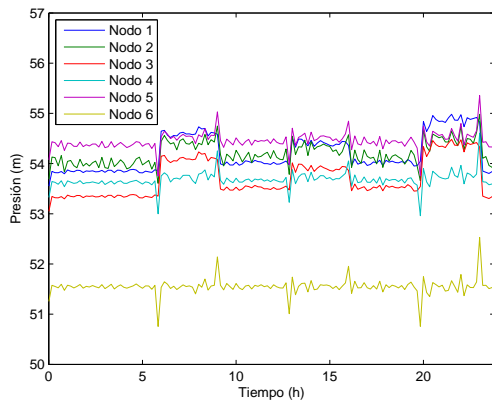


Figura 9: Presión en los seis nodos aplicando control monovariante rango partido en el nodo 6 $P_{SP_6} = 51,55 \text{ m}$ con antiwindup

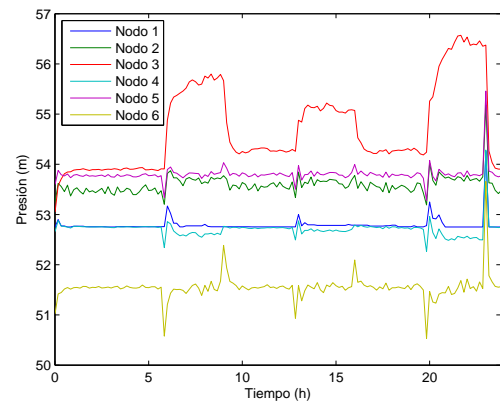


Figura 11: Presión en los seis nodos aplicando control multivariable $P_{SP_5} = 53,75 \text{ m}$; $P_{SP_6} = 51,55 \text{ m}$ con antiwindup

notablemente. En la figura 8 se observa un seguimiento perfecto de la consigna donde las perturbaciones debidas al cambio de las demandas (picos en el gráfico) se corrigen en la siguiente muestra (diez minutos).

Las presiones resultantes en los otros nodos de la red (figura 9) pueden obtenerse mediante el módulo de simulación, definiendo como consignas de las válvulas las acciones de control generadas en el módulo de presión.

Finalmente, el módulo de control permite controlar simultáneamente la presión en más de un punto de la red aprovechando que se dispone de dos actuadores. Se elige mantener el nodo más crítico ($P_{SP_6} = 51,55 \text{ m}$) mientras el nodo con presión máxima también se reduce a su presión mínima observada en el control anterior ($P_{SP_5} = 53,75 \text{ m}$). Se observa en la figura 10 como ambas presiones

se mantienen en la consigna deseada. El control es multivariable con dos lazos sin desacopladores. En la figura 11 se observa que a pesar de conseguir el seguimiento de las consignas el nodo 3 supera la presión del nodo 5, que anteriormente era el de máxima presión. Esto se debe a que el nodo 3 es el nodo de entrada a la red y asume las variaciones de presión debidas a los cambios de demanda.

No se ha implementado un control con desacopladores puesto que el acoplamiento entre ambos lazos si bien es fuerte no se contradice con la acción directa. Simplemente hay combinaciones de consignas imposibles.

Se propone como alternativa un control monovariante rango partido para controlar la presión media de los nodos 5 y 6 a la media de sus mínimos $P_{SP_{media_{5,6}}} = 52,65 \text{ m}$. El comportamiento de los nodos controlados es parecido al del control mul-

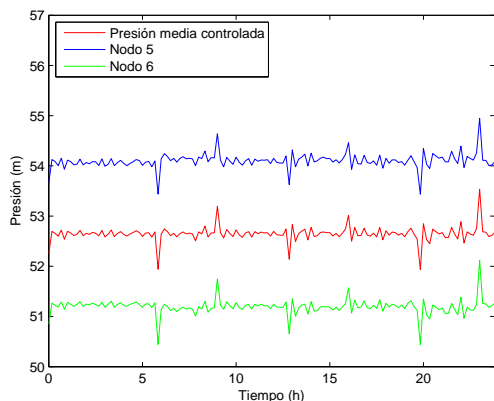


Figura 12: Presión en los nodos 5, 6, y media resultante aplicando control monovariante rango partido sobre el promedio de 5 y 6 $P_{SP_{media}} = 52,65 m$

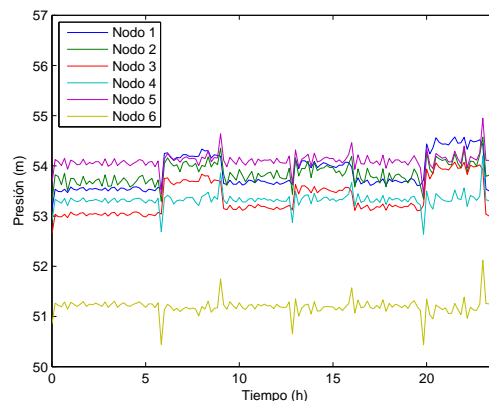


Figura 13: Presión en los seis nodos aplicando control monovariante rango partido sobre el promedio de 5 y 6 $P_{SP_{media}} = 52,65 m$ con antiwindup

tivariable, tal como se observa en la figura 12. Sin embargo, en la figura 13 se observa como el conjunto de presiones de la red es más homogéneo, ya que las variaciones de presión debidas a los cambios de demanda se absorben entre todos los nodos, evitando así presiones altas en el nodo 3.

6. CONCLUSIONES

Este artículo presenta una interfaz gráfica que combina la capacidad de simulación de redes de distribución de agua de EPANET con el potencial de programación y de cálculo de Matlab.

Se presentan el módulo principal, con el que se puede obtener información sobre los elementos de la red y realizar simulaciones de la misma; y un módulo extra que permite realizar diferentes estructuras de control de presión sobre uno o varios nodos de la red.

El potencial de la interfaz mostrada radica en la capacidad de programar módulos personalizados que puedan utilizar funciones ya incorporadas en el módulo principal, así como la libertad de trabajo sobre los resultados mediante el uso de comandos Matlab.

El autor del trabajo desarrollará diversos módulos extra durante el transcurso de su tesis doctoral.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado en parte por el proyecto de MINECO ref. DPI2011-2643 (SHE-RECS); y por la Universidad Politécnica de Catalunya.

Referencias

- [1] M. A. Bryds and B. Ulanicki. *Operational Control of Water Systems: Structures, Algorithms and Applications*. Prentice Hall International, 1994.
- [2] F. Nejjari, R. Pérez, V. Puig, J. Quevedo, R. Sarrate, M. Cugueró, G. Sanz, and J. Mirats. Abnormal quality detection and isolation in water distribution networks using simulation models. *Drinking Water Engineering and Science Discussions*, 5(1):435–453, Aug. 2012.
- [3] R. Pérez, V. Puig, J. Pascual, J. Quevedo, E. Landeros, and A. Peralta. Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks. *Control Engineering Practice*, 19(10):1157–1167, Oct. 2011.
- [4] L. Rossman. *EPANET 2 Users Manual*. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, 2000.
- [5] G. Sanz, R. Pérez, and R. Sánchez. Pressure Control of a Large Scale Water Network using Integral Action. In *IFAC Conference on Advances in PID Control*, Brescia, 2012.
- [6] M. Sterling and A. Bargiela. Leakage reduction by optimised control of valves in water networks. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 6(6):293–298, Oct. 1984.
- [7] T. Walski, D. Chase, D. Savic, W. Grayman, S. Beckwith, and E. Koelle. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Haestad Press, 2003.