

CONTROL DE COMPUERTAS DE DERIVACIÓN EN LA RED DE ALCANTARILLADO DE BARCELONA

LL. Ballester Rodés, J. Martí Marquès, M. Salamero Sansalvadó¹

RESUMEN: *Clavegueram de Barcelona, S.A. (CLABSA) ha implantado un control global optimizado de las compuertas que regulan la derivación de aguas del alcantarillado hacia la cuenca de Riera Blanca o hacia la cuenca de Diagonal-Barceloneta. Este control está realizado con la ayuda de un modelo de calibración continua, que permite aplicarlo de forma óptima. El modelo se basa en subdividir la red de alcantarillado en conjuntos conexos de colectores y sustituirlos por depósitos virtuales interconectados. Los parámetros del modelo no son estáticos sino que se recalculan en función de la información recibida por el sistema de telesupervisión en tiempo real.*

INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Barcelona existe una red de alcantarillado formada por 1.450 kilómetros de alcantarillas y colectores, 7 estaciones de bombeo y 3 compuertas, para evacuar y controlar las aguas residuales y pluviales. La ciudad tiene una población de 1.700.000 habitantes, distribuidos en una área de 98 Km². La pluviometría media, aunque es más bien baja (598 mm/año), presenta frecuentemente episodios de alta intensidad de precipitación típico de clima mediterráneo (Gutiérrez, 1995, Malgrat, 1992).

Para la supervisión y telemando de esta red, existe un sistema de telecontrol con 55 estaciones remotas, 22 pluviómetros y 39 limnímetros (Ballester, 1996). Dos de las compuertas están en la cámara de derivación situada en el subsuelo de la intersección de las calles Tarragona y Diputación. Las compuertas regulan el paso del agua, siendo su función la de derivar las aguas hacia la cuenca de Riera Blanca o hacia la cuenca de Diagonal-Barceloneta.

Estos reguladores tienen implementado un control que se ejecuta actualmente a dos niveles: a nivel local y a nivel del centro de control; éste último es el expuesto en el presente artículo. A nivel global permite un control optimizado operativo de las compuertas, con la ayuda de un modelo de calibración continua (MCC). La operación del control y regulación de estas compuertas se realiza con los objetivos de derivar las aguas residuales hacia la planta de tratamiento, y controlar las pluviales que circulan por ellas previniendo las inundaciones y las descargas del sistema unitario que se puedan producir.

Para decidir la estrategia a aplicar se debe conocer el comportamiento de la red, su estado, la lluvia en cada momento y las previsiones meteopluviométricas. Para ello, el Centro de Explotación de CLABSA

está dotado de un sistema de telecomunicaciones para hacer llegar los datos de los sensores (pluviómetros, limnímetros y estados de los actuadores) y un sistema de recepción meteopluviométrica (radar meteorológico, METEOSAT, NOAA, ...).

Para conocer el comportamiento de la red, existe una base de datos histórica que junto con un modelo hidrológico off-line (MOUSE), y el modelo MCC, permite decidir la estrategia a seguir en cada uno de los estados posibles de la red, y conseguir con ello un control optimizado de las compuertas de Tarragona-Diputación.

OBJETIVOS DEL CONTROL

El alcantarillado municipal tiene como principal objetivo evacuar y controlar las aguas residuales y pluviales de los núcleos urbanos para proteger la población, la ciudad y el medio ambiente. La Gestión Eficiente del Drenaje Urbano se presenta como una vía de actuación que se basa en la filosofía de la racionalización, integración y coordinación de todos los medios, herramientas y servicios disponibles. Dentro de ella hay que hacer hincapié en la explotación activa y controlada de la red de alcantarillado y de sus actuadores; ésta permitirá desencadenar distintas estrategias operacionales frente a episodios lluviosos o vertidos peligrosos.

Esta explotación se basa en técnicas de regulación hidráulica que posibilitan modificaciones de regímenes de caudales, reparto territorial de avenidas, aprovechamiento de las capacidades de la red e instalaciones existentes (bombeos, válvulas, compuertas...), evitando inundaciones y reduciendo los efectos de la contaminación medioambiental, y en una serie de tecnologías informatizadas que no sólo se basan en la informática sino también en las Comunicaciones, la Instrumentación, la Regulación y el Control.

¹ Clavegueram de Barcelona, S.A. (CLABSA), C. Acer, 16 - 08038 Barcelona e-mail: lluishb@clabsa.es

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.5 Num.4 (diciembre 1998), páginas 37-46, recibido el 3 de diciembre de 1997 y aceptado para su publicación el 24 de noviembre de 1998. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

La puesta en marcha de un control optimizado en los elementos de actuación sobre la red, hace necesario el desarrollo de una herramienta que permita el análisis del comportamiento hidráulico global del alcantarillado, y de las acciones de control y optimización, también globales, que se deseen realizar. Esta herramienta servirá para tomar las decisiones de explotación en tiempo real, tanto por operadores humanos como de forma automatizada, sobre la red de alcantarillado. Concretamente, CLABSA la ha diseñado e implementado, para optimizar el funcionamiento de las cuencas de Riera Blanca y de Diagonal-Barceloneta.

De forma sintetizada, la regulación desarrollada incorpora los siguientes elementos: medida de variables en distintos puntos de la red (lluvia y niveles en colectores), adquisición de datos en el centro de control, procesado y análisis de estos, decisión de las acciones a realizar por los actuadores (2 compuertas) en función de un modelo hidráulico calibrado continuamente en tiempo real, envío de las ordenes y presentación gráfica de los datos principales del control.

Para determinar las acciones a desarrollar por los actuadores, se usará un algoritmo de optimización del funcionamiento la red que aplique el macromodelo hidráulico y prediga los efectos de distintas estrategias de control aplicadas sobre las compuertas y, finalmente, decida cual es la estrategia que mejor distribuya los caudales por la red.

ESTRATEGIAS DE CONTROL

La red de alcantarillado de Barcelona es unitaria, es decir, que por sus conductos transporta tanto el agua residual como el agua de lluvia. Por tanto, se debe contemplar dos tipos de solicitaciones del sistema completamente diferentes. Un tipo de solicitación se produce en tiempo seco, con un comportamiento diario y semanal bastante determinado, y el otro tipo se produce en tiempo en lluvia, con un comportamiento temporal y espacial muy variable. Es evidente que cuando varíen las solicitaciones, los actuadores cambiarán sus estados, y pueden modificarse también los objetivos. Estos objetivos, en tiempo seco, serán diferentes de cuando haya lluvia fuerte. La estrategia de control se define como la secuencia de acciones de operación a realizar con la finalidad de conseguir los objetivos propuestos en la red de alcantarillado de la mejor forma posible.

Se deben distinguir dos niveles de control de la red de alcantarillado: control local y el control global. Se aplica uno u otro en función de la situación en que se encuentra el sistema. En tiempo seco y en los casos de fallo de comunicaciones entre el centro de control y la estación remota de las compuertas, el control se realiza a nivel local. Este control viene definido por unas consignas que tiene la propia instalación dadas a su regulador, que vendrán determinadas por los sensores principalmente niveles de colectores) existentes próximos a la instalación. Estas consignas han sido fijadas en función del conocimiento que se tiene del sistema (base de datos histórica y modelo matemático off-line).

En tiempo de lluvia el control se realiza a nivel global. En el control global, las consignas de cada uno de los reguladores son determinadas en función de toda la información recibida en el centro de control (niveles de colectores, lluvia registrada, previsión de lluvia a corto y medio plazo,...) y enviadas a cada uno de los reguladores. Por tanto los reguladores son controlados en función de los sensores, tanto locales como remotos a ellos. Las ventajas del control local son que el controlador es más rápido y más seguro (no hay errores de comunicación). Las ventajas del control global, son que las decisiones se pueden tomar teniendo en cuenta el funcionamiento de toda la red, y las estrategias de regulación se pueden iniciar en el mismo momento en todas las cuencas.

IMPLANTACIÓN DE LA REGULACIÓN GLOBAL MODELIZADA

Implementación del modelo, del ajuste y del control

Modelización

El modelo hidrológico-hidráulico utilizado para simular el funcionamiento del proceso lluvia-escorrentía-propagación, de la parte de la red de alcantarillado relacionada con el control optimizado de las compuertas de regulación-desvío, debe cumplir los condicionantes (Martí, 1994):

a. Sencillez:

Hay que utilizar el enfoque más simple que sea útil a la finalidad exigida, en este caso el análisis del comportamiento enfocado al control y optimización operativa.

b. Globalidad

El análisis utilizado debe permitir fácilmente la ampliación de la parte de red modelizada: el control optimizado operativo se apoyará en el intercambio hídrico entre cuencas, y será necesaria una modelización conjunta de las mismas.

c. Velocidad

La velocidad de cálculo debe ser la necesaria para permitir una operación en tiempo real.

d. Flexibilidad

La herramienta de análisis debe ser adaptable a los diferentes tipos de actuadores y a las distintas tipologías que ésta pueda presentar.

e. Refinamiento progresivo

El modelo debe estar construido de tal forma que, si los resultados de una fase inicial no se ajustan suficiente a la realidad, sea fácil proceder a un refinamiento incluyendo más parámetros calibrables, y por lo tanto más grados de libertad en aras de un mejor ajuste.

f. Calibrabilidad

Debe contemplar explícitamente a los instrumentos de medida telesupervisados (principalmente pluviómetros y limnómetros), de tal forma que se pueda ajustar en función de sus datos. Una calibración adaptativa en tiempo real aportará dos importantes ventajas: un mejor seguimiento instantáneo del proceso y la posibilidad de uso de un enfoque más simple de modelo, que debido a que sus parámetros de calibración son variables en tiempo real, se ajuste a situaciones complejas.

g. Resolubilidad

La metodología a utilizar debe apoyarse en un cuerpo doctrinal y unos algoritmos suficientemente probados en el campo del control automático.

h. Optimabilidad

El análisis utilizado debe permitir la optimización de las acciones de regulación sobre el sistema desde diferentes vertientes. Por ejemplo minimizando el riesgo de inundaciones, o maximizando el almacenamiento en tiempo de lluvia para una posterior depuración, etc.

El modelo finalmente adoptado se centra en subdividir la red de alcantarillado agrupando conjuntos conexos de colectores y sustituyéndolos por depósitos virtuales interconectados. En cada instante de tiempo los volúmenes almacenados representan el volumen de agua contenida en el interior de la red asociada al depósito, y se calcularán en función del agua de lluvia caída en la zona representada por él, y de los caudales intercambiados con los depósitos virtuales vecinos y conectados a él. Los caudales salientes de los depósitos se suponen lineales respecto al volumen almacenado en los mismos. Llamando q al caudal de salida de un depósito de volumen V , se tendrá:

$$q = c \cdot V \tag{1}$$

siendo c un coeficiente de proporcionalidad dependiente del depósito virtual y de la salida. La simplificación que supone tomar el caudal como función lineal del volumen conlleva una sencillez de trabajo matemático, por otro lado, las carencias de esta formulación se ven suplidas por el hecho que el coeficiente de proporcionalidad se va adaptando a la situación real en el tiempo.

Asimismo si S es la superficie de una cuenca asociada, I es el volumen de agua de lluvia introducida en un depósito virtual en un intervalo de tiempo, e i es la intensidad media de lluvia durante ese período, se tendrá:

$$I = e \cdot \Delta t \cdot \sum iS \tag{2}$$

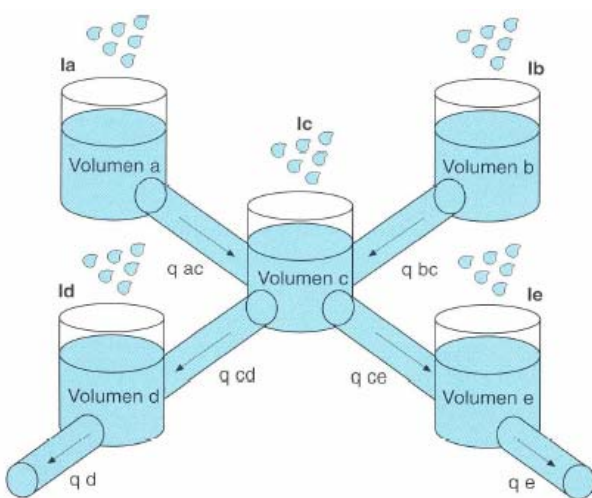


Figura 1. Ejemplo de modelización de un grupo de cuencas

siendo e el coeficiente que relaciona para cada depósito, la lluvia bruta con la lluvia neta realmente introducida en las alcantarillas, y Δt el intervalo de tiempo considerado. El sumatorio se utiliza para integrar las intensidades de lluvias de los distintos pluviómetros instalados en el área de influencia de cada depósito virtual, asociando a cada uno de ellos un área calculada por el método tradicional de los polígonos de Thiessen (Waniclista, 1978). Estableciendo los correspondientes balances de masa en cada uno de los depósitos virtuales interconectados, entre las entradas de agua de lluvia, las provenientes de otros depósitos, y las salidas hacia otros, se llega a formular:

$$\vec{V}_{t+\Delta t} = \vec{V}_t + e_t \cdot \vec{SI}_t \cdot \Delta t + K_t \cdot \vec{V}_t \cdot \Delta t \tag{3}$$

$$\vec{h}_t = \vec{Kd}_t \cdot \vec{V}_t \tag{4}$$

Donde \vec{V}_t son los vectores cuyos elementos son los volúmenes de los depósitos virtuales, e_t es una matriz diagonal que contiene los parámetros e_t , \vec{SI}_t es un vector cuyos elementos corresponden a los sumatorios de los productos de las superficies por las intensidades de lluvia, K_t , es una matriz que contiene combinaciones lineales de los coeficientes c , \vec{h}_t es un vector que contiene los niveles calculados en los puntos de medida, y \vec{Kd}_t es una matriz que contiene los coeficientes que relacionan los volúmenes virtuales con los niveles en los colectores de interconexión, a través de una linealización de la fórmula de Manning y del uso de la relación de proporcionalidad entre los volúmenes V y los caudales q (Metcalf y Eddy, 1985).

La ecuación expuesta para \vec{V} es una ecuación matricial de diferencias de primer orden, que permite de una forma interactiva calcular \vec{V} a lo largo del tiempo, y conocido \vec{V} calcular también \vec{h} y \vec{q} (vector de caudales).

Esta formulación cumple las condiciones expuestas en este apartado, y es análoga a la clásica descrita en los textos de teoría de control con un enfoque de variables de estado.

Calibración automática y adaptativa

La esencia e interés del modelo descrito es que se trata de un MCC; es decir, sus parámetros no son estáticos sino que se recalculan en función de la información en tiempo real que el sistema de telesupervisión va proporcionando.

Concretamente, la comparación en tiempo real de los datos limnimétricos de niveles telesupervisados con los valores predichos por el modelo, junto con los valores pluviométricos en tiempo real también telesupervisados, permite una recalibración continua en tiempo real del mismo.

Un modelo calibrado continuamente se adapta mejor a las circunstancias cambiantes y es capaz de responder favorablemente a episodios que no se habían dado con anterioridad. Asimismo suple con su evolución paramétrica, a su sencillez intrínseca, que por otra parte le proporciona la necesaria velocidad de ejecución para integrarse en un lazo de control en tiempo real.

El proceso de calibración automático consiste en la minimización de un valor representativo de la bondad de la misma. Para ello se escoge la suma extendida a todos los instantes de tiempo y a cada uno de los limnómetros de medida, de las diferencias al cuadrado entre los valores de nivel realmente medidos y los calculados mediante el modelo. La minimización de este valor conducirá a la obtención de los parámetros del modelo en cada instante de tiempo.

Aunque el modelo es formalmente lineal, al utilizarlo para evaluar en el futuro el comportamiento de la red, la ecuación definitoria se itera sobre sí misma sucesivamente. Como consecuencia de ello el cálculo del mínimo del valor expuesto realizado por los procedimientos habituales de derivación parcial e igualación a 0, conduce a un sistema de ecuaciones no lineal, mal condicionado, y difícilmente resoluble.

La solución hay que buscarla en la evaluación numérica del valor a minimizar, y en la búsqueda por técnicas matriciales numéricas iterativas de los parámetros de calibración que lo minimizan. Las técnicas utilizadas son variantes del método del gradiente conjugado, en el cual avanzando paso a paso desde un conjunto inicial de parámetros, se llega a un conjunto final de los mismos que minimizan el valor expuesto. En cada paso se aproximan linealmente las derivadas parciales involucradas y se incrementa el vector de parámetros en la "dirección" del vector gradiente del valor expuesto con relación a los parámetros buscados (Danby, 1988).

Este proceso numérico es suficientemente rápido y convergente para poder ser utilizado de forma práctica.

Cada 5 minutos el sistema de telesupervisión del alcantarillado de Barcelona envía al centro de control un nuevo conjunto de datos pluviométricos y limnimétricos, y en cada una de estos intervalos se repite todo el proceso descrito para calcular así un nuevo conjunto de parámetros de modelización.

Control óptimo

Para plantear un problema de control óptimo son necesarios los siguientes pasos: modelar el sistema, determinar un criterio de evaluación del comportamiento de éste, determinar un estado inicial y establecer una condición sobre el estado final. El primer paso es el que se acaba de describir en el apartado anterior, la exposición se centra, a continuación, en los siguientes pasos:

El objetivo del Control óptimo es encontrar las acciones a desarrollar por los actuadores, en este caso las dos compuertas de las que se dispone, que mejor efecto tengan sobre el funcionamiento la red. Por ello hace falta establecer un criterio de evaluación de este "mejor efecto sobre el funcionamiento de la red" mediante una/s función/es criterio.

Una vez establecidas estas funciones, para poder decidir las estrategias de regulación a seguir, se simulará la evolución del sistema en un cierto intervalo de tiempo escogido por el usuario y del orden del tiempo de concentración de las cuencas del modelo (15 minutos), a partir de las ecuaciones de estado del sistema encontra-

das en la fase de modelización. Esta simulación se efectuará probando distintas tácticas de movimiento de las compuertas, escogiendo la que minimice la o las funciones de optimización a lo largo del periodo de cálculo.

En la aplicación que se presenta, la función a tener en cuenta es la que definimos como Margen de vertido y es objetivo del control maximizarlo. Éste indicador viene dado por la posibilidad de vertido en los colectores, que es la diferencia entre la cota absoluta de la calle (z) y el nivel absoluto de la lámina de agua en un colector (h) en un mismo punto (x,y) de la red. Es una función matemática que da idea del riesgo de inundación de un determinado punto de la ciudad. Entonces, minimizar el riesgo equivaldrá a encontrar los valores del Margen de vertido en distintos puntos de la ciudad y para distintas estrategias de movimiento de las compuertas simuladas, y escoger la estrategia que de una diferencia máxima entre las dos cotas en el colector más crítico, durante un determinado periodo de cálculo:

$$\begin{aligned} \text{MÁXIMO } \{ & \text{mínimo } [(Cota\ absoluta\ calle\ (x_1, y_1) - h_1 \\ & \text{absoluta\ medida\ al\ colector)}, \dots \\ & (Cota\ absoluta\ calle\ (x_n, y_n) - h_n\ absoluta \\ & \text{medida\ al\ colector)}]_{Estrategia\ 1, \dots, P} \\ & \text{mínimo } [(Cota\ absoluta\ calle\ (x_1, y_1) - h_1 \\ & \text{absoluta\ medida\ al\ colector)}, \dots, \\ & (Cota\ absoluta\ calle\ (x_n, y_n) - h_n\ absoluta \\ & \text{medida\ al\ colector)}]_{Estrategia\ P} \} \end{aligned} \quad (5)$$

Simulación del modelo, ajuste y validación del control

Herramientas utilizadas

Para probar y verificar el diseño del modelo y su ajuste, y validar el sistema de control a implementar en el centro de explotación de CLABSA, desarrollado de forma teórica en el anterior apartado, se ha optado para construir un simulador del modelo de la red y de su control que, a partir de los datos medidos en los sensores de las cuencas del modelo en episodios lluviosos históricos, opere tal y como lo haría el centro de control con una lluvia real. La herramienta de programación utilizada ha sido el MATLAB, ya que es un paquete que permite programar de forma sencilla, que dispone de potentes utensilios matemáticos y está destinado, entre otros, al campo del control y la simulación (Mathworks, 1994).

El modelo

Aplicando el análisis desarrollado anteriormente al tramo de red al que se hace referencia en este artículo, y en función del análisis topológico e instrumental de la zona (PECLAB, 1997) se ha decidido modelar, en una primera aproximación, la subcuenca de entrada a la sala de compuertas con un depósito virtual y cada una de las subcuencas de salida con otro depósito, disponiendo de un sensor de nivel (L) a la salida de cada depósito. Concretamente las subcuencas a tratar son:

- Subcuenca 6-F o depósito virtual 18, situada aguas arriba de la sala de compuertas y que es la que aportará el caudal de entrada a la cámara. Comprende una superficie de 2.323.099 m².

- Subcuenca 4-D o depósito virtual 7, situada aguas abajo de la compuerta 1 y que recibe la parte de caudal desviado por el caudal de la compuerta. Comprende una superficie de 1.383.077 m².
- Subcuenca 6-A o depósito virtual 13, situada aguas abajo de la compuerta 2 y que recibe la parte de caudal desviado por el caudal de la compuerta. Comprende una superficie de 1.625.438 m².

Los sensores de nivel a incluir en el modelo son los dos limnímetros lejanos a la cámara de compuertas existente situados en Gran Via-Amadeu Oller (L07) y Gran Via-Aribau (L08), y un tercero próximo a las compuertas situado en el colector de la calle Tarragona (L56). En lo que refiere a los sensores de lluvia, éstos son los 7 más próximos a las cuencas (Figura 2).

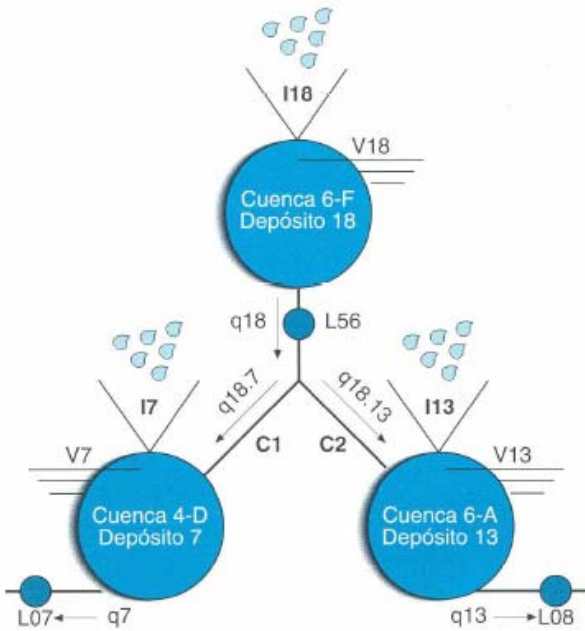


Figura 2. Modelo de las cuencas afectadas

Entonces puede plantear las ecuaciones del modelo construidas tal y como se explicó anteriormente:

- a. Volumen de lluvia que contribuye como caudal de entrada a la red:

$$\begin{aligned}
 \text{Depósito 18} : I18 &= \left(\sum_{18,i} i_i S_i \right) \cdot e_{18} \\
 \text{Depósito 13} : I13 &= \left(\sum_{13,i} i_i S_i \right) \cdot e_{13} \\
 \text{Depósito 7} : I7 &= \left(\sum_{7,i} i_i S_i \right) \cdot e_7
 \end{aligned} \tag{6}$$

Con: I_{18}, I_{13}, I_7 es el volumen de lluvia que contribuye como entrada a la red de las citadas cuencas;

i_i es la intensidad de lluvia;

S_i es la superficie de cuenca a la que se asigna una determinada intensidad;

e_7, e_{13}, e_{18} son unos coeficientes que representan la transformación lluvia a agua pluvial que entra a la red (lluvia neta).

Cabe notar que las intensidades de lluvia se han obtenido, asignando a cada punto de la cuenca el pluviómetro que más próximo tenga según el método de los polígonos de Thiessen.

En el caso que no se tengan datos del pluviómetro asignado a uno de los polígonos, se tomarán los del segundo pluviómetro más próximo y así sucesivamente hasta que no se pueda asociar ningún pluviómetro, momento en el que no se podrá realizar el ajuste del modelo.

Además, se supondrá que estas intensidades se mantienen constantes durante cada uno de los períodos de cálculo, aunque, si en un futuro se mejoran las predicciones pluviométricas con radar meteorológico, se puede pensar en introducirlas al sistema.

- b. Intercambios hídricos (o conexiones) entre cuencas:

$$\text{Depósito 18 - Depósito 7} : q_{18,7} = C_{18,7} V_{18} \tag{7}$$

$$\text{Depósito 18 - Depósito 13} : q_{18,13} = C_{18,13} V_{18}$$

- c. V_{18} es el volumen asignado al depósito ficticio que modela la cuenca 6F

- d. $C_{18,7}$ y $C_{18,13}$ son unos coeficientes que dependen, entre otros, de la posición de las compuertas.

- e. Salidas:

$$\text{Depósito 18} : q_{18} = A_{18} V_{18} = (C_{18,7} + C_{18,13}) V_{18}$$

$$\text{Depósito 7} : q_7 = A_7 V_7$$

$$\text{Depósito 13} : q_{13} = A_{13} V_{13} \tag{8}$$

- V_{18}, V_7, V_{13} es el volumen asignado a los depósitos ficticios que modelan la cuenca 6-F, 4-D y 6-A

- A_{18}, A_7, A_{13} son coeficientes que representan la dependencia de los caudales de los colectores en función de los volúmenes virtuales de los depósitos.

- Al disponer de sensores de nivel y no de caudal, se debe emplear una transformación de q a h , por ello se ha linealizado la fórmula de Manning obteniendo un factor de transformación M , específico para cada colector.

Entonces si planteamos el balance de masas se obtiene la siguiente ecuación de estado del sistema:

$$\begin{pmatrix} V_7 \\ V_{13} \\ V_{18} \end{pmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} V_7 \\ V_{13} \\ V_{18} \end{pmatrix}_t + \underbrace{\begin{bmatrix} e_7 & 0 & 0 \\ 0 & e_{13} & 0 \\ 0 & 0 & e_{18} \end{bmatrix}}_e \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \sum_{7,i} i_i S_i \\ \sum_{13,i} i_i S_i \\ \sum_{18,i} i_i S_i \end{pmatrix}}_{\bar{I}} \cdot \Delta t + \tag{9}$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} -A_2 & 0 & C_{18,7} \\ 0 & -A_{13} & C_{18,13} \\ 0 & 0 & -C_{18,7} - C_{18,13} \end{bmatrix}}_k \begin{pmatrix} V_7 \\ V_{13} \\ V_{18} \end{pmatrix}_t \Delta t$$

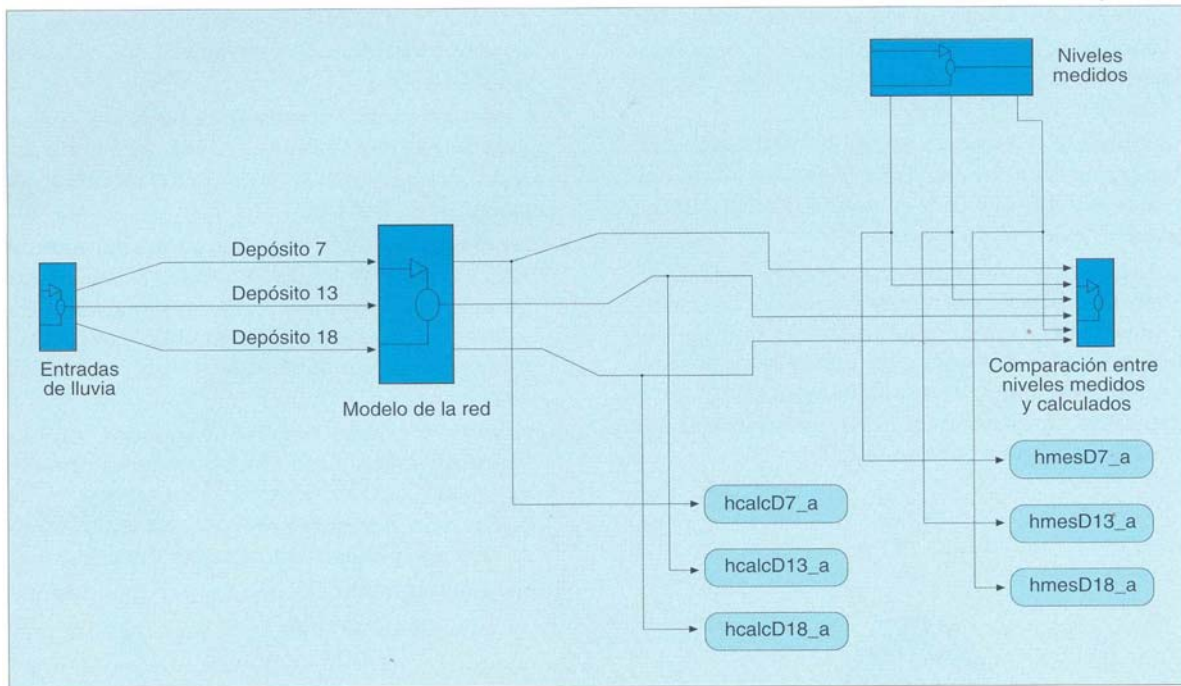


Figura 3. Esquema de bloques del simulador

y la ecuación de salidas:

$$\begin{pmatrix} h_7 \\ h_{13} \\ h_{18} \end{pmatrix}_t = \underbrace{\begin{pmatrix} A_7 & 0 & 0 \\ M_7 & & \\ 0 & A_{13} & 0 \\ & M_{13} & \\ 0 & 0 & A_{18} \\ & & M_{18} \end{pmatrix}}_{Kd} \cdot \begin{pmatrix} V_7 \\ V_{13} \\ V_{18} \end{pmatrix}_t \quad (10)$$

o de forma compacta, como ya se vio en las ecuaciones 3 y 4, donde \bar{e}_t, \bar{K}_t y $\bar{K}d_t$, son las matrices a calibrar con los datos aportados por los sensores del modelo.

Para implementar en el simulador el modelo que se acaba de describir, éste se ha dividido entre módulos: el de las *entradas de lluvia en las cuencas*, el de las *ecuaciones de la dinámica* que la caracterizan (modelo de la red) y el de las *salidas de niveles en los colectores*; estas se irán comparando con los niveles reales medidos por los sensores, para realizar luego, en la fase de ajuste, el cálculo de los mejores parámetros para el modelo, tal y como se ve en la Figura 3.

El ajuste o calibración continua y adaptativa

Una vez implementado el modelo mediante un sistema de bloques, se debe proceder a realizar un ajuste entre los datos reales proporcionados por los sensores y los datos calculados aplicando las entradas de lluvia al modelo. De forma gráfica, en la Figura 4 se muestra el proceso de ajuste integrado dentro de la regulación global.

Para determinar los valores iniciales de los parámetros del modelo al iniciar la simulación, se estudió un episodio lluvioso importante y, de la relación entre los volúmenes traspasados entre cuencas y los volúmenes de lluvia

caída en cada una de ellas, se encontraron estos parámetros iniciales. Con tal de probar estos parámetros, se paso algún episodio lluvioso por el programa de simulación utilizando el modelo a parámetros constantes, se vio que el resultado era bastante bueno y por ello se tomaron como válidos estos valores iniciales.

El siguiente paso, tal y como se ha explicado, consiste en encontrar en cada instante de tiempo, los mejores parámetros de las matrices del sistema que aproximan el modelo a la realidad y realizándolo de forma continua y automática. Consiste pues, en encontrar los valores de las matrices \bar{K} , $\bar{K}d$ y \bar{e} a partir de las diferencias entre los hidrogramas de caudal calculados y los medidos.

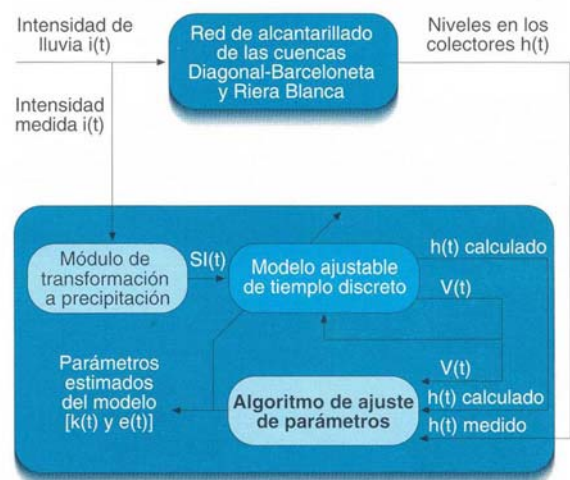


Figura 4. Esquema del proceso de ajuste

Los niveles a comparar son los de salida de los tres depósitos del modelo que vienen dados por los limnímetros L07, L08 y L56. Estas matrices se recalculan periódicamente y utilizando los datos discretizados de n instantes anteriores parametrizables. El valor de n usado es 5. Lo que hace que el periodo de ajuste sea de 30 minutos. Tomar menos instantes implica una pérdida de información histórica importante, y tomar más demasiada variación temporal teniendo en cuenta la dinámica de la pluviometría en Barcelona.

La metodología de ajuste consiste en ir aproximando de forma iterativa el valor de los parámetros mediante el método del gradiente ya descrito: se tienen 7 parámetros a determinar y en cada instante de tiempo se miden tres niveles, uno en cada limnómetro, por lo tanto se necesita un mínimo de tres medidas en distintos instantes de tiempo para que el sistema sea resoluble. Se sale del bucle de ajuste cuando el error máximo en el cálculo de niveles está por debajo una tolerancia escogida por el usuario o bien por que se ha superado un número máximo de iteraciones, en este último caso se reinicia el ajuste con los parámetros de partida. Definiendo X como el vector de los parámetros a determinar se tiene:

$$X = X_{inicial} + x$$

$$x = (J^T \cdot J)^{-1} \cdot J^T (h_{observado} - h_{calculado}) \quad (11)$$

Siendo J la matriz Jacobiana de derivadas parciales.

Una vez realizado el ajuste en un determinado instante de tiempo, se substituyen estos en las matrices del sistema y se simula hacia delante manteniendo como entrada de lluvia el ultimo valor recibido en el centro de control. Con ello se obtiene una predicción de como van a evolucionar los niveles de salida de cada uno de los depósitos virtuales de cada cuenca.

Resultados obtenidos

Para validar este modelo y su ajuste, se han analizado varios episodios lluviosos históricos; éstos han estado agrupados según su incidencia en los colectores en tres grupos: los de grandes, medios y pequeños hidrogramas. Se han pasado dos episodios de cada grupo y los resultados se han comparado con los valores reales: se han hecho comparaciones con las predicciones a 5 minutos vista y los valores que realmente se dieron y en este caso los resultados son esperanzadores. También se ha comparado las simulaciones a 15 minutos vista y, del análisis del error en el punto más crítico, se deduce que las predicciones empeoran en este caso, de todos modos, al reajustar el modelo cada 5 minutos este error se va corrigiendo.

En la Figura 5 se muestran los resultados del simulador al pasar el episodio del 17/04/96:

Control óptimo

Ya implementados y probados el modelo y su ajuste, se debe pasar a la fase de escoger la estrategia que optimice el funcionamiento de este tramo de red. En este caso, optimizar consiste en minimizar el riesgo de inundación urbana durante un episodio lluvioso. Para determinar este riesgo, se dispone de los dos sensores de aguas abajo de las compuertas, uno en cada ramal, que nos permiten saber el nivel de llenado de cada uno de ellos para entonces poder actuar distribuyendo los caudales lo mejor posible, probando distintas estrategias de posiciones de las compuertas.

La forma de realizar esta prueba, en cada instante de tiempo, es simular con el modelo aplicándole los parámetros calculados en cada instante y analizar el resultado a unos 15 minutos vista —en los niveles a los colectores de salida— de distintas posiciones de compuertas. Se escogerá, de los valores más críticos en cada una de las estrategias probadas, el menos crítico; es decir, se hace un *maxmin*. Cada posición de compuerta implica un cierto reparto del volumen de la cuenca superior, debido a la tipología actual de la cámara no es posible regular todo el volumen recogido en ella, ya que actualmente una parte es directamente desviada hacia depuración. Con ello se tiene que el volumen regulable por las compuertas es del 21%.

Por el momento se han discretizado las posiciones de las compuertas en 9, y manteniendo siempre una de abierta para asegurar siempre la evacuación del agua, de todos modos éstos pueden ser fácilmente ampliables.

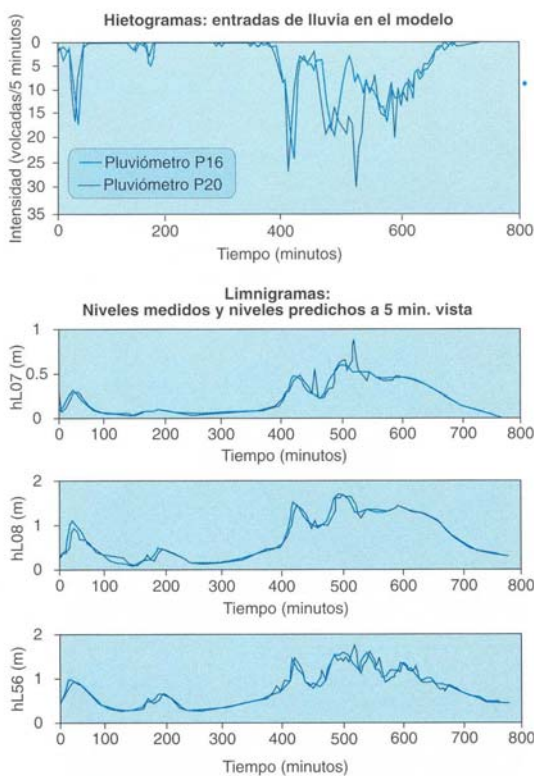


Figura 5. Entradas de lluvia en el modelo utilizando 2 pluviómetros y salidas del modelo en cada colector comparando los niveles medidos con los predichos a 5 minutos vista

Gráficamente el cálculo consiste en:

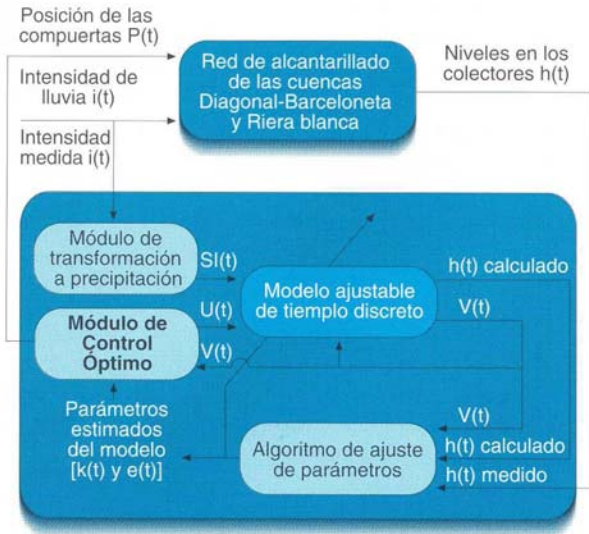


Figura 6. Esquema del proceso de optimización

Para hacernos una idea de la situación de este módulo de optimización dentro del proceso global como se muestra en la Tabla 1 a pie de página.

En este caso, para validar el control, no se disponen de datos reales para comparar con las predicciones, ya que las estrategias probadas nunca se llevaron a término. Ya que no se dispone de ningún modelo a escala de la red o canal experimental, lo que se propone es comparar los efectos de la estrategia escogida con los de otro modelo de simulación ya existente y suficientemente consolidado. En CLABSA se dispone del MOUSE, un paquete del Danish Hydraulic Institute (DHI,1996).

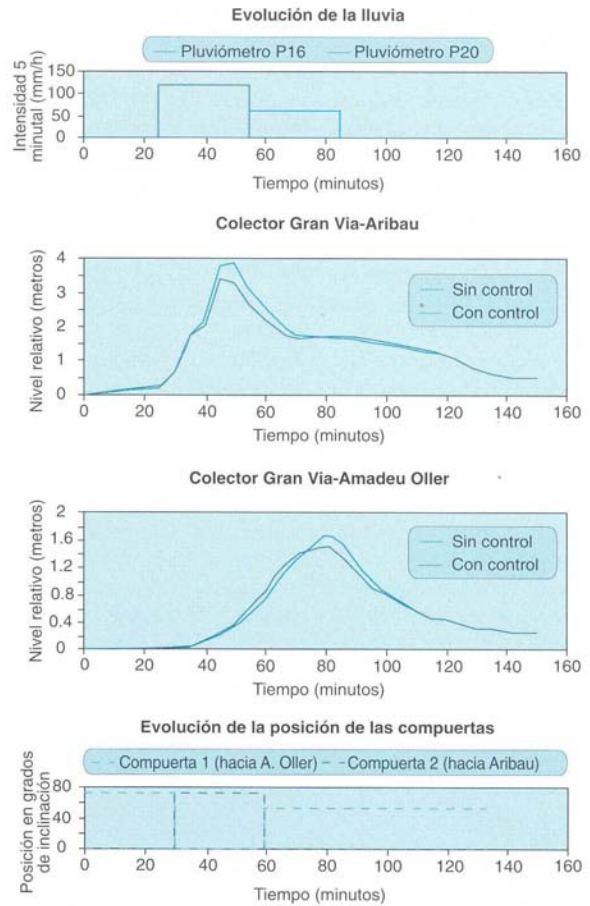


Figura 7. Comparación de resultados sin control y con control

| Estrategias | L07 | L08 | mínimo | máximo |
|-------------|-------------------|-------------------|-----------|------------------------------|
| 1 | <p>hidrograma</p> | <p>hidrograma</p> | L07 estr1 | Estrategia 2 Limnómetro 8 |
| 2 | <p>hidrograma</p> | <p>hidrograma</p> | L08 estr2 | |
| ... | ... | ... | ... | |
| P | <p>hidrograma</p> | <p>hidrograma</p> | L08 estrP | ... |

Tabla 1. Ejemplo de un cálculo de optimización

De forma esquemática la evolución de las estrategias de control fue la siguiente:

1. Se inicia el control con la estrategia (C1:75°,C2:0°): la compuerta que desvía el agua hacia Gran Via-Amadeu Oller permanece cerrada y la de Aribau abierta.
2. Al minuto 5 la estrategia que decide el control es (C1 :0°,C2:75°): debido al inicio del episodio de lluvia los niveles alcanzados en el colector de Aribau son tan altos que este punto pasa a ser el más crítico y, por tanto, se cierra la compuerta que le aporta agua y se abre la que las desvía hacia Amadeu Oller (Pl. España).
3. Al minuto 40 la estrategia decidida por el control es la (C1 :53°,C2:0°): ha dejado de llover en la cuenca del colector de Aribau y ha empezado a llover en la de Amadeu Oller, se abre de nuevo el paso hacia el colector de Aribau y se cierra el de Amadeu Oller (Pl. España).
4. Finalizada la lluvia las compuertas ya no realizan más movimientos, ya que la estrategia actual es óptima.

Como se aprecia en la figura, el control aplicado permite reducir las puntas de los hidrogramas, en el caso de Gran Via-Aribau en casi 1 metro y en el de Gran Via-Amadeu Oller en unos 0,30 metros. Se prevé que con las modificaciones en los colectores de entrada a la cámara de compuertas se reciban nuevas aportaciones y por tanto se pueda actuar sobre más volumen de agua y reducir todavía más las puntas de nivel.

Implementation en el centro de control

Una vez validado el modelo y el control se ha procedido a implementarlo en el centro de control de CLABSA. Para ello se ha desarrollado un programa en C (Press, 1995), llamado GLOTAR, que trabaja en conexión el software básico de control y adquisición de datos SCADA del sistema de telecontrol para recibir y enviar información de las estaciones remotas. El programa GLOTAR lee y procesa los datos que llegan al centro procedentes de los sensores del modelo, y calcula y da las consignas para que sean comunicadas a la estación remota de la cámara de compuertas. Todo ello, evidentemente en tiempo real. El proceso es el que se encuentra reflejado en la *Figura 8*.



Figura 6. Esquema de la implementación del sistema en el centro de control

El programa GLOTAR engloba distintas funciones:

- El control global se activa al detectarse lluvia en alguno de los pluviómetros de modelo y siempre que el usuario lo desee, una vez activado se deben cumplir una serie de seguridades: buen estado de las comunicaciones, ninguna alarma importante activa en la sala de compuertas, etc... si todo esto se cumple se puede proseguir con el control; en caso de detectarse algún fallo automáticamente se sale del control y se vuelve a reintentar al cabo de un tiempo prudencial.
- La adquisición y verificación de los datos de los distintos sensores que llegan al centro.
- El procesado de los datos pasando el modelo, haciendo el ajuste y simulando con las distintas estrategias de las compuertas escogiendo la óptima.
- Finalmente, una vez decidida la estrategia, el envío de ésta hacia la estación remota que ejecuta las órdenes.

En la estación remota de las compuertas se ha introducido un sistema de seguridad que en caso de fallo de recepción de las consignas enviadas desde el centro de control, el control es cedido automáticamente al realizado por la propia remota (control local). Hay que destacar también que las consignas enviadas desde el centro de control son ejecutadas y supervisadas por la propia remota, para conseguir el máximo nivel de seguridad.

CONCLUSIONES

La implantación de un control global optimizado de unas compuertas de derivación en la red de alcantarillado de Barcelona, permite una regulación de forma automática y rápida, con conocimiento del estado y del comportamiento de la red.

Este tipo de control se podrá aplicar de forma generalizada a los reguladores existentes en la red (grandes depósitos enterrados de regulación, compuertas de retención, etc.).

Esta implantación corresponde a la etapa progresiva de telerregulación del alcantarillado, posterior a una primera etapa en la cual el objetivo básico era el conocimiento de la red, es decir la telesupervisión.

El modelo utilizado en este control cumple los condicionantes de sencillez, globalidad, velocidad, flexibilidad, refinamiento progresivo, calibrabilidad, resolubilidad y optimabilidad necesarios para simular el funcionamiento del proceso lluvia-escorrentía-propagación de la red de alcantarillado.

Este modelo MCC deberá validarse con el modelo offline de la red de alcantarillado, que está actualmente calibrado con las informaciones históricas registradas por el sistema de Telesupervisión.

LISTA DE SÍMBOLOS

- q caudal de salida de un depósito
- V volumen virtual de un depósito
- S superficie de una cuenca

- I volumen de agua de lluvia introducida en un depósito virtual en un intervalo de tiempo
- i intensidad media de lluvia durante un cierto intervalo de tiempo
- e coeficiente que relaciona para cada depósito la lluvia bruta con la lluvia neta realmente introducida en las alcantarillas
- Δt intervalo de tiempo considerado
- \vec{V}_t vectores cuyos elementos son los volúmenes de los depósitos virtuales
- \vec{e}_t matriz diagonal que contiene los parámetros e
- \vec{S}_t vector cuyos elementos corresponden a los sumatorios de los productos de las superficies por las intensidades de lluvia
- \vec{K}_t matriz que contiene combinaciones lineales de los coeficientes c
- \vec{h}_t vector que contiene los niveles calculados en los puntos de medida
- \vec{Kd}_t matriz que contiene los coeficientes que relacionan los volúmenes virtuales con los niveles en los colectores de interconexión
- \vec{q} vector de caudales
- X vector de los parámetros del modelo a determinar
- J matriz jacobiana de derivadas parciales

REFERENCIAS

- Ballester, Ll., (1996) Un Sistema de Telecontrol del Alcantarillado. Municipales. Equipamiento y Servicios.
- Clavegueram de Barcelona S.A. (CLABSA), (1995) Manual de Operación de la Explotación Centralizada (MOEC).
- J.M.A Danby, (1988) Fundamentals of Celestial Mechanics. Second Edition.
- Danish Hydraulics Institute, (1996) User Manual and Reference Manual. DHI Software.
- Gutiérrez, L.A., (1992) Gestión avanzada del alcantarillado Simposium Internacional de Desalación y Reuso del Agua. Las Palmas de Gran Canaria.
- Hartong, H., Lobbrecht, A., (1992) Third European Junior Scientist Course. Formerum, Terschelling, the Netherlands, 20-25 September 1991.
- Malgrat, P., (1991) Sistema de control en tiempo real del alcantarillado de Barcelona. El proyecto Sictrab. Municipalia-91.
- Malgrat, P., (1992) El Plan Especial de Alcantarillado de Barcelona (PECB) III Curso de Avenidas: Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1992.
- Malgrat, P., (1992) Desarrollo del PECB: Hacia el drenaje urbano del futuro III Curso de Avenidas: Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1992.
- Malgrat, P., (1992) Gestió avançada del clavegueram. El cas de Barcelona. Diputació de Barcelona.
- Martí, J., Ballester, LL., Malgrat, P., (1993) Implementation of Real Time Control in Barcelona's Urban Drainage System, Sixth International Conference on Urban Storm Drainage. Ontario-Canada, 1993.
- Martí, J., (1994) Control Optimizado Operativo (COPOP). Clavegueram de Barcelona S.A. (CLABSA).
- Martin P. Wanielista, (1978) Stormwater Management, quantity and quality. Ann Arbor Science. Publishers Inc.
- Metcalf and Eddy (George Tchobonoglous), (1985) Ingeniería sanitaria redes de alcantarillado y bombeo. Editorial Labor.
- The Mathworks Inc. Massachusetts, (1994) Matlab. High-Performance Numeric Computation and Visualization Software, Control System Toolbox Users Guide.
- The Mathworks Inc. Massachusetts, (1994) Simulink. Dynamic System Simulation Software. Users Guide.
- William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, (1995) Numerical Recipes in C. The art of Scientific Computing. Cambridge University Press.
- J. L. Quer, J. Martí, P. Malgrat, (1992) On the implementation of real time control (RTC) and a GIS in Barcelona's urban drainage system, Novatech'92. Lyon (Francia).
- P. Malgrat, J. Martí, (1993) Aplicación de tecnologías avanzadas de gestión en una red de alcantarillado, XIV Jornadas Técnicas de la Asociación Española, de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS). Las Palmas de Gran Canaria.
- J. Martí, (1994) Diseño de sistemas informáticos de gestión de redes de saneamiento, XIV Jornadas Técnicas de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS). Jerez de la Frontera.
- J. Martí, (1996) Explotación Integral de los Sistemas de Alcantarillado, ROP, Revista de Obras Públicas.
- J. Martí, (1996) Explotación centralizada de redes de saneamiento ROP, Revista de Obras Públicas.