Control Óptimo Predictivo de Redes de Alcantarillado



Manuel Pardavila Escalera

Universidad Politècnica de Catalunya

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Institut de Robòtica i Informàtica Industrial

Proyecto codirigido por:

Vicenç Puig Cayuela, Bernat Joseph i Duran

Barcelona, Junio del 2015

Resumen

Este proyecto trata sobre el desarrollo de estrategias de control óptimo/predictivo de redes urbanas de alcantarillado. Para el desarrollo de las mismas se estudia una parte de la red de Barcelona, concretamente la zona de Riera Blanca, utilizando la herramienta CORAL. Este software fue desarrollado en su primera versión por el IRI y la UPC. En este proyecto se ayuda a su puesta a punto y mejora de una nueva versión con diversas modificaciones con respecto a la anterior.

En la primera parte del proyecto se realiza el modelado de la citada red. CORAL utiliza el lenguaje de optimización GAMS ("General Algebraic Modeling System"); este software es empleado para el modelado de un sistema para la optimización matemática, y se usa para la resolución del problema de control óptimo/predictivo. Los objetivos a optimizar que se establecerán, estarán relacionados con la minimización de inundaciones y preservación del medio ambiente.

En la segunda parte, se validará del funcionamiento de la herramienta de control óptimo/predictivo. Dicha validación se lleva a cabo con la ayuda del programa MOUSE, el cuál modeliza sistemas de drenaje para aguas residuales y pluviales y a la vez proporciona a CORAL datos reales. Para el uso de este último software hay que realizar una conexión con el programa base del proyecto, el CORAL, esta se ejecutará mediante otro software, que funcionará en este caso como conector. Dicho conector se ha desarrollado en MATLAB.

Finalmente, se evalúa el comportamiento de la Red Riera Blanca. Se estudian los resultados producidos por la misma para tres episodios de lluvia reales registrados en Barcelona. El criterio para su evaluación será el grado de cumplimiento de los objetivos a incluir en la función de control. Estos se compararán con resultados que dio la red frente a estrategias de control simples utilizadas actualmente por la compañía que gestiona la red de Barcelona.



Índice

Res	sumer	າ	2
Lis	ta de l	Figuras	6
Lis	ta de	Gráficos	7
Lis	ta de [·]	Tablas	9
1	Prefa	acio	11
	1.1	Origen y motivación	11
2	Intro	ducción	13
	2.1	Objetivos	13
	2.2	Alcance	13
3	COR	AL	14
	3.1	Introducción	14
	3.2	Principios de modelado de CORAL	18
	3.3	Algoritmo de Control Óptimo de CORAL	21
	3	.3.1 Algoritmo del modelo de control predictivo	21
	3	.3.2 Optimización multicrerio	23
4	Impl	ementación del modelo de la Red Riera E	3lanca 28
	4.1	Descripción de la Red Riera Blanca	28



	4.2	Co	onstrucción del modelo	29
	4.3	M	odelado de la red	33
		4.3.1	Cuenca	33
		4.3.2	Tanque real	35
		4.3.3	Rebosadero	36
		4.3.4	Colectores	37
		4.3.5	Medio Ambiente	38
		4.3.6	Compuerta de retención	38
		4.3.7	Compuerta derivacional	39
	4.4	Fu	unción objetivo	40
		4.4.1	Optimización	41
		4.4.2	Optimización "by weight" (por pesos)	41
	4.5	Ci	iclo de iteración CORAL-MATLAB-MOUSE	42
5	Re	sulta	ndos	47
	5.1	Εŗ	pisodio de Iluvia 31/07/2002	48
	5.2	Εţ	oisodio de Iluvia 05/01/2006	53
	5.3	Εŗ	pisodio de Iluvia 12/09/2006	58
	5.4	Co	onclusiones de resultados	63
		5.4.1	WWTP	63
		5.4.2	CSO	64
		5.4.3	Volumen tratado por los tanques de detención	66



	5.	.4.4 Inundación en los puntos de control	67	
	5.5	Conclusiones finales	69	
6	Prop	ouesta de futuras mejoras	71	
	6.1	Mejora de retención en línea en CORAL	71	
	6.2	Suavizar las acciones de control	71	
	6.3	Dinamización de los colectores	71	
	6.4	Desbordamientos por altura	72	
	6.5 lexico	Optimización multiobjetivo sin pesos: (•	
Coı	nclusi	ones	74	
Agı	adeci	mientos	75	
Ref	erenc	eias	76	
And	Anexos			

Anexo A Parámetros del modelo CORAL

Anexo B Codificación GAMS

Anexo C Comparativa CORAL-MATLAB-MOUSE



Lista de Figuras

Figura	1. Esquema CORAL	14
Figura	2. Ejemplo controlador CORAL	15
Figura	3. Modelo de Tanques Virtuales	17
Figura	4. Modelo de una cuenca de tanque virtual	20
Figura	5. Arquitectura Modelo de Control Predictivo	22
Figura	6. Estrategia de horizonte en retroceso	23
Figura	7. Red Riera Blanca	30
Figura	8. Modelado de Riera Blanca basándose en CORAL	31
Figura	9. Modelado de Riera Blanca de CORAL	32
Figura	10. Ciclo iterativo CORAL-MATLAB-MOUSE	42
Figura	11. Código CORAL-MATLAB-MOUSE	43
Figura	12. Código representación gráficas CORAL Vs MOUSE	45



Lista de Gráficos

Gráfico 1. Volumen DZUN 31_07_02 CORAL Vs MOUSE	45
Gráfico 2. Profundidad DZUN 31_07_02	48
Gráfico 3. Profundidad DDDO 31_07_02	49
Gráfico 4. Caudal C11 31_07_02	50
Gráfico 5. Caudal a WWTP 31_07_02	51
Gráfico 6. Caudal CSO al mar 31_07_02 (link 1)	52
Gráfico 7. Caudal CSO al mar 31_07_02 (link 2)	52
Gráfico 8. Profundidad DZUN 05_01_06	53
Gráfico 9. Profundidad DDDO 05_01_06	54
Gráfico 10. Caudal C11 05_01_06	55
Gráfico 11. Caudal a WWTP 05_01_06	56
Gráfico 12. Caudal CSO al mar 05_01_06 link (1)	56
Gráfico 13. Caudal CSO al mar 05_01_06 link (2)	57
Gráfico 14. Profundidad DZUN 12_09_06	58
Gráfico 15. Profundidad DDDO 12_09_06	59
Gráfico 16. Caudal C11 12_09_06	60
Gráfico 17. Caudal a WWTP 12_09_06	61
Gráfico 18.Caudal CSO al mar 12_09_06 (link 1)	61
Gráfico 19. Caudal CSO al mar 12 09 06 (link 2)	62



Control Optimo Predictivo de Redes de Alcantarillado	
Gráfico 20. Comparativa Volumen tratado en WWTP	63
Gráfico 21. Variación del Volumen tratado en WWTP (%)	64
Gráfico 22. Comparativa volumen CSO al mar	65
Gráfico 23. Variación de CSO al mar (%)	65
Gráfico 24. Volumen tratado por DZUN y DDDO	66
Gráfico 25. Variación del volumen tratado por DZUN y DDDO	67



Lista de Tablas

Tabla 1. Ecuaciones Basin	34
Tabla 2. Ecuaciones tanques reales	35
Tabla 3. Ecuaciones rebosaderos	36
Tabla 4. Ecuaciones colectores	37
Tabla 5. Ecuaciones emisiones al medio	38
Tabla 6. Ecuación compuertas de retención	39
Tabla 7. Ecuaciones compuerta derivacional	39
Tabla 8. Ejemplo optimización por pesos	42
Tabla 9. Volumen DZUN 31_07_02	48
Tabla 9. Volumen DZUN 31_07_02	48
Tabla 10. Volumen DDDO 31_07_02	48
Tabla 10. Volumen DDDO 31_07_02	48
Tabla 11. Volumen derivado C11 31_07_02	50
Tabla 12.Volumen WWTP 31_07_02	50
Tabla 12.Volumen WWTP 31_07_02	50
Tabla 13. Volumen CSO al mar 31_07_02	51
Tabla 13. Volumen CSO al mar 31_07_02	51
Tabla 14. Volumen DZUN 05_01_06	53
Tabla 14. Volumen DZUN 05_01_06	53



Tabla 15. Volumen DDDO 05_01_06	53
Tabla 15. Volumen DDDO 05_01_06	53
Tabla 16. Volumen derivado C11 05_01_06	55
Tabla 16. Volumen derivado C11 05_01_06	55
Tabla 17. Volumen WWTP 05_01_06	55
Tabla 17. Volumen WWTP 05_01_06	55
Tabla 18. Volumen CSO al mar 05_01_06	56
Tabla 18. Volumen CSO al mar 05_01_06	56
Tabla 19. Volumen DZUN 12_09_06	58
Tabla 19. Volumen DZUN 12_09_06	58
Tabla 20. Volumen DDDO 12_09_06	58
Tabla 20. Volumen DDDO 12_09_06	58
Tabla 21. Volumen desviado C11 12_09_06	60
Tabla 21. Volumen desviado C11 12_09_06	60
Tabla 22. Volumen WWTP 12_09_06	60
Tabla 22. Volumen WWTP 12_09_06	60
Tabla 23. Volumen CSO al mar 12_09_06	61
Tabla 23. Volumen CSO al mar 12_09_06	61
Tabla 24. Nivel del flujo en los puntos de control 31_07_02	68
Tabla 25. Nivel del flujo en los puntos de control 05_01_06	68
Tabla 26. Nivel del flujo en los puntos de control 12_09_06	69



1 Prefacio

1.1 Origen y motivación

Los sistemas de alcantarillado constituyen una gran parte de todos los bienes urbanos. Su integridad estructural y su eficiencia funcional representan parámetros clave para la transferencia segura y la eliminación de las escorrentías superficiales y descargas domésticas y comerciales. El fallo de las redes de alcantarillado puede fácilmente originar descargas incontrolables, inundaciones, contaminación de las aguas receptoras, subsuelos y acuíferos, impacto producido por la construcción de las plantas de tratamiento así como el continuo crecimiento de los costes de mantenimiento.

Por lo tanto, la sostenibilidad de estos sistemas, que con frecuencia, interactúan con otros componentes del ciclo urbano del agua (por ejemplo, redes de abastecimiento de agua, aguas subterráneas, sistemas receptores como mares, océanos, etc.), es un problema importante para los controladores de los sistemas de drenaje urbanos. Además, la frecuencia con la que se producen precipitaciones intensas parece aumentar en muchas regiones y las previsiones meteorológicas para el futuro no son muy alentadoras, ya que predicen un cambio climático, lo cual, empeorará este problema aún más.

La falta de una metodología adecuada para remediar este problema está provocando un gran número de estudios valorando diferentes mecanismos y estrategias de predicción para así saber cómo responderá el medio ante algunas de las alteraciones mencionadas anteriormente, principalmente, cuando tienen lugar esas precipitaciones elevadas.

Con todo esto se llega al punto inicial del proyecto que fue el desarrollo de una herramienta llamada CORAL, un software informático desarrollado de forma conjunta por CLABSA ("Clavegueram de Barcelona") y el Departamento de Control Automático (ESAII) y el Instituto de Robótica y Computación Industrial (IRI) de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), España.



Dicha herramienta es usada para el control predictivo global de sistemas urbanos de drenaje y alcantarillado mediante la computación y simulación de los *set-points* óptimos para los dispositivos de control de una red con el fin de solventar los inconvenientes nombrados; evitar las inundaciones para así minimizar los vertidos al medio y que estas aguas no puedan ser tratadas en plantas depuradoras para así evadir los problemas ambientales.

Tras la validación de una primera versión de esta herramienta, a la que se le llamará Coral 1.0, se pretende evolucionar, verificar y poner en funcionamiento una nueva versión dotada de nuevas mejoras y facilidades de uso.



2 Introducción

2.1 Objetivos

En este proyecto se realizará la implementación de control óptimo predictivo en la gestión de redes de alcantarillado. Los objetivos de esta estrategia de control en este campo están relacionados con la protección del medio ambiente, prediciendo con anterioridad posibles estrategias para proporcionar un estado óptimo de la red. Estos, para el caso de estudio; y mediante el modelado con CORAL, son los siguientes:

- Minimizar, hasta llegar a evitar si es posible, los desbordamientos en cualquier parte de la cuenca gracias al sistema de control de los tanques de detención y sus elementos de detención (compuertas) y detección (elementos de medida).
- Minimizar los CSO ("Combined Sewer Outflow") al mar
- Maximizar el tratamiento de las aguas residuales en la depuradora ("Wastewater Treatment Plant", WWTP)

Al mismo tiempo se pretende mejorar la herramienta CORAL, produciendo un incremento en la calidad del cumplimiento de los anteriores objetivos respecto a las versiones previas de la herramienta.

2.2 Alcance

El proyecto aborda la aplicación del control óptimo de redes de alcantarillado utilizando la herramienta CORAL aplicada a una parte de la red de Barcelona (la cuenca de Riera Blanca) y su validación utilizando un simulador de redes de alcantarillado (MOUSE) utilizando diversos episodios de lluvia reales.

Esto tiene la finalidad del desarrollo del CORAL para su posterior aplicación en diferentes redes de alcantarillado, y solventar así todos los problemas (inundaciones, contaminación, etc.) derivados de una mala estrategia control óptimo/predictivo en sistemas urbanos.



3 CORAL

3.1 Introducción

CORAL, como se introdujo con anterioridad, es una herramienta para el control predictivo, global y óptimo a tiempo real para redes de alcantarillado cuyo funcionamiento se sustenta en el siguiente diagrama y cuyo proceso se explicará a continuación con las respectivas referencias marcadas en el diagrama:

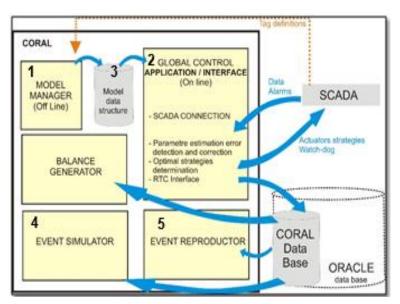


Figura 1. Esquema CORAL

Las diferentes partes del programa son:

• Gestor del Modelo (1)

El gestor del modelo es una interfaz gráfica de usuario cuya función es la construcción del modelo hidráulico. También está a cargo de la validación del modelo y la generación de ecuaciones que permiten la generación de estrategias de gestión óptimas.



Programa/Interfaz (2)

Este módulo conecta la aplicación con el SCADA ("Supervisory Control and Data Acquisition System"), recibiendo datos en tiempo real, calculando las estrategias óptimas y generando los set-points que se envían a los actuadores, previo al control de un operario para así conseguir los objetivos operacionales mencionados en puntos previos. Este módulo está conectado con el Gestor del Modelo con una estructura intermedia del modelo de datos (punto 3 en la Figura 1). También dispone de una interfaz gráfica que permite al controlador controlar a tiempo real las acciones de CORAL. A continuación se muestra un ejemplo de esta interfaz a tiempo real del Sistema de Alcantarillado de Barcelona.

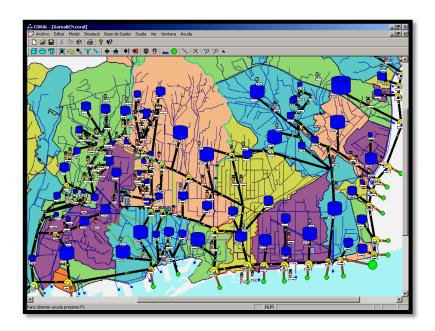


Figura 2. Ejemplo controlador CORAL

Simulador de eventos (4)

El simulador de eventos simula un modelo hidráulico con unas precipitaciones determinadas. Para ello se deben ejecutar las siguientes acciones: leer los datos de intensidad de lluvia de la base de datos de CORAL, generar ecuaciones del modelo de la red y optimizarlo ejecutando GAMS (que es el optimizador matemático utilizado). Como resultado de dicha optimización se obtienen las estrategias de control óptimas tomando en cuenta la dinámica del modelo. Dichas estrategias se



obtienen a partir de las salidas del GAMS y generando el punto inicial de las ecuaciones del modelo para el siguiente paso de simulación.

Reproductor de eventos (5)

El reproductor de eventos lee los datos de una simulación existente y realiza una representación gráfica del modelo con el fin de mostrar la evolución dinámica de la red de alcantarillado. Cabe señalar que todos los elementos activos y pasivos pueden ser graficados por el usuario pero es este quien puede escoger cuáles deseará mostrar.

Finalmente, una vez presentado lo que es la estructura y el funcionamiento interno del CORAL, se hace un análisis de lo que ya es el modelado matemático utilizando por el programa.

El modelo usado por CORAL para el modelado de una red de alcantarillado está basado en la subdivisión de la red de alcantarillado en cuencas interconectadas, tratándolas como tanques virtuales. Este tipo de modelo se conoce habitualmente como modelo de depósitos virtuales. Es un modelo "conceptual" basado en el concepto de "función de transferencia". Para la obtención de dicho modelo se elabora a través de un gráfico simplificado en el que se relacionan los principales conductos de alcantarillado y el conjunto de tanques reales y virtuales.

Este tipo de modelo es muy útil para el cálculo de las estrategias óptimas, porque hace posible evaluar un gran número de acciones de control en un periodo computacional muy corto. El modelo está formado por un conjunto de ecuaciones que proporcionan una evaluación rápida y aproximada de las variables hidráulicas de una red y la respuesta de todas las compuertas a las acciones de control.

Por tanto, un depósito virtual es una agregación de una de las cuencas de la red de alcantarillado que aproxima la hidráulica de la lluvia, la escorrentía y la retención de agua residual de la misma (*Figura 3*). El mecanismo de operación consiste en que, a un tiempo dado, el volumen almacenado en dichos depósitos representa la cantidad de agua dentro de la red asociada a la correspondiente cuenca. La cantidad de agua almacenada se calcula en base al área de influencia de las respectivas precipitaciones, en un instante dado, y al flujo intercambiado entre los tanques virtuales conectados entre sí. Una suposición que hay que tener en cuenta es que las salidas de dichos dispositivos se asumen proporcionales a los volúmenes acumulados.



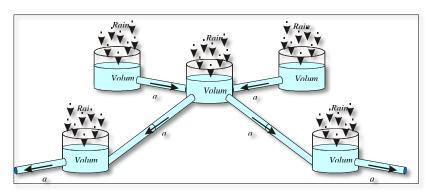


Figura 3. Modelo de Tanques Virtuales

Los objetivos del control óptimo en sistemas de aguas residuales están relacionados con la prevención de inundaciones y la minimización de *CSO* ("Combined Sewer Overflow"). Por tanto, el objetivo de aplicar este control óptimo es el de calcular, antes de tiempo, las mejores estrategias factibles para que los actuadores de la red, durante un horizonte cercano, tengan respuestas adecuadas; hablando en relación a los objetivos citados.

Pero este control óptimo tiene una dificultad, ya que, obviamente, introducir mejoras en tamaño de tuberías, volúmenes de almacenamiento o capacidades de bombas pueden ser fáciles con el fin de minimizar o disminuir inundaciones o desbordamientos; pero estas soluciones serán muy desfavorables desde el punto de vista económico ya que demandarían un gran gasto. Alternativamente lo que hay que buscar es un equilibrio global entre todos los objetivos de control. Para ello se introduce una función matemática que se conoce como función de coste. Dicha función proporciona una expresión matemática de los diferentes objetivos de control, con unas restricciones que hacen referencia a límites físicos de los elementos hidráulicos y constantes operacionales, así como la dinámica proporcionada por el modelo. De esta forma CORAL, lo que hace es formular un problema de programación no lineal cuya solución viene dada por el resultado proporcionado por GAMS.

Este proceso entre GAMS y CORAL sigue unas estrategias computacionales que están basadas en las previsiones de lluvia en el horizonte de optimización. La elección de este está limitada a cuánto tiempo antes de que ocurran dichas precipitaciones, se puede hacer una predicción segura de lo que va acontecer. Sin embargo, las estrategias de control son recalculadas en cada intervalo para ajustar los parámetros del modelo, las predicciones de lluvia y la optimización de acuerdo a las nuevas lecturas de los sensores.



Tras esto, la aplicación de control óptimo interacciona con el SCADA (*Figura 1*). En cada intervalo de control se recupera información sobre estados y observadores: volúmenes de los depósitos y niveles de los colectores principales, estado de los actuadores, alarmas, variables SCADA, como errores de comunicación y marcas de tiempo. Luego después de esto, si se considera correcto, los parámetros variables del modelo se actualizan usando las últimas lecturas y la optimización calcula una estrategia de control para un horizonte de optimización completa. Tras esto los *set-points* para el siguiente intervalo de control se envían a los actuadores.

CORAL permite al usuario llevar a cabo un estudio de control óptimo fuera de línea para una nueva red, o también para modificar una existente sin tener que escribir todas las ecuaciones del modelo. Esta aplicación tiene una interfaz gráfica (como se mostró previamente; *Figura 2*), la cual permite a un usuario, incluso sin ser experto en el uso de herramientas matemáticas complejas, introducir una descripción de una red de alcantarillado y diseñar el sistema de control teniendo solo en cuenta la física, relaciones topológicas en la red y las restricciones y objetivos operacionales.

En resumen; el cálculo de la estrategia óptima es un proceso de optimización que tiene en cuenta todas las restricciones, tanto físicas como operacionales, del sistema de alcantarillado, para dar lugar a *set-points* que consigan hacer mínimas las inundaciones y CSO. En su implementación en línea, el sistema de control global recibe datos del SCADA, calibra las ecuaciones del modelo, lanza el programa de optimización y finalmente envía los *set-points* al SCADA que los envía a los reguladores.

3.2 Principios de modelado de CORAL

Los modelos *rainfall-runoff*, complejos y no lineales, son muy útiles para operaciones fuera de línea (calibración y simulación) de las redes de alcantarillado, pero en cambio para operar en línea se proponen otros métodos, tales como el control óptimo global, para el que se debe seleccionar una estructura de modelo más simple con las siguientes características:



- Capacidad de representación de los principales comportamientos de la red: se proporciona una evaluación de las variables hidrológicas e hidráulicas de la red y su respuesta a las entradas de lluvia así como las acciones de control en los actuadores (compuertas, bombas, etc.). En particular, garantiza el balance de masa y la estabilidad del sistema
- Capacidad de simplificación y expansión, flexibilidad y modularidad: se usa la aproximación más simple capaz de conseguir el objetivo, el mejor análisis permite que sea expandido y/o modificado el modelado de una porción del sistema de alcantarillado. Se podría satisfacer los principios básicos de elementos hidráulicos de la red y, finalmente, la velocidad de computación sea suficiente para cumplir los requerimientos de operar en tiempo real. La capacidad de simplificación o sencillez pretenderá un incremento en la velocidad de cálculo
- Sensibilidad a una calibración y optimización en línea: el enfoque del modelado se sustenta por el saber hacer teórico y algoritmos que habían sido probados con éxito en el campo del control automático. El modelo necesita ser calibrado a la realidad usando una técnica de estimación de parámetros, preferiblemente, una herramienta bien establecida que permita la adaptación en línea de los parámetros de un modelo, incorporando datos del sistema de control. Finalmente, esta herramienta permite al usuario establecer y resolver un problema de control óptimo

Tal como se discutió anteriormente metodología posible de modelado para obtener un modelo *rainfall-runoff* en tiempo real de un sistema de alcantarillado es a través de un gráfico simplificado, relacionando los colectores principales y el conjunto de depósitos reales y virtuales. Este último es una agregación de una de las cuencas de la red de alcantarillado que aproxima la hidráulica de la lluvia, la escorrentía y la retención de agua residual de la misma; como se muestra a continuación:



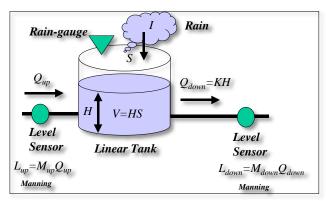


Figura 4. Modelo de una cuenca de tanque virtual

La hidráulica de los depósitos virtuales es:

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_{up}(t) - Q_{down}(t) + \varepsilon SI(t)$$

donde:

- V es el volumen del agua acumulada en dicha cuenca,
- Q_{uv} y Q_{down} son los caudales que entran y salen de la cuenca,
- I es la intensidad con la que la lluvia cae en la cuenca,
- S la superficie y ε el coeficiente de absorción
- El flujo del colector de salida Q_{down} puede estar relacionado con el volumen (V) de agua acumulado en la cuenca, asumiendo la siguiente relación lineal:

$$Q_{down}(t) = c_{vc}V(t)$$

donde c_{vc} es el coeficiente de conversión volumen-flujo

Usando esta metodología de modelado, la estructura dependerá de la topología de la red y de sus parámetros, que deben ser estimados usando datos reales de los sensores situados en la red. Para una topología dada, una versión en tiempo discreto de su modelo, usando las ecuaciones previas, es:



$$V(k+1) = V(k) + \left(Q_{up}(k) - cV(k) + SI(k)\right)\Delta t = (1 - c_{vc}\Delta t)V(k) + \varepsilon SI(k)\Delta t + Q_{up}(k)\Delta t$$

donde:

- V es un vector de los volúmenes de los depósitos virtuales
- SI es el vector correspondiente a la suma de los productos de las áreas por las intensidades de lluvia
- Q_{up} es un vector que contiene los niveles de agua antes del dispositivo
- ullet Q_{down} es un vector que contiene los niveles de agua después del tanque

Usando esta metodología de modelado, se crea un modelo simplificado de una red urbana de alcantarillado. Cabe señalar que el parámetro S debe ser dado de acuerdo las características geográficas de cada cuenca, y los parámetros ε y c_{vc} deben estimarse para cada cuenca usando datos reales de los sensores. La estimación de los parámetros fuera de línea debe llevarse a cabo usando datos históricos; mientras que para el cálculo de estos en línea se usan técnicas de identificación recursiva adaptativa para actualizar sus valores en cada paso de tiempo usando las nuevas lecturas del sistema telemétrico.

3.3 Algoritmo de Control Óptimo de CORAL

3.3.1 Algoritmo del modelo de control predictivo

Los objetivos en el control óptimo de los sistemas urbanos de alcantarillado están relacionados con la protección del medio ambiente, como se citó en apartados anteriores. El objetivo de la aplicación del control óptimo predictivo es para calcular, antes de tiempo, las estrategias posibles para los actuadores de la red que en consecuencia proporcionarán los mejores estados del sistema, en un horizonte determinado. (*Figura 5*). El periodo de control debe ser definido teniendo en cuenta el tiempo de muestreo utilizado por el sistema de telemetría y las constantes de tiempo de los actuadores de la red. El horizonte de optimización debe ser seleccionado considerando las constantes de tiempo hidráulicas de la evacuación del agua de la lluvia, dinámica de llenado/vaciado de los depósitos y/o otros factores que afectan al funcionamiento del drenaje urbano.



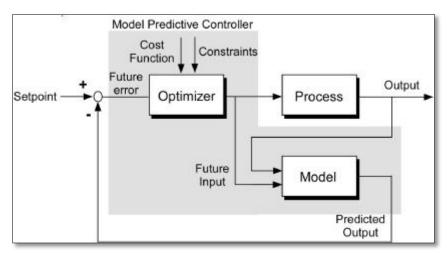


Figura 5. Arquitectura Modelo de Control Predictivo

El cálculo de los *set-points* de control óptimos se aplica a los actuadores basándose en el control predictivo; concretamente se aplica la estrategia de horizonte deslizante.

Dicha estrategia se basa en tomar para el tiempo actual t como condición inicial del sistema las medidas/estimaciones de los estados del mismo. A continuación, se resuelve un problema de control óptimo para encontrar las estrategias óptimas para las variables de control durante el tiempo desde t a $t+H_p$, en el horizonte de deslizante. El objetivo es obtener la secuencia de control óptima para los valores presentes y futuros $(u_k,u_{k+1}\dots,u_{k+t_r+1})$ que optimiza una función que actúa en lazo abierto, de acuerdo a la evolución del sistema sobre él horizonte H_p . El primer valor de la secuencia óptima (u_k) se aplica como entrada al sistema para el momento actual t hasta que se calcula otra secuencia basada en datos más actuales. A continuación, el proceso anterior se repite en el siguiente instante de tiempo, utilizando las nuevas medidas obtenidas por los sensores y los parámetros del nuevo modelo estimados mediante un algoritmo recursivo de estimación de parámetros que trabaja en paralelo. Este proceso se ejemplifica gráficamente a continuación:



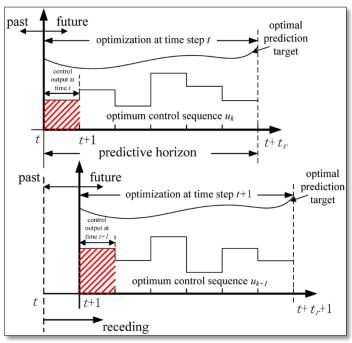


Figura 6. Estrategia de horizonte en retroceso

3.3.2 Optimización multicrerio

Los problemas de ingeniería más habituales conllevan problemas de optimización simultánea de varios objetivos que están frecuentemente en conflicto entre ambos.

En este caso de los sistemas de alcantarillado urbanos, el objetivo es mejorar la operación del sistema cumpliendo diferentes metas, las cuáles se citaron con anterioridad. A estos objetivos se les da un orden de prioridad; en primer lugar, evitar las inundaciones. A continuación, se debe minimizar la cantidad de *CSO*, siempre y cuando no se interfiera en el primer objetivo, y por último se debe maximizar la cantidad de agua a tratar en las planta de depuración (*WWTP*) así como aumentar tanto como sea posible la capacidad de que la red drene la mayor cantidad de flujo de agua posible.

Por lo tanto se tiene un problema típico problema de optimización multiobjetivo, el cuál matemáticamente se puede formular, basándose en la Teoría de Pareto; de la siguiente manera:

$$\min_{x} f_{1}(x),...,f_{r}(x)$$
subject to: $x \in \chi$



donde:

- x, es un conjunto que viene dado por las restricciones ($g_i(x) \le 0, j = 1,...,m$)

x*, es el punto óptimo o solución de ese conjunto

f_i, cada uno de los objetivos a cumplir

De acuerdo con dicha teoría, se enuncia que una solución es óptima de Pareto si y solo si un objetivo f_i puede ser reducido a expensas de incrementar al menos uno de los otros objetivos presentes. Una solución global de Pareto puede solamente estar garantizada si la función multiobjetivo es convexa. En general, puede haber varias soluciones óptimas de Pareto. La generación de soluciones óptimas de Pareto juega un papel importante en la optimización multiobjetivo. Matemáticamente, el problema tiene solución cuando se encuentra el conjunto óptimo de Pareto. Sin embargo, esto no es siempre suficiente ya que por lo general sólo se quiere encontrar una única solución. Esto implica que se debe encontrar la forma de poner en orden las soluciones óptimas de Pareto y con esto hacer un balance global entre todos los criterios para así tomar una decisión.

Tras la introducción teórica de la optimización multicriterio, se pasa, a abordar las metodologías de resolución de estos tipos de problemas. Una de las técnicas de resolución multiobjetivo más conocidas es la suma lineal ponderada, donde el vector de la función objetivo se escala de tal manera que la importancia de cada uno de los objetivos se incorpore en la función de coste. Matemáticamente, dicha función tiene la siguiente estructura:

$$\min_{x} \sum_{i=1}^{r} w_{i} f_{i}(x)$$
subject to: $x \in \chi$

donde:

- w_i , peso de importancia que se le da a cada uno los diferentes objetivos

- f_i , función objetivo

Aplicando dicha formulación para el caso de las redes de alcantarillado; CORAL la adapta a su función de coste, es decir, la función de coste que se mencionó en puntos previos, se convierte en una suma ponderada en el horizonte de optimización incluyendo los siguientes términos:



- Una suma de las inundaciones en los diferentes colectores
- Una suma de los volúmenes desbordados que se dirigen al mar en cada intervalo de tiempo y el volumen instantáneo en los tanques reales (tanques de detención)
- Una suma de las desviaciones de entre el caudal que trata y el máximo que puede tratar la WWTP en cada instante

Y la expresión matemática obtenida es la siguiente:

$$F = \sum_{k=0}^{N-1} \left(\alpha_{safe} F_{safe}(k) + \alpha_{CSO} F_{CSO}(k) + \alpha_{WWTP}(k) \right) =$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} \left(\alpha_{\textit{Safe}} \sum_{i} \max \left(0, \left(q_{i}(k) - q_{i}^{*} \right) \right) + \alpha_{\textit{CSO}} \sum_{j} \textit{CSO}_{j}(k) + \alpha_{\textit{WWTP}} \sum_{l} \left| q_{\textit{WWTP},l}(k) - q_{\textit{WWTP},l}^{*} \right| \right) \right)$$

donde:

- N es el horizonte de optimización usado por el controlador en términos de períodos de muestreo
- k indica el período de tiempo
- i es un identificador para cada colector de la red
- q_i es el flujo a través del colector i en el instante k
- q_i^* es el máximo flujo permitido a través del colector i en él instante k
- *j* es un identificador para indicar los lugares donde se producen los desbordamientos
- CSO_j^k es el volumen de CSO en el lugar j en el instante k
- l identifica la planta WWTP
- $q_{WWTP,l}$, es el caudal tratado por la planta l WWTP
- $q_{WWTP,l}^*$, es el máximo caudal que puede tratar la planta l WWTP
- α_{Safe} , α_{CSO} y α_{WWTP} son los pesos relativos asociados a los diferentes objetivos de la función de coste



Con respecto a la anterior ecuación se puede decir que cada uno de los pesos específicos establecidos están ajustados de forma que el objetivo prioritario sea la prevención de desbordamientos (α_{Safe}) por encima de los otros dos.

Una vez introducida y explicada la función de coste empleada por CORAL, cabe puntualizar como se lleva a cabo la optimización; esta debe realizarse con respecto a variables de control (u_k) de la secuencia de control óptima obtenida (punto 3.3.1). Estas variables son los set-points de los controladores locales de las compuertas y están sujetas a un conjunto de restricciones, que son:

 Ecuaciones lineales de igualdad: en tiempo discreto que se expresan de la siguiente forma (cuyos parámetros se recalibran en tiempo real)

$$x_{k+1}$$
, = $f(x_k, u_k, w_k)$

donde:

- x_k,, vector de los estados observados: volúmenes almacenados en depósitos, tanto reales como virtuales, y caudales (o niveles de agua) en los colectores principales
- u_k, un vector de las variables de control relacionadas con el posicionamiento de la compuerta (por ejemplo; flujo a través de una compuerta)
- w_k , es un vector de perturbaciones que contiene las intensidades de las precipitaciones en las diferentes zonas de captación
- f, es una función lineal que contiene el balance de másico de diferentes magnitudes de la red a tener en cuenta que son: lluvia que entra, flujo de colectores y el volumen de los depósitos. Su estructura depende de la



topología de la red; sus parámetros deben ser estimados usando datos reales de los sensores instalados

- Subíndices *k*, indican los intervalos de tiempo.
- Ecuaciones no lineales de igualdad de caudal relacionadas con los dispositivos que presentan desbordamientos

$$g(x_k, u_k) = 0$$

 El límite de las restricciones en el rango de operatividad de las compuertas, los caudales permisibles a través de los colectores y la capacidad máxima de los depósitos

$$x_{min} \le x_k \le x_{max}$$

$$u_{min} \le u_k \le x_{max}$$

Por lo tanto, este el método de resolución de la optimización multiobjetivo, que se presenta para este estudio, para el CORAL; con tres funciones objetivos dentro de una función de coste, con una gran cantidad de constantes lineales, frente a un número inferior de no lineales, debe de ser resuelto mediante técnicas de programación no lineal.



4 Implementación del modelo de la Red Riera Blanca

Por tanto una vez presentada la estructura y el funcionamiento del CORAL (*Apartado 3*) con el cuál se lleva a cabo este estudio; se pasa a particularizar y estructurar el modelo de la red de Riera Blanca, utilizada en este trabajo como caso de estudio, basándose en lo mencionado anteriormente.

4.1 Descripción de la Red Riera Blanca

La cuenca de Riera Blanca se representa en el siguiente apartado en la *Figura 7.* Consta de diferentes elementos que se explicarán individualmente en el *Apartado 4.3.*

Está formada por dos tanques de detención:

- Tanque de detención de Zona Universitaria (DZUN)
- Tanque de detención de Doctors Dolsa (DDDO)

Un elemento de detención en línea que se modelará como un tanque real (tanque DL) para cuantificar la cantidad de CSO en la red:

Colector CSO

Las compuertas que ayudan a realizar esa estrategia de control global implementada:

- Compuertas de retención a la salida de los tanques de detención (C15 y C19) y la del elemento de retención en línea (CSO)
- Compuerta derivacional C11 que re direcciona el flujo cara los dos tanques de retención
- La compuerta del elemento de retención en lía G-CSO

Cuenta también con dos elementos de control de desbordamientos, situados como es lógico, a la salida de los tanques reales:

L50 localizado a una cierta distancia del DZUN



- L6 localizado a una cierta distancia del DDDO

También se dispone de otros elementos de medida a lo largo de la red para los controles puntuales de los niveles en todo el sistema.

Uno de los elementos más importantes de la red es la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (WWTP) con una capacidad para tratar hasta $2 m^3/s$.

Una vez descrita y explicada la estructura real de la red, desde sus elementos hasta su función, se explica lo más importante de esta, que es el porqué del funcionamiento y existencia de todo esto; es decir, los objetivos operacionales a conseguir para optimizar el proceso de estudio.

Los objetivos a cumplir en la Red de Riera Blanca, como se citaron con anterioridad, son los siguientes:

- Minimizar los desbordamientos en cualquier parte de la cuenca
- Minimizar los CSO al mar
- Maximizar el tratamiento de las aguas residuales en la WWTP

4.2 Construcción del modelo

Usando la metodología de modelado de CORAL descrita en el punto anterior, se divide toda la cuenca de Riera Blanca en varias sub-cuencas, como se muestra en la *Figura 7*, siendo cada una de ellas representada por un tanque virtual (*Figura 8*), aplicando la teoría de tanques virtuales explicada en el *Apartado 3*. El resto de los elementos también se representan: tanques de detención, compuertas y *WWTP*. El elemento de detención en línea para cuantificar la cantidad de *CSO* se modela como un tanque de detención real.

Una vez se construye matemáticamente este modelo conceptual, basándose en la teoría explicada previamente, este se introduce en CORAL mediante la herramienta de gestión de modelado que permite dar lugar a la representación que se muestra en la *Figura 9*. Esta herramienta da lugar a esta figura ya que permite crear automáticamente las ecuaciones del modelo CORAL (*Anexo A*), estableciendo los parámetros para cada



elemento. Algunos de estos parámetros deben ser inicialmente calibrados mediante una estimación a partir de datos experimentales. Estos parámetros son dos de cada tanque virtual, el coeficiente de absorción y el coeficiente de conversión volumen-caudal; representando así todas las sub-cuencas (dispositivos virtuales) de la red.

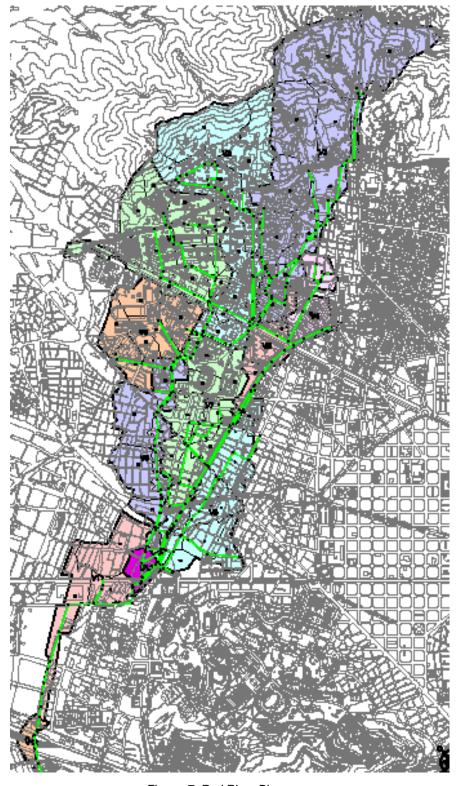


Figura 7. Red Riera Blanca



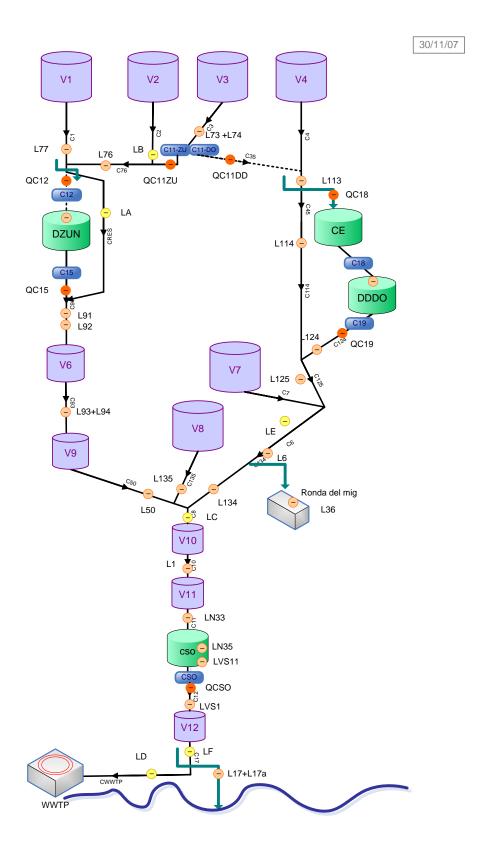


Figura 8. Modelado de Riera Blanca basándose en CORAL



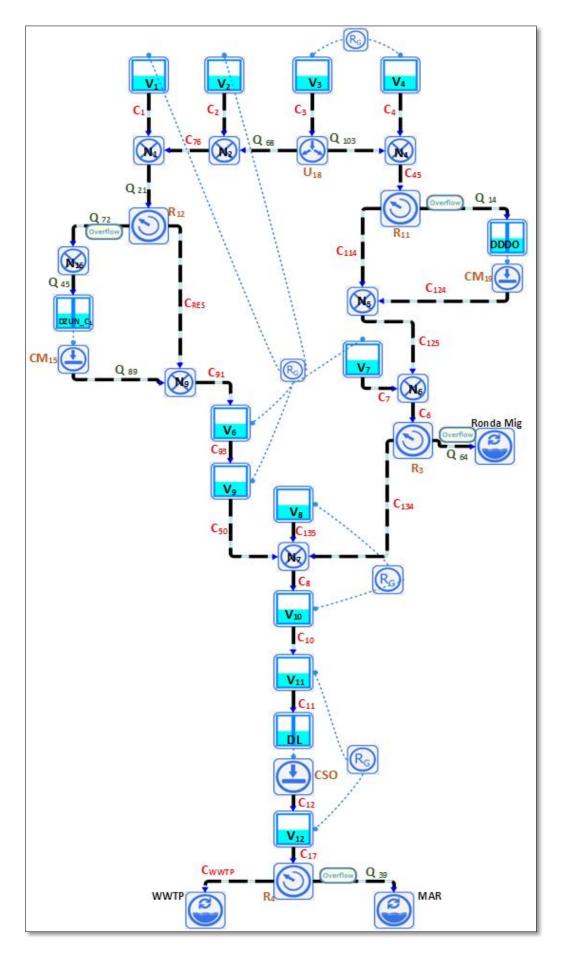


Figura 9. Modelado de Riera Blanca de CORAL



4.3 Modelado de la red

En este punto se muestra la estructura matemática que tiene cada uno de los elementos, nombrados anteriormente, que forman la red; así como la ejemplificación representativa de su codificación utilizada por CORAL/GAMS.

4.3.1 Cuenca

$$\begin{split} V(t+1) &= V(t) + \Delta t \left(Q_{up}(t) + Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \right), & t = 0, \dots, H-1, \\ S(t) &= \frac{1}{\Delta t} \max \left\{ 0, V(t) + \Delta t \left(Q_{up}(t) + Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \right) - V^{safe} \right\}, & t = 0, \dots, H, \\ Q_{out}(t) &= c_{vc} V(t), \\ \mathbb{P} & t = 0, \dots, H, \\ U_{out}(t) &= Q_{out}(t), & t = 0, \dots, H, \end{split}$$

La contribución externa Q_{in} (en su mayoría debida a las precipitaciones) será evaluada de acuerdo con el tipo de previsiones disponibles. Para los pronósticos de los datos pluviométricos, el modelo *rainfall-runoff* se formula de la siguiente manera:

$$Q_{in}(t) = \varepsilon AR(t),$$

donde A es el área del respectivo elemento Cuenca y ε el coeficiente de absorción de del mismo. Esta implementación también puede ser formulada dentro de un fichero de parámetros de GAMS o también fuera de ficheros GAMS.



Tabla 1. Ecuaciones Cuencas

Símbolo	Significado
V	Volumen
R	Intensidad de Iluvia
Q_{up}	Flujo entrada de los elementos de aguas arriba
Q_{in}	Flujo de entrada externo
Q_{out}	Flujo de salida
S	Desviación del flujo de seguridad
V^{safe}	Volumen de seguridad
c_{vc}	Parámetro de conversión de Volumen-flujo
U_{out}	Caudal de salida controlado
F	Término de penalización

• Ejemplo código GAMS

```
* Equation for Basin:V3 ,Id: B3

DEPV3(T) $(MP(T) ne 1).. XV3(T+1) =E= XV3(T) + DELTAT * (AUV3 * RGP19(T) - QXV3(T));

CAUDAUXRGV3(T).. QDAUXRGV3(T) =E= AUV3 * RGP19(T);

CAUDDV3(T).. QDV3(T) =E= MAX (0,XV3(T) + DELTAT * (QDAUXRGV3(T) - QXV3(T) ) - VOLMAXV3) / DELTAT;

CAUDSV3(T).. QXV3(T) =E= CVCV3 * XV3(T);

CAUDFC3(T).. QFC3(T) =E= QXV3(T);

PENALV3.. PXV3 =E= SUM(T$(MP(T) ne 1), 1 * QDV3(T));
```



4.3.2 Tanque real

$$V(t+1) = V(t) + \Delta t \left(U_{in}(t) - U_{out}(t)\right), \qquad t = 0, \dots, H-1,$$

$$D(t) = \frac{1}{\Delta t} \max \left\{ 0, V(t) + \Delta t \left(U_{in}(t) - U_{out}(t) \right) - V^{max} \right\}, \qquad t = 0, \dots, H,$$

$$U_{out}(t) \le U_{out}^{max},$$
 $t = 0, ..., H,$

$$F = \sum_{t=0}^{H} D(t)^2$$

Tabla 2. Ecuaciones tanques reales

Símbolo	Significado
V	Volumen
D	Flujo desbordado
V^{max}	Volumen máximo
U_{in}	Flujo de entrada
U_{out}	Flujo de salida
U max	Flujo de compuerta máximo
F	Término de penalización
F	remino de penanzación



Ejemplo código GAMS

```
* Equation for Tank:DDDO ,Id: T25

DEPDDDO(T) $(MP(T) ne 1).. XDDDO(T+1) =E= XDDDO(T) + DELTAT * (QQ14(T) - QC124(T));

CAUDFCM19(T).. QFCM19(T) =L= QLIMCM19;

CAUDDDDDO(T).. QDDDDO(T) =E= MAX (0, XDDDO(T) + DELTAT * (QQ14(T) - QFC124(T)) - VOLMAXDDDO) / DELTAT;

PENALDDDO.. PXDDDO =E= SUM(T$(MP(T) ne 1), 1 * QDDDDO(T) * QDDDDO(T));
```

4.3.3 Rebosadero

$$\begin{split} Q_{out}\left(t\right) &= Q_{in}\left(t\right) - Q_{spill}\left(t\right), \\ Q_{spill}\left(t\right) &= max \left\{0, Q_{in}\left(t\right) - Q^{lim}\right\}, \end{split} \qquad t = 0, \dots, H, \end{split}$$

Tabla 3. Ecuaciones rebosaderos

Símbolo	Significado
Q_{spill}	Flujo de aliviadero
Q_{in}	Flujo de entrada
Q^{lim}	Máximo flujo de desbordamiento
Q_{out}	Flujo de salida

Ejemplo código GAMS



4.3.4 Colectores

$$\begin{split} D(t) &= m \acute{a} x \Big\{ 0, Q_{in}(t) - Q^{m \acute{a} x} \Big\}, & t = 0, ..., H, \\ Q_{out}(t) &= Q_{in}(t) - D(t), & t = 0, ..., H, \\ S(t) &= m a x \Big\{ 0, Q_{in}(t) - Q^{safe} \Big\}, & t = 0, ..., H, \end{split}$$

$$F = \sum_{t=0}^{H} \omega S(t)^2,$$

Tabla 4. Ecuaciones colectores

Símbolo	Significado
Q_{in}	Flujo de entrada
$Q^{m\acute{a}x}$	Caudal máximo
D	Desviación del flujo máximo
Q_{out}	Flujo de salida
S	Desviación del flujo de seguridad
Q^{safe}	Flujo de seguridad
F	Término de penalización
ω	Coeficiente específico del elemento

Ejemplo código GAMS

```
* Elements for sewer:C134 ,Id: ES102

CAUDDC134(T) .. QDC134(T) =E= MAX(0,QFC134(T) - LIMC134);

CAUDC134(T) .. QC134(T) =E= QFC134(T) - QDC134(T);

SCARSC134(T) .. SCC134(T) =E= MAX(0,QFC134(T) - DESC134);

PENALC134 .. PQC134 =E= SUM(T$(MP(T) ne 1), 1 * SCC134(T) * SCC134(T));
```



4.3.5 Medio Ambiente

$$F_l = \sum_{t=0}^{H} \omega_l Q_{in}(t),$$

$$F_{l} = \sum_{t=0}^{H} \omega_{l} Q_{in}(t),$$

$$F_{q} = \sum_{t=0}^{H} \omega_{q} Q_{in}(t)^{2}.$$

Tabla 5. Ecuaciones emisiones al medio

Símbolo	Significado
Q_{in}	Flujo al medio ambiente
F_l	Término de penalización lineal
ω_l	Coeficiente específico del elemento (lineal)
F_q	Término de penalización cuadrática
ω_q	Coeficiente específico del elemento (cuadrático)

Ejemplo código GAMS

```
* Equation for Environment:MEDI1 ,Id: E70
TMEDI1(T).. WWPMEDI1(T) =E= QCWWTP(T);
FSUMMEDI1.. SUMMEDI1 =E= SUM(T$(MP(T) ne 1), WWPMEDI1(T));
FCSUMMEDI1.. PSUMMEDI1 =E= SUM(T\$(MP(T) ne 1), 1 * WWPMEDI1(T) *
WWPMEDI1(T));
```

4.3.6 Compuerta de retención

Las compuertas de retención están siempre localizadas después de un tanque o un elemento de retención en línea.

$$U(t) \le U^{m\acute{a}x}, \qquad t = 0, \dots, H,$$



Tabla 6. Ecuación compuertas de retención

Símbolo	Significado
U	Flujo de la compuerta
U^{max}	Máximo flujo por compuerta

Ejemplo código GAMS

```
* Equation for Detention Gate:CM19 ,Id: DEG35 CAUDFC124(T).. QFC124(T) =L= QFCM19(T);
```

4.3.7 Compuerta derivacional

Una compuerta derivacional o de división es un tipo de unión, donde un único flujo de entrada se divide en dos flujos de salida.

$$Q_{in}(t) = U_1(t) + U_2(t),$$
 $t = 0,..., H,$ $U_1(t) \le Q_{in}(t),$ $t = 0,..., H,$ $U_2(t) \le Q_{in}(t),$ $t = 0,..., H,$

Tabla 7. Ecuaciones compuerta derivacional

Símbolo	Significado
U_1, U_2	Flujos de salida de la compuerta
Q_{in}	Flujo de entrada

Ejemplo código GAMS



^{*} Equation for Diversion Gate:U18 ,Id: DIG8

```
CAUDFQ103(T).. QFQ103(T) =E= QC3(T) - QFQ68(T); 
CAUDFAQ103(T).. QFQ103(T) =L= QC3(T); 
CAUDFBQ103(T).. QFQ68(T) =L= QC3(T);
```

4.4 Función objetivo

El objetivo de este modelo es optimizar los vertidos al medio de la red de alcantarillado de Riera Blanca. Este se va a cumplir minimizando los vertidos en dos puntos no deseados ya que no son tratados antes, éstos son la zona de Ronda de Mig y el mar. Por otra parte, el objetivo contrapuesto es maximizar los que van a ser tratados en una planta de tratamiento de residuos (*WWTP*). El tercer objetivo es minimizar las inundaciones producidas en cada uno de los elementos de la red originadas por grandes flujos de entrada a cada uno de estos debido a precipitaciones fuertes, las cuales; no pueden ser asimiladas, en su totalidad por la red; sin dar estos problemas. Por tanto estos son los objetivos determinados por CORAL como predeterminados:

- Emisiones al medio ambiente: se diferencian en dos subgrupos, según su destino ya que según lo dicho unas se minimizarán y otras maximizarán:
 - Combined Sewer Overflow (CSO): las producidas en los puntos de Ronda de Mig y mar; son las que se desean que sean mínimas
 - Wastewater Treatment Plant (WWTP): las dirigidas a la planta de tratamiento de residuos; diferencia entre el flujo de entrada a WWTP y el máximo flujo de llegada a la misma. Se quiere que sean lo mayor posibles

$$F_i = \sum_{M.ambiente} F_l$$
 (lineal) $F_i = \sum_{M.ambiente} F_q$ (cuadrática)

Siendo:

-i, el destino de la emisión (R. Mig, mar o *WWTP*)

Código GAMS

```
FMar.. FMM =E= SUM(T$(MP(T) ne 1), 1 * QQ39(T) * QQ39(T)); FRondaMig..FRM =E= SUM(T$(MP(T) ne 1), 1 * QQ64(T) * QQ64(T)); WWTP.. FWWTP =E= SUM(T$(MP(T) ne 1), 1 * WWPMEDI1(T) * WWPMEDI1(T));
```



- Safety (F_{Safe}): hace referencia al objetivo citado con anterioridad de las inundaciones en las diferentes partes de la red; esto es, la diferencia entre los caudales/volúmenes y sus valores de seguridad. Los elementos correspondientes son:
 - Cuenca (Basin)
 - Colector (Sewer)

$$F_{Safe}(t) = \sum_{Ba\sin} F + \sum_{Sewer} F$$

Código GAMS

```
FSafe.. SAFETY =E= PQC1 + PQC10 + PQC11 + PQC114 + PQC12 + PQC124 + PQC125 + PQC134 + PQC135 + PQC17 + PQC2 + PQC3 + PQC4 + PQC45 + PQC50 + PQC6 + PQC7 + PQC76 + PQC8 + PQC91 + PQC93 + PQCRES + PQQ103 + PQQ14 + PQQ21 + PQQ45 + PQQ68 + PQQ72 + PQQ89 + PXV1 + PXV10 + PXV11 + PXV12 + PXV2 + PXV3 + PXV4 + PXV6 + PXV7 + PXV8 + PXV9;
```

4.4.1 Optimización

Por tanto para cumplir lo dicho con anterioridad se tienen que llevar a cabo métodos de optimización para poder conseguir maximizar y minimizar los objetivos. El proceso de optimizado se puede llevar a cabo mediante la optimización *by weight* (por pesos).

4.4.2 Optimización "by weight" (por pesos)

En la optimización "by weight" o por pesos, se minimiza una suma ponderada de todos los objetivos definidos previamente:

$$F = \alpha_{i(R.Mig,Mar,WWTP)} F_{i(R.Mig,Mar,WWTP)} + \alpha_{Safe} F_{Safe}$$

Los diferentes términos de la anterior ecuación pueden ser ambos lineales o cuadráticos de acuerdo con la opción escogida por el usuario, este también escogerá; los "pesos" para cada término (α_i). Para cumplimentar todos estos requerimientos se le requerirá que



cumplimente una tabla como la que se muestra a continuación. Señalar que sólo una de las dos opciones, sea la lineal o la cuadrática pueden ser elegidas. Si ninguna es escogida el objetivo no será incluido en la función de coste final o lo que es lo mismo, el programa computaría como un 0 en dicho objetivo.

Tabla 8. Ejemplo optimización por pesos

Objetivo	Lineal	Cuadrático	Peso	
CSO			10	
WWTP			10	
Safe			100	

4.5 Ciclo de iteración CORAL-MATLAB-MOUSE

La validación de la herramienta CORAL se hace con la ayuda de un programa de modelado de sistemas de alcantarillado, el cual, se llama; MOUSE. Este programa modeliza sistemas de colección para aguas residuales y pluviales. En este proyecto dicho simulador proporcionará a CORAL datos reales para poder así justificar y comprobar de forma verídica que los datos resultados obtenidos son correctos.

La conexión del CORAL con el MOUSE se puede llevar a cabo de dos formas diferentes.

- Conexión directa CORAL-MOUSE
- Conexión mediante un software puente (MATLAB)

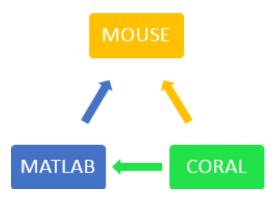


Figura 10. Ciclo iterativo CORAL-MATLAB-MOUSE



Cómo se representa gráficamente en la *Figura 10*, los tres programas forman un ciclo con un mismo punto de partida, que es el CORAL, que es el punto inicial y del cual se quiere comprobar su correcto funcionamiento; y punto final que es el MOUSE, el simulador que proporciona datos reales para la validación de la nueva herramienta.

Antes de nada cabe puntualizar que la ruta utilizada para la validación de este proyecto es la que emplea el MATLAB como puente entre el CORAL y el MOUSE.

Por tanto, se parte de lo obtenido hasta este punto, es decir, los resultados que calcula CORAL mediante lo explicado en el anterior apartado.

Entonces lo que se hace es utilizar el Matlab, como puente, como se citó anteriormente. Desde este último, se hace una llamada al GAMS (CORAL) y al MOUSE. Lo que se pretende así es tener los resultados para poder comparar los de las predicciones con el modelo simplificado (CORAL), con los reales (MOUSE).

A continuación se explica más detalladamente lo citado en el anterior párrafo mostrando el código MATLAB encargado de iniciar el proceso. Cabe puntualizar que se introducen referencias explicativas para la posterior explicación del código.

```
%% Iteración
    for k = 2:T(ep) %T= Time Steps = Hores * 12
       run RunGAMS/RunGAMS%(1)
       run RunMOUSE/RunMOUSE%(2)
        %run RunMOUSE/PrimeraSimulacio (2b)
       run ExtreuNou/ExtreuCORALFlow %(3)
       run ExtreuNou/ExtreuCORALDiposits %(4)
       run TankVolumes/TankVolumes %(5)
       run RunGAMS/InitCondsFlow %(6)
     eval(sprintf('save ResultatsClosedLoop/%s.mat',episodi)) %(7)
     eval(sprintf('system(''copy"MOUSE\\%s.PRF""ResultatsClosedLoop\\%s.PR
     F" >NUL'');',episodi,episodi))%(8)
   end % (9)
   run ExtreuFinal/ExtreuFinal.m %(10)
   eval(sprintf('save ResultatsClosedLoop/%s.mat',episodi))%(11)
end %(12)
```

Figura 11. Código CORAL-MATLAB-MOUSE



Comenzando el análisis desde el inicio. Se trata de un lazo iterativo ("loop"), señalar que este comienza en la iteración "k=2" porque la primera ("k=1") se hace previamente de manera similar.

En este bucle la primera acción que se realiza es la llamada al GAMS (1); en este punto del código ("RunGams") se compilan los archivos GAMS que origina el CORAL para así obtener los resultados de las predicciones con el modelo simplificado, es decir, las consignas de los actuadores del MOUSE. Esas consignas obtenidas con CORAL serán los caudales que deben de salir de las compuertas en el MOUSE en los 5 minutos siguientes al inicio del proceso.

Con esto, se corre el MOUSE ejecutando la carpeta que contiene los ficheros MATLAB (2) que codifican la llamada al primero, proporcionándole esas consignas para los actuadores obtenidos con el CORAL. A parte de estos valores, el MOUSE utiliza como condiciones iniciales las variables: caudales, niveles, velocidades, volúmenes, etc. y los resultados del propio MOUSE de la iteración anterior, lo cual, se hace cargando el archivo que contiene dichos resultados. En este punto es donde se denota la pequeña diferencia con respecto a la primera iteración. Esta última se haría de la forma mostrada en la *Figura 11* (2b) ya que en esa no se tendría ningún resultado previo.

Por tanto, se está ya en un punto en el que, se tienen los resultados producidos por MOUSE. En primer lugar se extraen los flujos o caudales obtenidos (3), tras esto y de manera análoga se extraen los datos de los dispositivos (4), archivos que contienen las equivalencias entre los equipos de CORAL y MOUSE ya que su nomenclatura no es la misma y es necesario saberlo para poder evaluarlos. Por último, se obtienen los volúmenes de los diferentes tanques (5). Tras esto, en el punto (6), lo que se hace es proporcionarle al CORAL esos resultados extraídos obtenidos por MOUSE, volúmenes actuales en tanques virtuales y depósitos. Estos son el punto de partida para la siguiente iteración, dando lugar a un fichero llamado "dep_ini", que como su propio nombre indica, constituye esos valores iniciales para lanzar la siguiente iteración en CORAL (GAMS), por eso va acompañado del comando "RunGAMS".

Una vez llegado a este punto, se tienen ya todos los resultados de esta iteración, por lo tanto, lo que se hace es escribir esos resultados que se obtuvieron. Estos se almacenan en un archivo .mat que será diferente para cada episodio de lluvia estudiado (7). También se copiaran los resultados del MOUSE en su formato (.PRF) en la misma carpeta donde se almacenen los archivos de soluciones (8). Por consiguiente se tienen ya todos los resultados de ambos softwares extraídos y almacenado. A continuación, se cierra el lazo



iterativo (9). Después de esto lo que se hace, de la misma forma de antes, es extraer todos los datos de todas las variables del sistema para cualquier uso necesitado (10) y almacenarlos en los archivos .mat definitivos (11) y así se cierra el proceso (12).

Por consiguiente, se llega al punto definitivo del procedimiento, y se comparan los resultados obtenidos. Esto se hace para cada evento y representando los datos significativos que se crean oportunos, la representación se lleva a cabo mediante un código donde se seleccionan esos datos deseados, tanto de CORAL como de MOUSE y se representan uno frente a otro (*Figura 12*). Por ejemplo, alguno de los datos representativos es el volumen en los depósitos de detención, mostrándose como se codificaría y el resultado que se obtendría.

```
%% Volum DZUN
figure
VDZUN = cumsum(G(8,:)-G(4,:)-G(5,:))*60;
plot([I*Res.XDZUN_C1(:,1) VDZUN']);
legend('CORAL','MOUSE');
title('Volumen DZUN')
xlabel('Tiempo(min)');
ylabel('Volumen (m^3)');
```

Figura 12. Código representación gráficas CORAL Vs MOUSE

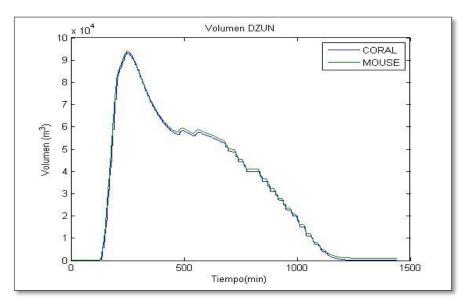


Gráfico 1. Volumen DZUN 31_07_02 CORAL Vs MOUSE



Por tanto se puede observar en el grafico previo que los resultados obtenidos por la herramienta de estudio (CORAL) son muy similares a los que obtiene el MOUSE, por lo que el objetivo propuesto por la *Figura 10* está totalmente cumplimentado. Se mostrarán el resto de los resultados en *Anexo C*.



5 Resultados

En este apartado se analizan con profundidad los resultados de control global CORAL al ser evaluados frente a un control sencillo (o local) a partir de datos extraídos del proyecto, "AMO619 Phase II: Optimum Control of Urban Drainage System" realizado por el IRI en colaboración con la UPC y CLABSA. El criterio para evaluarlos es el del grado de satisfacción de objetivos o prioridades de la función de control. Estas son: la de evitar inundaciones, minimizar los vertidos CSO al mar y maximizar la cantidad de agua tratada en la WWTP para así reducir el impacto ambiental disminuyendo los vertidos tóxicos. Se espera que el rendimiento de la red de Riera Blanca mejore con la aplicación del Control Global. Estos resultados se analizarán de forma cuantitativa, presentando datos numéricos de volúmenes tratados y variaciones entre ambas estrategias de control; y de forma cualitativa, con representaciones gráficas de estas situaciones en los diferentes dispositivos o puntos de interés siguientes:

- Los dos depósitos de retención: Zona Universitaria y Doctors Dolsa
- La compuerta derivacional C11 situada en la parte superior de Riera Blanca, para saber la cantidad de flujo derivado a las ramas de cada uno de los depósitos anteriores
- El mar, donde se cuantificarán los vertidos CSO
- La depuradora, WWTP, para cuantificar la cantidad de agua tratada
- Los diferentes dispositivos de control por toda la red para controlar inundaciones

Para realizar todo este estudio se evaluarán tres tests diferentes. Cada uno está basado en distintos eventos de precipitaciones reales registradas en Barcelona en épocas y años distintos con el fin de poder de esta manera realizar una evaluación completa del comportamiento y asimilación de la red, así como; la reacción de esta ante precipitaciones más o menos abundantes, más o menos constantes, etc.



5.1 Episodio de Iluvia 31/07/2002

En primer lugar se realiza el estudio tanto cualitativa como cuantitativamente del comportamiento de los tanques de retención mencionados.

Tabla 9. Volumen DZUN 31_07_02

Depósito Zona Universitaria				
Control S. (m ³) Control G. (m ³) Var. Vol. (%)				
116785	54430	-53%		

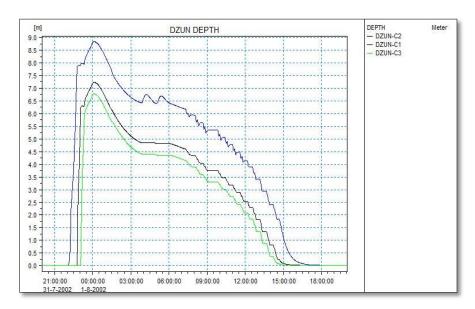


Gráfico 2. Profundidad DZUN 31_07_02

Tabla 11. Volumen DDDO 31_07_02

Depósito Doctors Dolsa			
Control S. (m ³) Control G. (m ³) Var. Vol. (%)			
87208	39562	-55%	



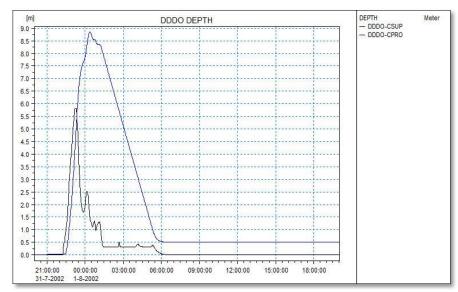


Gráfico 3. Profundidad DDDO 31_07_02

Como se puede observar en ambos gráficos con sus respectivas tablas de datos asociados; en ambos depósitos se produce una disminución del volumen tratado.

Para explicar esta situación, se apoya el estudio en lo que ocurre con anterioridad a la llegada de todo el flujo de agua a los depósitos, es decir; lo que acontece en la compuerta derivacional C11 que distribuye ciertas cantidades de flujo hacia los dos depósitos.

Como se puede observar, en la *Tabla 11* y el *Gráfico 3*, se observa una disminución en la cantidad de agua que se dirige a ambos depósitos; en comparación, con lo que acontecia con la anterior estrategia de control local y de ahí la disminución de los volumenes tratados en ambos depósitos (*Tabla 9 y 10*).

Otro aspecto que se puede observar perfectamente en la representación cualitativa de lo que ocurre en esta compuerta, es que la cantidad de agua derivada hacia la Zona Universitaria es mucho mayor, lo que también justifica que el volumen tratado por este tanque sea mayor que el de Doctors Dolsa.



Tabla 13. Volumen derivado C11 31_07_02

Flujo derivado a Zona Universitaria		Flujo d	erivado a Doctors	Dolsa	
Control S. (m ³)	Control G. (m ³)	Var. Vol. (%)	Control S. (m ³)	Control G. (m ³)	Var. Vol. (%)
82126	81425	-1%	79311	49313	-38%

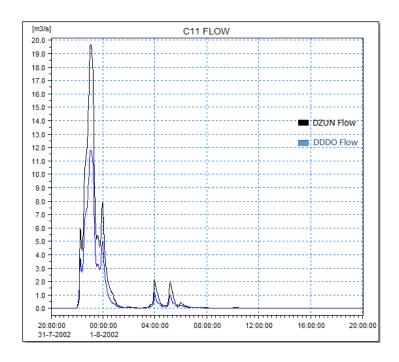


Gráfico 4. Caudal C11 31_07_02

Uno de los objetivos que debe conseguir el control es el aumento de la cantidad de agua tratada en la planta depuradora (*WWTP*). Como se puede observar a continuación, en la *Tabla 12*, se produce un aumento notable con la implementación de la nueva estrategia de control en lo que respecta al volumen de agua depurada, con una variación del 10 % siendo un avance positivo de la nueva implementación.

Tabla 14. Volumen WWTP 31_07_02

WWTP				
Control S. (m³) Control G. (m³) Var. Vol. (%)				
144303	158433	10%		



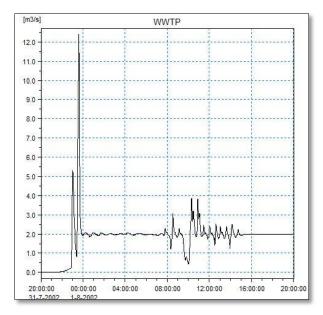


Gráfico 5. Caudal a WWTP 31_07_02

Otro de los objetivos marcados es la minimización de los vertidos al mar de *CSO*; esta mejoría se denota a continuación de forma cuantitativa en la *Tabla 13* y cualitativa observando la representación gráfica del flujo de *CSO* al mar en los dos links de salida presentes (*Grafico 5* y 6).

Tabla 16. Volumen CSO al mar 31_07_02

CSO				
Control S. (m³) Control G. (m³) Var. Vol. (%)				
643653	176062	-73%		



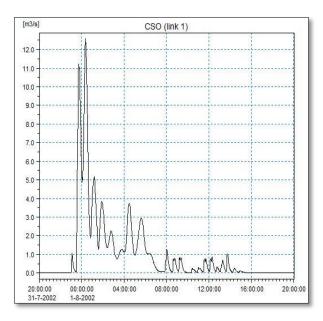


Gráfico 6. Caudal CSO al mar 31_07_02 (link 1)

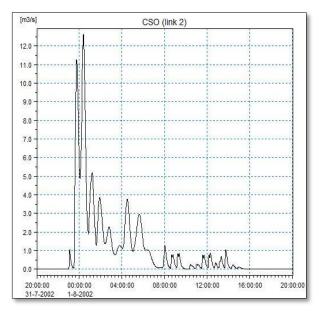


Gráfico 7. Caudal CSO al mar 31_07_02 (link 2)

Como se observa, la disminución de vertidos al mar sin paso previo por la planta de tratamiento, se disminuye hasta un 73% con respecto a la anterior metodología, lo cual; junto con el aumento, denotado con anterioridad, de la cantidad de agua depurada; determina una incrementación notable de la calidad de la nueva estrategia de control implementada para este evento de estudio.



5.2 Episodio de Iluvia 05/01/2006

De forma análoga a lo hecho para el análisis de los resultados del anterior episodio, se muestran en primer lugar los datos obtenidos de volúmenes tratados por ambos depósitos de retención de la red, así como la evolución del nivel de profundidad que alcanza el líquido dentro de ellos en cada instante:

Tabla 18. Volumen DZUN 05_01_06

Depósito Zona Universitaria				
Control S. (m³) Control G. (m³) Var. Vol. (%)				
62139	47293	-24%		

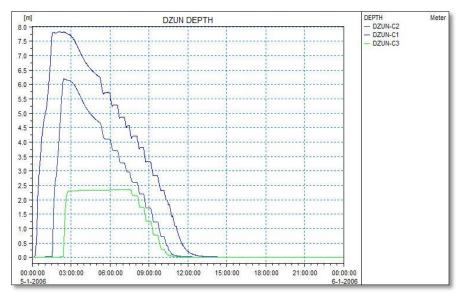


Gráfico 8. Profundidad DZUN 05_01_06

Tabla 20. Volumen DDDO 05_01_06

Depósito Doctors Dolsa			
Control S. (m³) Control G. (m³) Var. Vol. (%)			
11497 25841 125%			



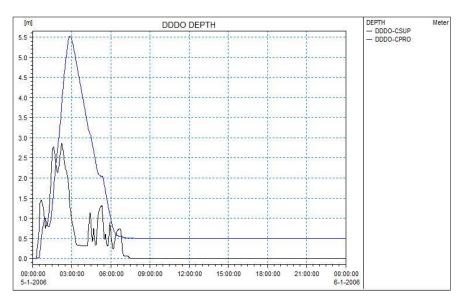


Gráfico 9. Profundidad DDDO 05_01_06

Como se observa en los datos previos, se ve claramente la disminución del volumen tratado por el depósito de Zona Universitaria frente a un aumento de más del doble de la cantidad gestionada por el tanque de Doctors Dolsa.

Esto tiene su justificación en lo que se muestra a continuación sobre lo que sucede en la compuerta derivacional C11. Centrándose en primer lugar en el DDDO; la estrategia de control ha pasado de no derivar caudal hacia la respectiva zona de la red, a dirigir un caudal notable; hecho que explica ese aumento exagerado del volumen tratado por el depósito de Doctors Dolsa con esta nueva estrategia de control.

Con respecto al tanque de Zona Universitaria; se justifica su comportamiento, con respecto al volumen tratado, apoyándose en lo mencionado anteriormente; se produce una disminución de la cantidad tratada ya que antes desde la compuerta C11 se dirigía todo el caudal cara este, pero ahora al derivar parte del flujo cara Doctors Dolsa por eso se produce la disminución del volumen gestionado por el DZUN.

Aún con todo esto el volumen enviado al depósito de Zona Universitaria sigue siendo mayor, como se puede observar cuantitativamente en la *Tabla 16* y cualitativamente en el *Gráfico 9* situándose la línea del flujo cara este último por encima en todo momento de la que representa el flujo cara el DDDO.



Tabla 22. Volumen derivado C11 05_01_06

Flujo derivado a Zona Universitaria			Flujo derivado a Doctors Dolsa		
Control S. (m ³)	Control G. (m³)	Var. Vol. (%)	%) Control S. (m³) Control G. (m³) Var. V		
29272	30478	4%	0	18004	-

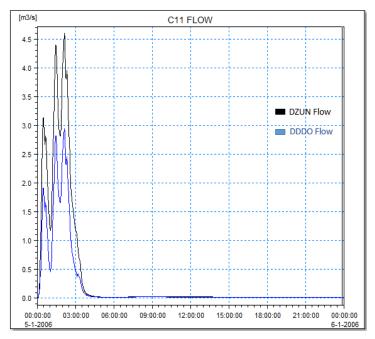


Gráfico 10. Caudal C11 05_01_06

A continuación se sigue con la evaluación de dos de los objetivos, como se hizo en el anterior episodio.

En primer lugar se analizan los resultados obtenidos para la planta de tratamiento. Claramente la mejora obtenida para este evento es muy pronunciada, consiguiendo tratar en la *WWTP* más del doble del volumen (*Tabla 17*) que con la anterior estrategia; siendo muy positiva la mejora debido al cambio del sistema de control.

Tabla 24. Volumen WWTP 05_01_06

WWTP				
Control S. (m ³)	Control G. (m ³)	Var. Vol. (%)		
77208	172891	124%		



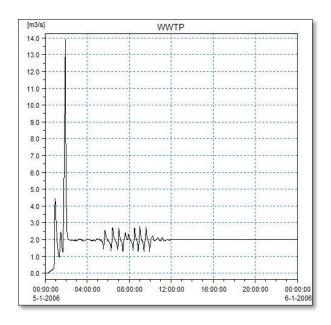


Gráfico 11. Caudal a WWTP 05_01_06

Por otra parte tenemos los vertidos al mar. También, al igual que con el anterior objetivo, se observa una mejora, no tan notable, pero un progreso con respecto al anterior método. Se recoge al igual que en el episodio previo, esa mejora de forma cuantitativa en la *Tabla 18* y de manera cualitativa el perfil de flujo cara el mar en los dos links que van dirección al medio ambiente en el *Grafico 11* y *12*.

Tabla 26. Volumen CSO al mar 05_01_06

CSO				
Control S. (m ³)	Control G. (m ³)	Var. Vol. (%)		
203353	159074	-22%		

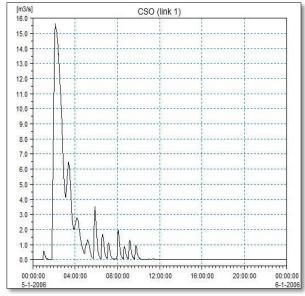


Gráfico 12. Caudal CSO al mar 05_01_06 link (1)



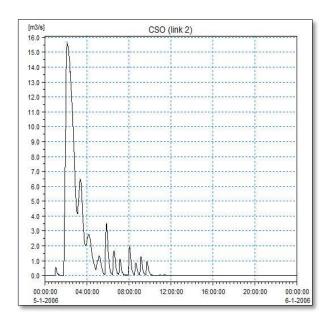


Gráfico 13. Caudal CSO al mar 05_01_06 link (2)

La disminución de los vertidos al mar se disminuye también de forma remarcable hasta un 22 % con respecto a la anterior metodología, lo cual; junto con el aumento, mostrado previamente, de la cantidad de agua depurada; determina de nuevo una mejoría notoria de la eficiencia y calidad de esta nueva estrategia de control global.



5.3 Episodio de Iluvia 12/09/2006

Por último, de manera similar a los dos episodios previos, se pasa a analizar el último test de estudio. Primeramente, se muestran cuantitativa y cualitativamente los datos obtenidos para ambos depósitos de retención.

Tabla 28. Volumen DZUN 12_09_06

Depósito Zona Universitaria				
Control S. (m ³) Control G. (m ³) Var. Vol. (%)				
213880	96775	-55%		

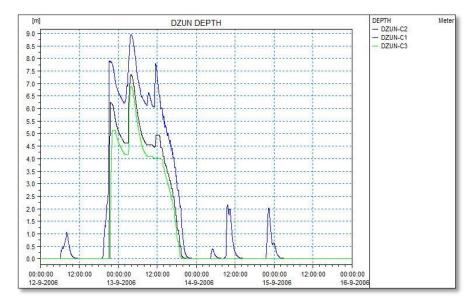


Gráfico 14. Profundidad DZUN 12_09_06

Tabla 30. Volumen DDDO 12_09_06

Depósito Doctors Dolsa			
Control S. (m³) Control G. (m³) Var. Vol. (%)			
51251	73257	43%	



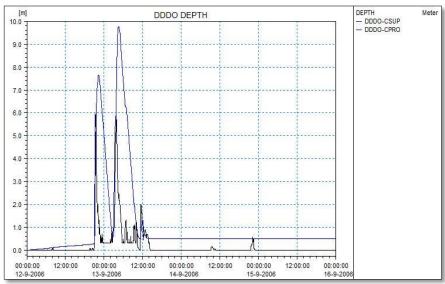


Gráfico 15. Profundidad DDDO 12_09_06

Como se observa en los datos, se ve claramente la disminución del volumen tratado por el depósito de Zona Universitaria, al igual que ocurría en el anterior evento, frente a un aumento de la cantidad gestionada por el tanque de Doctors Dolsa.

Como sucedió en los anteriores test, esto se justifica con lo que sucede en la compuerta derivacional C11. En primer lugar, analizando el depósito de Doctors Dolsa (DDDO); la nueva estrategia de control ha pasado a dirigir un caudal 145% mayor que el derivado anteriormente (*Tabla 21*); hecho que explica ese aumento del volumen tratado por el depósito de Doctors Dolsa con este nuevo sistema de modelado.

Con respecto al tanque de Zona Universitaria; sucede algo similar pero de forma inversa, es decir, el volumen derivado por la compuerta C11 hacia ese ramal es inferior a lo dirigido con la anterior estrategia (*Tabla 21*) por tanto por influencia directa de esta situación respecto al volumen total que gestiona este depósito (*Tabla 19*) se produce ese descenso en el volumen tratado por el depósito de Zona Universitaria (DZUN).

Aun pese a esto, como se muestra a continuación, el volumen dirigido a la Zona Universitaria sigue siendo superior al enviado a Doctors Dolsa; hecho que se observa con facilidad de forma cuantitativa en la siguiente tabla pero que es más costoso denotarlo en la gráfica respectiva ya que parecen coincidentes ambos perfiles, pero no lo son, ya que el flujo dirigido al DZUN es ligeramente superior.



Tabla 32. Volumen desviado C11 12_09_06

Flujo derivado a Zona Universitaria			Flujo de	rivado a Doctors	Dolsa
Control S. (m ³)	Control G. (m ³)	Var. Vol. (%)	(%) Control S. (m³) Control G. (m³) Var.		Var. Vol. (%)
138084	100023	-28%	26313	64528	145%

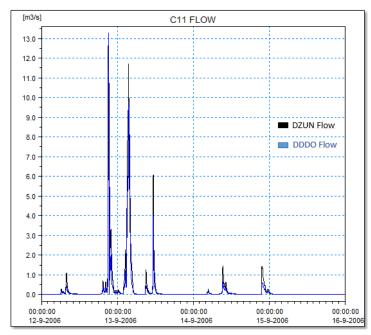


Gráfico 16. Caudal C11 12_09_06

Para terminar con la evaluación de los resultados, se continúa con la valoración del comportamiento de la *WWTP* y de los vertidos *CSO* al mar.

En primer lugar se analizan los resultados obtenidos para la planta de tratamiento. Otra vez tiene lugar una mejora notable, consiguiendo tratar en la *WWTP* una cantidad con una variación positiva del 51% (*Tabla 22*) con respecto a la anterior estrategia; siendo muy positiva esta mejora producida por la nueva metodología de Control Global.

Tabla 34. Volumen WWTP 12_09_06

WWTP				
Control S. (m ³)	Control G. (m³)	Var. Vol. (%)		
352418	531963	51%		



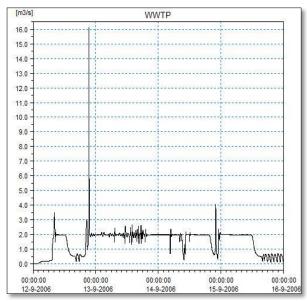


Gráfico 17. Caudal a WWTP 12_09_06

En cuanto a los *CSO* vertidos al mar, se observa también una mejoría remarcable. Esta mejora se muestra, al igual que en los anteriores test, de forma cuantitativa en la *Tabla 23* y de manera cualitativa mostrando el perfil de flujo cara el mar en los dos links que van dirección al medio ambiente en el *Grafico 17* y *18*.

Tabla 36. Volumen CSO al mar 12_09_06

CSO			
Control S. (m³) Control G. (m³) Var. Vol. (%			
740188	573836	-22%	

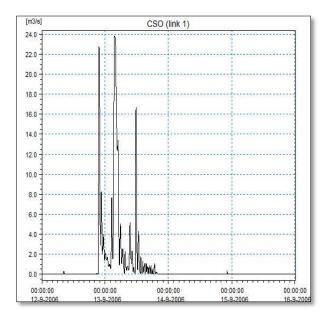


Gráfico 18.Caudal CSO al mar 12_09_06 (link 1)



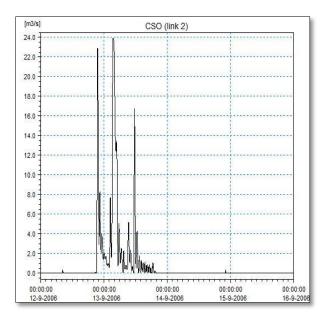


Gráfico 19. Caudal CSO al mar 12_09_06 (link 2)

Resumiendo, como se menciona previamente, la disminución de los vertidos al mar se disminuye de forma notoria hasta un 22 % con respecto a la anterior metodología, lo cual; junto con el aumento, mostrado previamente, de la cantidad dirigida a la *WWTP*; determina de nuevo una mejoría óptima de la eficiencia y calidad de esta nueva estrategia de control global.



5.4 Conclusiones de resultados

En las siguientes secciones se muestran las conclusiones de los resultados obtenidos para los diferentes casos de estudio incluyendo, como se mencionó anteriormente, una comparación entre una estrategia de control global CORAL frente a una de control simple local. Para esto se muestran gráficas comparativas y porcentajes de variación entre ambas de la cantidad de agua tratada por la *WWTP*, cantidad de *CSO* vertida al mar y los usos de los diferentes tanques de detención; así como, el control de nivel en los diferentes puntos de medida para evaluar las posibles inundaciones que se producen.

5.4.1 WWTP

Comparando el volumen tratado por la *WWTP* de las dos maneras citadas anteriormente, *Gráfico 20* y *21*; se puede observar claramente en las representaciones gráficas, que la cantidad procesada por la planta depuradora es mayor mediante la estrategia de control global; superando en los tres escenarios considerados a la cantidad tratada por el otro procedimiento de control. Esto ejemplifica que los resultados obtenidos son los esperados, produciendo una mejora con la nueva estrategia de modelado, reduciendo así la cantidad de agua no tratada y aumentando el caudal de esta hacia la planta de tratamiento para su posterior vertido de manera limpia y segura.

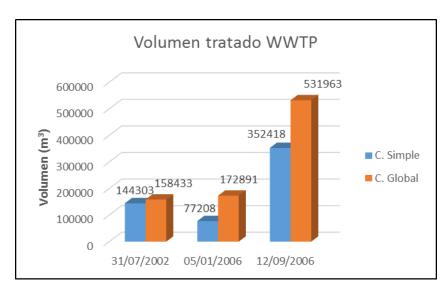


Gráfico 20. Comparativa Volumen tratado en WWTP



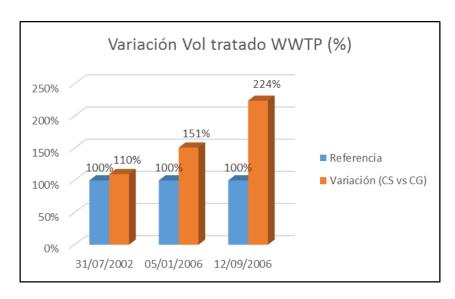


Gráfico 21. Variación del Volumen tratado en WWTP (%)

Con respecto a lo que acontece en la *WWTP* cabe comentar una situación no mencionada con anterioridad, y es que, si se observan los *Gráficos 5*, 11 y 17, que son los que muestran el flujo que entra a la planta de tratamiento, se ven claramente unos picos en los instantes iniciales muy superiores a $2^{m^3}/_s$, que como se citó en puntos anteriores es el límite impuesto a la entrada de la planta, debidos al PID.

Esta desviación se produce porque cuando el *set point* es menor que el caudal entrante (lo cual suele pasar al inicio de la simulación por imprecisión de los retardos en los primeros instantes) el PID empieza a abrir la compuerta, que no sirve de nada al ser menor el caudal entrante que el *set point*. Por consiguiente origina ese pico, porque si en un instante el caudal que entra aumenta rápidamente y la compuerta está muy abierta no puede cerrarse lo suficientemente rápido originando así que se cuele dicho pico de caudal. Cabe puntualizar que el sistema de control tiene la peculiaridad de que solo se actua cuando la señal está por encima de la consigna pero no cuando está por debajo y por eso es un "problema" de difícil solución.

5.4.2 CSO

Por lo que hace referencia a los vertidos de CSO al mar se nota una notable mejoría de esta nueva versión de CORAL, con la estrategia de control global se reduce en gran



cantidad los vertidos al mar en los tres escenarios evaluados como se puede observar en los *Gráficos 22 y 23*.

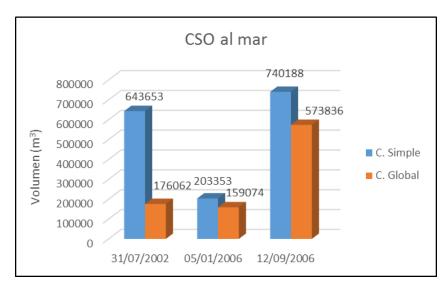


Gráfico 22. Comparativa volumen CSO al mar

En términos porcentuales (*Grafico 23*) se puede hacer una idea más representativa de la medida en la que disminuye eses vertidos al mar; reduciendo, por ejemplo, hasta casi cuatro veces la cantidad emitida para el evento del 31_07_02 como se muestra a continuación.

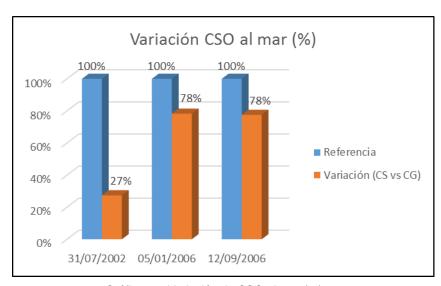


Gráfico 23. Variación de CSO al mar (%)



5.4.3 Volumen tratado por los tanques de detención

El volumen tratado por los dos tanques de detención presentes en la red; el de Zona Universitaria y el de Doctors Dolsa; pues se puede hacer algún comentario respecto a los respectivos depósitos.

En primer lugar se puede observar que el volumen gestionado por el tanque de Zona Universitaria es siempre mayor con la estrategia de control simple, como se fue observando en la evaluación de sus resultados en el estudio particular de cada uno de los eventos de Iluvia.

Por otra parte, centrándose en el comportamiento del tanque de Doctors Dolsa, se percibe claramente que con el control global CORAL, la cantidad de agua es superior para dos de los tres escenarios de estudio con una notable variación como se puede observar en los *Gráficos 24* y 25, con lo cual no se puede establecer algo concluyente.

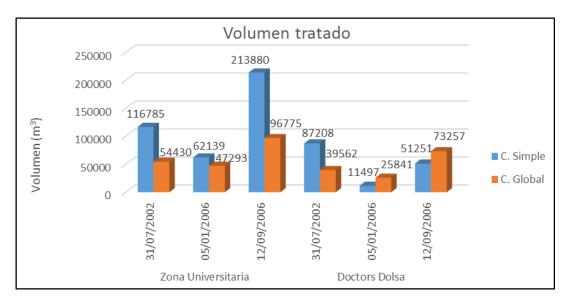


Gráfico 24. Volumen tratado por DZUN y DDDO



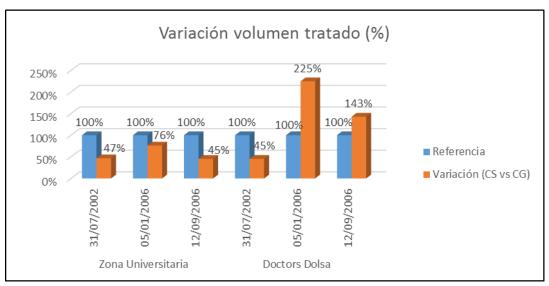


Gráfico 25. Variación del volumen tratado por DZUN y DDDO

5.4.4 Inundación en los puntos de control

Con respecto a las inundaciones producidas en la red para los diferentes casos se puede observar que no se produce aparentemente ningún problema en los diferentes puntos de control estudiados.

En primer lugar comentar que los valores negativos en los diferentes puntos de control hacen referencia a que el nivel de agua en la red es inferior al de la calle.

Entonces ya centrándose en el estudio de los resultados tabulados, se muestran las tablas donde se puede observar el único punto crítico (sombreado en rojo) que se produce en el evento del 31_07_02. Ese punto problemático es el L73. Está situado en la parte superior de la red aguas arriba de los tanques de detención con lo cual hacía difícil su gestión para evitar los desbordamientos ya que no se podía regular su flujo mediante las compuertas y los depósitos. Pero se ha conseguido una mejora (*Tabla 24*) en ese único punto donde se presentaban problemas en la anterior estrategia de control, ya que con el modelado de Control Global no tiene lugar la inundación que presentaba.



• Test 1: 31/07/2002

Tabla 38. Nivel del flujo en los puntos de control 31_07_02

	Control simple		Control global	
Medidor	Inund.Máx.	Tiempo Máx.	Inund.Máx.	Tiempo Máx.
L1	-5,46785	01/08/2002 0:07	-5,844	31/07/2002 23:27
L113	-6,32182	31/07/2002 23:16	-6,524	31/07/2002 23:05
L114	-4,85921	31/07/2002 23:16	-4,970	31/07/2002 23:05
L124	-3,28393	31/07/2002 23:53	-4,325	31/07/2002 22:23
L125	-10,57777	31/07/2002 23:53	-11,363	31/07/2002 23:08
L134	-4,56564	01/08/2002 0:01	-6,777	31/07/2002 23:14
L135	-7,25632	01/08/2002 0:02	-7,888	31/07/2002 23:26
L17	-2,63856	01/08/2002 0:15	-3,301	01/08/2002 0:22
L17a	-2,63731	01/08/2002 0:15	-3,300	01/08/2002 0:22
L36-P-RMB-E	-5,81996	01/08/2002 0:12	-5,893	31/07/2002 23:24
L50	-2,64096	01/08/2002 0:04	-3,166	31/07/2002 23:17
L6	-0,20471	01/08/2002 0:01	-2,283	31/07/2002 23:13
L73	0,578	31/07/2002 23:22	-4,112	31/07/2002 23:01
L74	-0,78414	31/07/2002 23:19	-3,426	31/07/2002 23:11
L76	-1,94031	31/07/2002 23:02	-3,763	31/07/2002 23:04
L77	-4,42955	31/07/2002 22:45	-4,979	31/07/2002 23:03
L91	-2,73573	31/07/2002 23:04	-6,516	31/07/2002 23:05
L92	-0,10304	31/07/2002 23:04	-3,957	31/07/2002 23:05
L93	-0,48641	31/07/2002 23:07	-2,568	31/07/2002 23:01
L94	-3,6219	31/07/2002 22:50	-4,139	31/07/2002 23:08
LN33	-1,46633	01/08/2002 0:13	-1,334	31/07/2002 23:30
LN35	-1,29172	01/08/2002 0:14	-1,054	31/07/2002 23:30
LVS1	-1,31098	01/08/2002 0:15	-2,167	31/07/2002 23:40
LVS11	-1,05686	01/08/2002 0:14	-0,731	31/07/2002 23:30

Test 2: 05/01/200

Tabla 39. Nivel del flujo en los puntos de control 05_01_06

	Control simple		Control global	
Medidor	Inund.Máx.	Tiempo Máx.	Inund.Máx.	Tiempo Máx.
L1	-7,037	05/01/2006 1:06	-5,756	05/01/2006 1:51
L113	-6,678	05/01/2006 1:01	-6,693	05/01/2006 1:30
L114	-5,136	05/01/2006 1:02	-5,148	05/01/2006 1:30
L124	-4,459	05/01/2006 0:28	-4,378	05/01/2006 4:33
L125	-11,477	05/01/2006 0:28	-11,421	05/01/2006 0:28
L134	-6,976	05/01/2006 1:07	-6,757	05/01/2006 1:30
L135	-8,093	05/01/2006 1:00	-7,755	05/01/2006 1:57
L17	-3,843	05/01/2006 1:51	-3,105	05/01/2006 2:08
L17a	-3,842	05/01/2006 1:51	-3,104	05/01/2006 2:08
L36-P-RMB-E	-6,185	05/01/2006 0:01	-6,185	05/01/2006 0:01
L50	-7,259	05/01/2006 1:04	-6,495	05/01/2006 2:08
L6	-2,425	05/01/2006 1:07	-2,266	05/01/2006 1:30
L73	-2,060	06/01/2006 0:00	-4,564	05/01/2006 2:06
L74	-4,335	05/01/2006 1:00	-4,208	05/01/2006 2:09
L76	-5,780	05/01/2006 1:30	-4,846	05/01/2006 2:08
L77	-5,408	05/01/2006 0:56	-5,233	05/01/2006 2:06
L91	-7,799	05/01/2006 0:22	-7,484	05/01/2006 5:22
L92	-4,656	05/01/2006 0:22	-4,485	05/01/2006 5:22
L93	-4,444	05/01/2006 0:57	-4,032	05/01/2006 2:06
L94	-5,421	05/01/2006 0:24	-5,126	05/01/2006 5:26
LN33	-2,861	06/01/2006 0:00	-1,243	05/01/2006 1:51
LN35	-2,555	06/01/2006 0:00	-0,986	05/01/2006 1:50
LVS1	-2,850	05/01/2006 1:46	-1,915	05/01/2006 2:04
LVS11	-2,225	06/01/2006 0:00	-0,662	05/01/2006 1:50



• Test 3: 12/09/2006

Tabla 40. Nivel del flujo en los puntos de control 12_09_06

	Control simple		Contr	ol global
Medidor	Inund.Máx.	Tiempo Máx.	Inund.Máx.	Tiempo Máx.
L1	-5,67362	12/09/2006 21:14	-5,213	12/09/2006 21:30
L113	-6,39687	13/09/2006 3:47	-6,324	12/09/2006 21:13
L114	-4,90064	13/09/2006 3:47	-4,861	12/09/2006 21:13
L124	-4,36831	13/09/2006 3:49	-4,297	13/09/2006 11:23
L125	-11,2728	13/09/2006 3:49	-11,264	12/09/2006 21:12
L134	-5,27845	12/09/2006 21:15	-5,883	12/09/2006 21:15
L135	-6,81335	12/09/2006 21:13	-7,175	12/09/2006 21:08
L17	-2,70176	13/09/2006 3:47	-2,635	13/09/2006 3:32
L17a	-2,70053	13/09/2006 3:47	-2,634	13/09/2006 3:32
L36-P-RMB-E	-5,85402	13/09/2006 4:03	-5,848	13/09/2006 4:22
L50	-2,95059	13/09/2006 3:49	-2,925	13/09/2006 4:10
L6	-1,09613	12/09/2006 21:15	-1,654	12/09/2006 21:14
L73	-2,94133	13/09/2006 3:45	-4,219	12/09/2006 21:12
L74	-3,73507	13/09/2006 3:45	-3,734	12/09/2006 21:12
L76	-3,38164	12/09/2006 21:15	-3,776	13/09/2006 3:36
L77	-4,39872	12/09/2006 21:11	-4,421	12/09/2006 21:10
L91	-4,75591	12/09/2006 21:17	-3,930	13/09/2006 3:39
L92	-1,98175	12/09/2006 21:17	-1,398	13/09/2006 3:39
L93	-1,51261	12/09/2006 21:16	-1,505	13/09/2006 3:37
L94	-3,82032	12/09/2006 21:19	-3,798	13/09/2006 3:40
LN33	-1,65454	13/09/2006 3:45	-0,825	12/09/2006 21:25
LN35	-1,46615	13/09/2006 3:45	-0,582	12/09/2006 21:24
LVS1	-1,42592	13/09/2006 3:45	-1,313	13/09/2006 3:39
LVS11	-1,22416	13/09/2006 3:45	-0,261	12/09/2006 21:24

5.5 Conclusiones finales

Por tanto haciendo un resumen final de todas las conclusiones obtenidas tras la obtención de resultados, se puede concluir que en los tres casos de estudio la estrategia de control global de CORAL mejora los objetivos propuestos.

Por una parte la cantidad de agua tratada por la *WWTP* es mayor. El incremento se muestra con respecto a un 100% que es la estrategia de control simple

Test 1 : 110%Test 2 : 151%Test 3 : 224%

En segundo lugar cabe destacar la mejora en otro de los objetivos, que era la reducción de la cantidad de agua residual vertida al mar (CSO), con respecto a la obtenida por la anterior estrategia de control:



- Test 1: reducción de un 73%
- Test 2: reducción de un 22%
- Test 3: reducción de un 22%

Por otra parte, la cantidad de agua almacenada en los tanques se ha reducido en las tres experiencias para el tanque de Zona Universitaria (Test 1: 53%, Test 2: 24% y Test 3: 55%) mientras que para el depósito de retención de Doctors Dolsa el comportamiento no es lineal, sino que, se produce una disminución del 55% para el evento del día 31/07/2002 mientras que en las otras dos situaciones el aumento es considerable (Test 2: 125 % y Test 3: 43%)

Finalmente, señalar la mejora de todas las situaciones problemáticas de inundación en los diferentes puntos de control, obteniendo así una red que no presenta inundación alguna en los diferentes elementos de medida reduciendo así ostensiblemente la cantidad de agua desbordada a la calle.

En resumen, se concluye que la evolución de la herramienta ha sido positiva en todos los objetivos propuestos en un punto inicial, terminando así el proyecto de manera exitosa y favorable.



6 Propuesta de futuras mejoras

6.1 Mejora de retención en línea en CORAL

Una de las posibles mejoras a implementar en las siguientes versiones de CORAL concierne a la retención en línea. Se incluirá la modificación de los tanques virtuales que están antes de donde tiene lugar la retención en línea para solventar el efecto "backwater" o agua estancada. Este es el efecto que un elemento tiene en el aumento del nivel del agua, aguas arriba de este.

En este caso el tanque real DL es el que representa el volumen que la red retiene en línea y que provoca ese cambio de nivel aguas arriba del. Los tanques virtuales que le preceden son el V_{10} y V_{11} ; que son esos elementos donde se deberían realizar las modificaciones para solucionar el problema citado.

6.2 Suavizar las acciones de control

En la actual versión de CORAL, las acciones de control están solo limitadas por los límites operacionales de las compuertas. Esto implica que no hay restricciones en los movimientos de las compuertas de un paso a otro. Esto podría generar movimientos repentinos perjudiciales para ellas. Con el fin de suavizar estas respuestas se debe añadir un criterio adicional en la función multiobjetivo que trate de penalizar el movimiento excesivo de una compuerta entre un instante y el siguiente.

6.3 Dinamización de los colectores

En esta versión actual se ha supuesto que el flujo de entrada y salida en los colectores es el mismo sin ninguna variación intermedia. Con lo que, una de las mejoras a introducir en posteriores versiones, es que se tenga en cuenta el comportamiento real del colector considerando un comportamiento dinámico. Esto quiere decir, que la transición entre inflow y outflow tiene que depender de las constantes dinámicas del sistema, viéndose como tales; ganancias, constantes de tiempo o retardos del proceso.



6.4 Desbordamientos por altura

Otra de las posibles mejoras a introducir en posteriores versiones es la de tener en cuenta las inundaciones por altura. En esta versión de CORAL solo se han evaluado los desbordamientos producidos por el flujo, es decir, solo se tienen en cuenta aquellos flujos superiores a un máximo establecido en términos de caudal. En esta mejora a introducir, a mayores de términos volumétricos, se pretenderá valorar estas inundaciones teniendo en cuenta las alturas del líquido presentes en los colectores, así como, un límite que marcará la altura máxima permitida en cada compuerta.

6.5 Optimización multiobjetivo sin pesos: Optimización lexicográfica

Para obtener los resultados de la optimización multicrerio de esta versión de CORAL se ha utilizado como se explicó y mostró en puntos anteriores la optimización por pesos. Por lo tanto una posible mejora para futuras versiones es la utilización de otros métodos de obtención de resultados, concretamente optimización lexicográfica.

Para la optimización lexicográfica se deben definir órdenes de prioridad para los diferentes objetivos. Este tipo de optimización, para una serie de objetivos, consiste en llevar a cabo una optimización para cada uno de ellos. Una vez dado ese orden de prioridad, cuando un objetivo ya está minimizado o maximizado se añaden una serie de constantes al problema de optimización para evitar una variación en ese valor óptimo encontrado. Tras esto se continúa con la búsqueda de los valores óptimos restantes de los otros objetivos con los cuáles se hará un proceso análogo.

Para ejemplificar de manera matemática lo explicado, se aplica este método de optimización a los objetivos de estudio. Se le da a estos el siguiente orden de prioridad:

- CSO
- WWTP
- Safety

La solución x^* del problema de optimización lexicográfica se computa de la siguiente forma.



En primer lugar:

$$x_{CSO}^* = \arg\min_{x} F_{CSO}(x), \ x^* := x_{\Delta}^*$$

s.t.: Network dynamics.

$$x_{WWTP}^* = \arg\min_{\mathbf{x}} F_{WWTP}(\mathbf{x}),$$

s.t.: Network dynamics.

$$F_{CSO}(x) \le F_{CSO}(x_{CSO}^*)$$

$$x_{Safe}^* = \arg\min_{\mathbf{x}} F_{Safe}(\mathbf{x}),$$

s.t.: Network dynamics.

$$F_{CSO}(x) \le F_{CSO}(x_{cso}^*)$$

$$F_{WWTP}(x) \le F_{WWTP}(x_{WWTP}^*)$$

$$x_{\Delta}^* = \arg\min_{\mathbf{x}} F_{\Delta}(\mathbf{x}),$$

s.t.: Network dynamics.

$$F_{CSO}(x) \le F_{CSO}(x_{CSO}^*)$$

$$F_{WWTP}(x) \le F_{WWTP}(x_{WWTP}^*)$$

$$F_{Safe}(x) \le F_{Safe}(x_{Safe}^*)$$

Finalmente,

$$x^* := x^*_{\Lambda}$$



Conclusiones

Las principales conclusiones que se extraen del estudio del "Control Óptimo Predictivo de Redes de Alcantarillado" con la herramienta CORAL son:

- Los objetivos del control óptimo predictivo en la gestión de redes de alcantarillado están relacionados con la protección del medio ambiente. Como se citó, esta estrategia se aplica para establecer, antes de tiempo, las estrategias posibles para proporcionar el mejor estado del sistema. Esto como se comprueba en el proyecto, es llevado a cabo con total éxito por CORAL. Esta herramienta tiene la capacidad de construir los modelos a tiempo real de la cuenca de estudio, usando los componentes existentes en la biblioteca de CORAL e incluyendo correctamente todos los elementos, establece así una estrategia de control exitosa.
- CORAL había sido comprobado con anterioridad de manera exitosa en diferentes escenarios, concretamente, en otras 2 zonas de Barcelona y en Murcia. Los resultados de este proyecto contribuyen al desarrollo de esta herramienta para su posterior comercialización y aplicación a posteriores cuencas. Nuevos sistemas de alcantarillado como el de Badalona o Burdeos (Francia) están comenzando a gestionarse mediante CORAL.
- En lo relativo a los resultados finales obtenidos, se puede decir, que son muy exitosos, a la par que prometedores para la cumplimentación de lo mencionado con anterioridad. Con la nueva versión de CORAL se ha conseguido mejorar, al mismo tiempo, la minimización de CSO, prevención de desbordamientos en la red y una mayor eficiencia en el uso de la WWTP, en comparación con la estrategia de control local que está actualmente vigente en CLABSA. Por tanto, la mejora que proporciona esta herramienta es notoria ya que, como se cita, las estrategias de control predictivo vigentes para redes de alcantarillado son ampliamente mejoradas.



Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis tutores, Vicenç Puig y Bernat Joseph por su orientación a lo largo de todos estos meses, por haberme dado la oportunidad de poder acabar mi formación formando parte de este grupo de investigación, del cual; me llevo muchas experiencias y nuevos conocimientos en gran parte gracias a su confianza y esfuerzo que han puesto en mi aprendizaje.

En segundo lugar, dar las gracias a toda mi familia: mis padres, mi hermano y mis abuelos. Sin ellos no sería posible la realización de este proyecto ya que ellos fueron los que dieron la oportunidad de poder estar en esta ciudad y a posteriori tener la suerte de formar parte de este grupo apoyándome en todo momento con mis decisiones.

También quiero dar las gracias a todos mis amigos y mis compañeros de la Universidad de Santiago de Compostela y de la Politècnica de Catalunya: por todos los buenos momentos pasados durante estos años, y por todo el apoyo recibido para continuar trabajando y así poder llegar hasta este punto.

Finalmente, por supuesto, dar las gracias a todo el personal del Instituto de Robótica e Informática Industrial (IRI) por el buen trato recibido durante este tiempo; desde mis compañeros de despacho, pasando por el director Carlos Ocampo, hasta los miembros de secretaría.

A toda esta gente, muchas gracias.



Referencias

- GABRIELA CEMBRANO GENNARI, JOSEBA-JOKIN QUEVEDO CASÍN, MARIA SALAMERO SANSALVADO, VICENÇ PUIG CAYUELA, JAUME FIGUERAS JOVÉ. Optimal control of urban drainage systems: a case study.
- V. PUIG, G. CEMBRANO, J. ROMERA, J. QUEVEDO, B. AZNAR, G. RAMÓN AND
 J. CABOT. Predictive optimal control of sewer networks using CORAL tool: application to Riera Blanca catchment in Barcelona.
- IRI, UPC y CLABSA "AM0619 Phase II: Optimum Control of Urban Drainage System"
- BERNAT JOSEPH I DURAN. Hybrid Modelling and Receding Horizon Control of Combined Sewer Networks. Barcelona, 2014.
- H. CARVALHO, P. DEL MORAL, A. MONIN, and G. SALUT. Optimal nonlinear filtering in gps/ins integration. IEEE-Trans. on Aerospace and electronic systems, 33(3):835–850 (1997).
- BYEONGIL KIM, GREGORY N WASHINGTON and HWAN-SIK YOON. Hysteresisreduced dynamic displacement control of piezoceramic stack actuators using model predictive sliding mode control.
- CHANGBIN HU, SHANNA LUO, ZHENGXI LI, XIN WANG and LI SUN. Energy Coordinative Optimization of Wind-Storage-Load Microgrids Based on Short-Term Prediction.
- RAMÓN, G., ESCALER, I., VERDEJO, JM. Data Acquisition in a Combined Sewer System
- MISGANA K. MULETA and PAUL F. BOULOS. Multiobjective Optimization for Optimal Design of Urban Drainage Systems.



- DULEY M. ABRAHAM, REINI WIRAHADIKUSUMAH, T. J. SHORT, and SHAHPOR SHAHBAHRAMI. Optimization Modeling for Sewer Network Management
- MARIO REGNERI, KAI KLEPISZEWSKI, MANFRED OSTROWSKI, PETER A.
 VANROLLEGHEM. Fuzzy Decision Making for Multi-criteria Optimization in Integrated Wastewater System Management
- JING ZHANG, JUNSHI HE, JING TIAN. The Optimization Plan of Urban Drainage System of Shenyang City
- MANFRED SCHÜTZE, ALBERTO CAMPISANO, HUBERT COLAS, WOLFGANG SCHILLING, PETER A. VANROLLEGHEM. Real time control of urban wastewater systems—where do we stand today?

