



Luís Filipe de Oliveira Girão

CONTROLO EM TEMPO REAL DAS DESCARGAS DE EMERGÊNCIA DOS SISTEMAS DE DRENAGEM

REAL-TIME CONTROL OF COMBINED SEWER OVERFLOWS IN DRAINAGE SYSTEMS

Dissertação de Mestrado em Gestão Sustentável do Ciclo Urbano da Água
orientada pelo Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e pelo Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques

Coimbra, 9 de Março de 2018



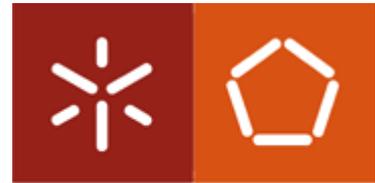
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Universidade do Minho
Escola de Engenharia



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luís Filipe de Oliveira Girão

CONTROLO EM TEMPO REAL DAS DESCARGAS DE EMERGÊNCIA DOS SISTEMAS DE DRENAGEM

REAL-TIME CONTROL OF COMBINED SEWER OVERFLOWS IN DRAINAGE SYSTEMS

Dissertação de Mestrado em Gestão Sustentável do Ciclo Urbano da Água
orientada pelo Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e pelo Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 9 de Março de 2018

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques, a minha profunda gratidão pela forma permanente e incondicional que caracterizou o seu apoio e orientação durante todo o período de elaboração desta dissertação. Os seus esclarecimentos e motivação foram essenciais para a concretização deste trabalho.

Ao Lucas Maluf, investigador do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, pelos esclarecimentos prestados no decorrer deste estudo.

Aos meus Pais, pela força e incentivo que sempre me deram.

Este trabalho não teria sido possível sem o projeto CENTAUR, que está integrado no programa de investigação e inovação da União Europeia Horizonte 2020 sob o *Grant agreement* n.º 641931.

RESUMO

O processo de urbanização e as alterações climáticas têm vindo a manifestar-se com progressiva notoriedade a nível global. Um dos impactes mais generalizados e significativos provocados por estes processos será o aumento da frequência e da gravidade das inundações urbanas, que possuem o potencial de afetar a vida de milhares de cidadãos. Por outro lado, o número de descargas de emergência também irá aumentar, colocando em causa a qualidade das massas de águas superficiais, podendo conduzir a incumprimentos legais. Nesse sentido, verifica-se que existe um conjunto de novos desafios que são colocados à sociedade relativamente à drenagem de água em meios urbanos e que carecem de uma solução que integre os princípios do desenvolvimento sustentável.

Atualmente, estão a surgir grandes avanços ao nível de informática, comunicações e inteligência artificial, o que desperta novas perspetivas na gestão dos sistemas de água, nomeadamente no controlo em tempo real.

O projeto CENTAUR pretende ser um sistema de controlo em tempo real económico, descentralizado e autónomo (autoaprendizagem) que aproveita o espaço disponível e já existente nos coletores. Apresentando um baixo custo e com infraestrutura mínima, pode ser instalado gradualmente em sistemas de drenagem para lidar com locais de alto risco de inundação e/ou descargas de emergência e desta forma permitir que as entidades gestoras e as autoridades locais adotem uma abordagem adaptativa para gestão de risco nas suas bacias.

O objetivo desta dissertação consiste em adaptar o dispositivo de controlo em tempo real desenvolvido no projeto CENTAUR e estudar a respetiva viabilidade na diminuição do número de descargas de emergência e na redução do volume de água descarregado.

Palavras-chave: drenagem urbana; controlo em tempo real; descargas de emergência.

ABSTRACT

The process of urbanization and climate change have become increasingly global. One of the most widespread and significant impacts of these processes will be the increasing frequency and severity of urban flooding, which has the potential to affect the lives of thousands of citizens. On the other hand, the number of combined sewer overflows will also increase, putting at risk the quality of surface water bodies, which could lead to legal defaults. Thus, there is a set of new challenges that are posed to society regarding urban water drainage and that need a solution that integrates the principles of sustainable development.

Currently, great advances are being made in data processing, communications and artificial intelligence, which brings up new perspectives in the water management systems, namely in real-time control.

The CENTAUR project aims to be an economic, decentralized and autonomous real-time control system (self-learning) that takes advantage of available and existing space in the collectors. Offering a low cost and minimal infrastructure, it can be gradually installed in drainage systems to deal with high-risk floodplains and/or combined sewer overflows and thus allow management entities and local authorities to adopt an adaptive management approach in their basins.

The objective of this dissertation is to adapt the real-time control device developed in the CENTAUR project and to study its feasibility in reducing the number of combined sewer overflows and reducing the volume of discharged water.

Keywords: urban drainage, real-time control; combined sewer overflow.

ÍNDICE

1	Enquadramento.....	9
1.1	Considerações gerais.....	9
1.2	Objetivos.....	11
1.3	Estrutura da Dissertação	11
2	Revisão Bibliográfica.....	12
2.1	Drenagem Urbana	12
2.1.1	Tipos de água.....	12
2.1.2	Tipos de sistemas.....	13
2.1.3	Impactes da urbanização e das alterações climáticas	15
2.1.4	Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável	17
2.1.5	<i>Combined Sewer Overflows</i>	19
2.1.6	Impacte da primeira descarga (<i>first flush</i>).....	20
2.1.7	Enquadramento legal de descargas no meio hídrico	21
2.2	Controlo em Tempo Real de sistemas de drenagem.....	23
2.2.1	Considerações gerais	23
2.2.2	Sistema de Controlo em Tempo Real.....	24
2.3	Modelação de sistemas de drenagem.....	27
2.3.1	Precipitação	28
2.3.2	Modelação hidrológica	29
2.3.3	Modelação hidráulica	30
2.4	Principais estudos realizados sobre Controlo em Tempo Real em sistemas de drenagem.....	31
2.5	O projeto CENTAUR	33
3	Metodologia	36
3.1	Caso de estudo	36

3.2	Plataforma de modelação	39
4	Apresentação e discussão dos resultados	43
4.1	Análise de sensibilidade.....	43
4.2	Modelo de Controlo em Tempo Real	44
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	56
	Referências Bibliográficas.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Hidrograma de bacia rural e bacia urbana.....	16
Figura 2.2 – Principais pilares dos SUDS.	18
Figura 2.3 – Principais vantagens dos SUDS.	19
Figura 2.4 – Impacte da primeira descarga.	21
Figura 2.5 – Principais objetivos de um SCTR em sistemas de drenagem.	25
Figura 2.6 – Esquema de funcionamento do ciclo <i>feedforward</i> (medição da alteração) e <i>feedback</i> (medição do processo).....	26
Figura 2.7 – Conceito de escoamento superficial incorporado no SWMM.	30
Figura 2.8 – Parceiros do projeto CENTAUR.....	33
Figura 2.9 – Funcionamento do sistema CENTAUR.	34
Figura 3.1 – População servida por sistemas de drenagem de águas residuais no Município de Coimbra.	36
Figura 3.2 – Zona central e identificação da localização do CSO.....	37
Figura 3.3 – Avaliação do volume disponível para armazenamento de água.	38
Figura 3.4 – Representação da rede de drenagem 1D no SWMM.	41
Figura 3.5 – Registo fotográfico efetuado no interior do coletor a montante do CSO.....	42
Figura 4.1 – Análise de sensibilidade ao parâmetro <i>MaxDepth</i>	43
Figura 4.2 – Análise de sensibilidade ao parâmetro <i>MinGateOpening</i>	44
Figura 4.3 – Caudal descarregado pelo CSO (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Fevereiro de 2016.	46
Figura 4.4 – Caudal escoado até à ETAR (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Fevereiro de 2016.	47
Figura 4.5 – Altura de água a montante do FCD (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Fevereiro de 2016.	48
Figura 4.6 – Caudal descarregado pelo CSO (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Setembro de 2016.	50
Figura 4.7 – Caudal escoado até à ETAR (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Setembro de 2016.	51
Figura 4.8 – Altura de água a montante do FCD (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Setembro de 2016.	52

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos resultados quantitativos relativos aos meses de Fevereiro e Setembro do ano 2016.	53
Quadro 2 – Resumo dos resultados quantitativos relativos ao ano 2016.	54

ABREVIATURAS

1D – Modelo a uma dimensão

CENTAUR – *Cost Effective Neural Technique for Alleviation of Urban Flood Risk*

CSO – *Combined Sewer Overflow*

CTR – Controlo em Tempo Real

DQA – Diretiva Quadro-Água

EPA – *Environmental Protection Agency*

ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

FCD – *Flow Control Device*

NQA – Normas de Qualidade Ambiental

RGSPDADAR – Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais

SCTR – Sistema de Controlo em Tempo Real

SUDS – Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável

SWMM – *Storm Water Management Model*

UE – União Europeia

VLE – Valor Limite de Emissão

WWTP – *Wastewater Treatment Plant*

1 ENQUADRAMENTO

1.1 Considerações gerais

O processo de urbanização e as alterações climáticas têm vindo a manifestar-se com progressiva notoriedade, induzindo um aumento do caudal escoado nas redes de drenagem, que por sua vez provoca um aumento da ocorrência de inundações, de descargas de emergência e dos encargos com energia e tratamento.

O aumento do fluxo migratório para zonas urbanas tem provocado uma utilização excessiva das infraestruturas e serviços prestados, o que implica uma intensificação dos problemas associados à gestão da água em meios urbanos.

Perante condições hidrológicas extremas os órgãos integrados nas redes de drenagem tornam-se vulneráveis e sofrem uma redução da eficiência, podendo até deixar de cumprir a respetiva função. Nesse sentido, novos desafios são colocados à sociedade relativamente à drenagem de água em meios urbanos.

A utilização da água por parte das populações implica a produção de águas residuais constituídas por elevadas quantidades de matéria orgânica, bem como, matérias poluentes nocivas à saúde pública. Deste modo, estas devem ser conduzidas pela rede de drenagem, tratadas numa estação de tratamento e por fim devolvidas ao meio recetor. Por outro lado, a precipitação origina escoamentos superficiais que devem ser devidamente controlados e conduzidos, caso contrário, poderão originar inundações com consequências drásticas para as populações (Sá Marques et al., 2013).

Geralmente uma rede de drenagem inclui um dispositivo denominado descarregador de emergência ou na linguagem anglo-saxónica CSO – *Combined Sewer Overflow* (doravante designado apenas por CSO), onde é libertada uma parte do caudal afluente e conduzida até ao meio hídrico com capacidade de a receber. Desta forma, existe a garantia de que a capacidade hidráulica das infraestruturas dispostas a jusante do CSO não é excedida (como por exemplo, a estação de tratamento de água residual).

As descargas que ocorrem em CSO têm vindo a ser reconhecidas como um grave problema ambiental em muitos países. Estes eventos podem resultar na deposição de elevadas

concentrações de microrganismos patogénicos, sólidos, detritos e poluentes tóxicos no meio recetor, bem como provocar um défice de oxigénio (através do efeito da presença de componentes orgânicos degradáveis), causando problemas significativos de saúde pública, *stress* nos organismos aquáticos e problemas relacionados com a qualidade da água (Mailhot *et al.*, 2015). Consequentemente, o aumento dos eventos de precipitação extrema induz um aumento do número de descargas dos CSO, colocando em risco a qualidade das águas e dos habitats onde essas descargas ocorrem.

Um CSO apresenta maior relevância nos sistemas de drenagem unitários, onde as águas residuais escoam conjuntamente com as águas pluviais numa única rede. De facto, verifica-se que existem muitos centros urbanos antigos drenados por sistemas unitários, tanto na Europa como nos Estados Unidos. Portugal não constitui uma exceção e apesar de o Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (RGSPDADAR) definir que os novos sistemas de drenagem criados têm que ser separativos (água residual e água pluvial escoam em redes distintas), os sistemas existentes em cidades mais antigas são, em alguns casos, unitários.

No ano 2000 a União Europeia adotou a Diretiva-Quadro Água (DQA) cujo âmbito de atuação se centra na gestão e proteção dos recursos hídricos. A DQA estabelece um quadro para o desenvolvimento de políticas integradas de gestão da água, pelos órgãos comunitários e pelas administrações nacionais e regionais dos Estados – Membros. Desta forma, pretende-se garantir o bom estado químico das massas de água, subterrâneas ou de superfície, em toda a Europa, impondo limites à concentração de poluentes na água. Nesse sentido, torna-se fulcral estudar e implementar soluções que permitam dar uma resposta efetiva aos problemas atualmente enfrentados pela drenagem de água em meios urbanos, entre os quais se destaca a problemática de carácter ambiental e de saúde pública das descargas que ocorrem em CSO.

Geralmente os sistemas de drenagem urbana são projetados segundo uma lógica conservadora, sendo considerados fatores de segurança que originam coletores de maior dimensão do que a estritamente necessária. Assim, o Controlo em Tempo Real (doravante designado apenas por CTR) de sistemas de drenagem urbana pode constituir uma opção para maximizar a utilização do volume de armazenamento já existente na rede (através da introdução de comportas nos coletores que respondem de forma dinâmica às condições de escoamento verificadas em cada instante, por exemplo) e evitar assim a introdução de alterações dispendiosas na rede existente, o que se pode traduzir numa alternativa viável e promissora.

Neste contexto, o projeto CENTAUR - *Cost Effective Neural Technique for Alleviation of Urban Flood Risk*, financiado pelo programa Horizonte 2020 da União Europeia, pretende ser um sistema de CTR económico, descentralizado e autónomo (autoaprendizagem) que aproveita o espaço disponível e já existente nos coletores. Neste projeto foi desenvolvido um

dispositivo de controlo de caudal ou *flow control device* (doravante designado apenas por FCD) e um algoritmo com o propósito de mitigar as inundações.

Por sua vez, no estudo aqui apresentado este dispositivo inovador e autónomo e o respetivo algoritmo foram testados e adaptados, por forma a obter uma diminuição do volume e número de descargas ocorridas no CSO, reduzindo assim drasticamente o impacte ambiental provocado no meio hídrico recetor.

1.2 Objetivos

Com vista ao cumprimento das orientações que constam na DQA relativamente à proteção dos recursos hídricos, o CTR pode assumir um papel determinante na mitigação dos impactes causados pelas descargas que ocorrem nos CSO, designadamente através de um FCD. Nesse sentido, esta dissertação apresenta os seguintes principais objetivos:

- adaptar o FCD desenvolvido no projeto CENTAUR com o propósito de reduzir o número e o volume de descargas de emergência quando integrado num sistema unitário;
- efetuar uma análise de sensibilidade aos parâmetros envolvidos na adaptação do controlo do FCD, ao problema da redução das descargas de emergência;
- modelar e analisar o comportamento da rede de drenagem com e sem FCD ao longo de um ano completo, num estudo de caso real em Coimbra, Portugal;
- avaliar o impacto do FCD na diminuição do número de descargas de emergência e na redução do volume de água descarregado (no mesmo estudo de caso real).

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos temáticos. No primeiro capítulo efetua-se um enquadramento do tema e definem-se os objetivos do estudo. O segundo capítulo inclui uma revisão bibliográfica do tema em análise, onde se abordam os conceitos mais importantes e os estudos já efetuados por outros autores. No terceiro capítulo é descrita a metodologia utilizada para a simulação da rede de drenagem analisada, nomeadamente, as opções tomadas, os parâmetros considerados e os *softwares* utilizados. No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados do caso de estudo.

Por fim, no quinto e último capítulo encontram-se as conclusões, bem como são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Drenagem Urbana

A atividade humana origina a deposição de resíduos e poluentes nas bacias de drenagem, que são arrastados pelo escoamento superficial que se forma durante os eventos de precipitação. Por sua vez as águas residuais domésticas ou industriais também apresentam a sua preponderância, enquanto consequência da carga poluente que carregam (Barbosa *et al.*, 2012).

Por outro lado, a captação de água do ciclo natural para fins diversos e a impermeabilização da superfície do solo decorrente do processo de urbanização, também induzem alterações significativas no percurso natural da água proveniente das chuvas (Butler e Davies, 2011).

Nos subcapítulos seguintes serão enunciados com maior detalhe os principais conceitos inseridos neste âmbito.

2.1.1 Tipos de água

Fundamentalmente, os sistemas de drenagem de água promovem o escoamento de dois tipos: águas residuais e águas pluviais.

A água residual constitui o resultado da utilização da água pela população para fins domésticos e industriais. Se não for drenada e tratada convenientemente, este tipo de água pode originar problemas de poluição e de saúde.

As águas residuais domésticas são provenientes de instalações sanitárias, cozinhas e zonas de lavagem de roupas, entre outros. Tipicamente contêm quantidades elevadas de matéria orgânica facilmente biodegradável e as suas características mantêm-se ao longo do tempo.

Por sua vez, as águas residuais industriais decorrem da atividade das indústrias e possuem compostos químicos que variam consoante o tipo de indústria e os processos de fabrico (Sá Marques e Sousa, 2008). Nesse sentido, as suas características apresentam uma grande

variabilidade ao longo do tempo, sendo, por isso, o seu tratamento bastante específico e deve ser analisado caso a caso.

As águas pluviais resultam da precipitação atmosférica e conseqüente formação de escoamento superficial. Se não for devidamente controlado, este fenómeno pode provocar inundações e conseqüentemente, danos materiais e humanos.

Com base nos fundamentos anteriormente visados, os sistemas de drenagem são projetados para receber estes dois tipos de água, com o objetivo de minimizar os problemas associados à população e ao ambiente.

2.1.2 Tipos de sistemas

Um sistema urbano de drenagem pode ser designado por: unitário, separativo, misto ou pseudo-separativo.

No sistema unitário, a água residual e a água pluvial escoam através de uma única rede de coletores. Por sua vez, no sistema separativo a água residual e a água pluvial escoam em redes de coletores diferenciadas, não existindo ligações entre as duas redes. Num sistema misto coexistem os dois tipos de sistemas anteriormente visados. Por último, no sistema pseudo-separativo ou separativo parcial verifica-se que, perante a inexistência de coletores pluviais, é admitida a ligação de águas pluviais de pátios interiores e terraços ao coletor de águas residuais domésticas.

As principais vantagens de um sistema unitário consistem numa menor necessidade de espaço para implementação e num custo, tipicamente, mais reduzido. Ambas as vantagens são válidas se considerarmos que estamos perante a instalação de um único coletor, ao contrário do que se verifica numa rede separativa (ainda que, em termos teóricos, no dimensionamento se atinjam diâmetros superiores dos coletores). No entanto, implica a entrada de uma grande quantidade de água pluvial na estação de tratamento (o que é economicamente desvantajoso, devido à necessidade de processar toda essa quantidade de água) e permite a deposição de sedimentos durante o Verão que podem ser arrastados. Adicionalmente, neste sistema verifica-se uma maior frequência e volume de descargas de emergência (Price e Vojinovic, 2011).

Numa fase inicial da inclusão dos primeiros coletores, a água residual e a água pluvial escoavam conjuntamente, sendo encaminhadas para o meio hídrico recetor. Neste contexto, rapidamente se verificou uma necessidade de tratar as águas residuais e conseqüentemente, do ponto de vista económico não era conveniente tratar a elevada quantidade de água pluvial que escoava conjuntamente com a água residual numa única rede (sistema unitário) (Debo e Reese, 2003).

Por sua vez, um sistema separativo apresenta um custo superior (não só ao nível da infraestrutura necessária mas também ao nível da monitorização e limpeza dos coletores) e ocupa uma área superior.

Historicamente, o primeiro sistema separativo doméstico construído no País terá sido o da cidade do Porto. Posteriormente, entre a década de cinquenta e a década de setenta, foi remodelada e complementada, a maioria dos sistemas de drenagem unitários existentes e foram instaladas novas redes de drenagem separativas. Porém, em alguns casos, nomeadamente nos núcleos urbanos mais antigos e mais densamente povoados, mantiveram-se os antigos coletores unitários, complementando-os com CSO e obras de desvio, promovendo a ligação às condutas e emissários dos sistemas separativos adjacentes, construídos nas áreas recentemente edificadas, tais como, o Barreiro (na década de quarenta), Beja (na década de cinquenta) e Lisboa (na década de sessenta).

A escolha do tipo de sistema a implementar tem gerado bastante controvérsia, sendo que, inicialmente, conforme já foi anteriormente referido, se optou pelos sistemas unitários e só mais recentemente pelos sistemas separativos. Não obstante, existem países desenvolvidos, como é o caso da Alemanha, que continua a construir e a conceber, por vezes, sistemas totalmente unitários, que incluem CSO, reservatórios, bacias de retenção e equipamentos de controlo automático de descarga. De facto, por um lado, verifica-se que grande parte dos sistemas concebidos para transportar apenas águas residuais domésticas, efetivamente também transportam águas pluviais resultantes de infiltrações e de ligações domiciliárias trocadas. Neste contexto, verifica-se que uma pequena proporção de ramais trocados é suficiente para que o problema da contribuição pluvial se torne relevante. Por outro lado, as águas pluviais urbanas podem transportar, entre outros poluentes, quantidades significativas de sólidos em suspensão, hidrocarbonetos e metais pesados, nomeadamente, chumbo e zinco, incitando a necessidade de tratamento (Matos, 2003).

A implementação adequada de um sistema de drenagem em meio urbano constitui, por si só, um conjunto de determinados desafios ambientais, tais como: a introdução de melhorias económico-sociais aceitáveis no sistema, a necessidade de avaliação de impacte ambiental dos sistemas, bem como, a necessidade de encontrar soluções sustentáveis. Tal como noutras áreas onde a preocupação ambiental é preponderante, estes desafios não devem ser colocados exclusivamente a um determinado ramo profissional específico. Nesse sentido, deve ser constituída uma equipa multidisciplinar, onde os políticos, os engenheiros, os especialistas ambientais e todos os cidadãos possam contribuir para o desenvolvimento do sistema de forma coordenada e integrada (Butler e Davies, 2011).

Apesar de tudo, será importante referir que, perante o enquadramento legal nacional, designadamente, o RGSPDADAR, as redes de drenagem de águas residuais a implantar em novos sistemas deverão ser do tipo separativo (Sá Marques *et al.*, 2013).

2.1.3 Impactes da urbanização e das alterações climáticas

O processo de urbanização, decorrente do aumento da população nos centros urbanos, bem como as alterações climáticas apresentam essencialmente cinco repercussões imediatas no ciclo hidrológico: o aumento das descargas ocorridas em CSO, o aumento de inundações (estes dois últimos como resultado do aumento da impermeabilização do solo, por exemplo), escassez de água (devido ao aumento do consumo, por exemplo), mudanças nos regimes de água pluvial e água subterrânea, bem como deterioração da qualidade da água, resultante do aumento da poluição (Rogers, 1994). Consequentemente, o comportamento dos sistemas de drenagem também sofre alterações face a estas circunstâncias.

Um sistema de drenagem substitui uma parte do ciclo natural da água e como tal, torna-se essencial avaliar os seus efeitos globais. Na natureza, quando a água das chuvas cai na superfície do solo, uma parte volta à atmosfera através da evaporação ou através da evapotranspiração das plantas, outra parte infiltra-se na superfície e origina águas subterrâneas, e por fim outra parte escoia pela superfície ou fica retida em superfícies côncavas. A proporção atribuída a cada fenómeno depende das características da superfície do solo e varia no tempo e consoante a duração da chuvada, sendo que, o escoamento superficial tende a aumentar à medida que o solo vai ficando saturado.

O processo de urbanização envolve a remoção da vegetação, a movimentação de terras e a impermeabilização do solo decorrente da difusão de superfícies artificiais. Desta forma, a impermeabilização do terreno impede que a água se infiltre no solo, provocando um aumento do escoamento superficial e consequentemente um aumento do volume total de água que atinge o curso de água previamente existente durante ou logo após a chuvada. O escoamento superficial ocorre a maiores velocidades em coletores do que em superfícies naturais, o que implica uma chegada de caudal mais rápida, bem como, um caudal de ponta mais elevado. Nesse sentido, a frequência e magnitude das descargas ocorridas em CSO e das inundações aumentam drasticamente. Adicionalmente, será importante referir que o aumento dos caudais provoca um arrastamento dos poluentes e sedimentos para os rios e linhas de água, provocando a deterioração da qualidade da água.

Uma vez que a expansão urbana tem provocado uma alteração no ciclo natural da água, é comum observar-se um comportamento hidráulico insuficiente de redes de drenagem pluvial devido ao subdimensionamento para a situação atual e aos entupimentos e obstruções de coletores, com conseqüente entrada em carga de coletores e inundações nos pontos baixos das bacias hidrográficas (Butler e Davies, 2011).

De facto, a existência de águas residuais, por si só, constitui uma conseqüência da urbanização. Os sistemas de drenagem onde exista a mistura de águas residuais com águas

pluviais podem permitir a entrada de águas residuais no rio. Num sistema desenvolvido, grande parte do material que é adicionado à água durante a sua utilização aquando da sua transformação em água residual é removido numa estação de tratamento para que depois esta possa ser devolvida ao ciclo natural da água. Apesar de tudo, a Natureza consegue por si só tratar alguns tipos de material, tais como, matéria orgânica, mas não nas quantidades produzidas pela comunidade.

Em suma, os efeitos da urbanização no processo de drenagem envolvem o surgimento de maiores e repentinos caudais de ponta (conforme se observa na Figura 2.1), a introdução de poluentes e a necessidade de um tratamento de águas residuais.

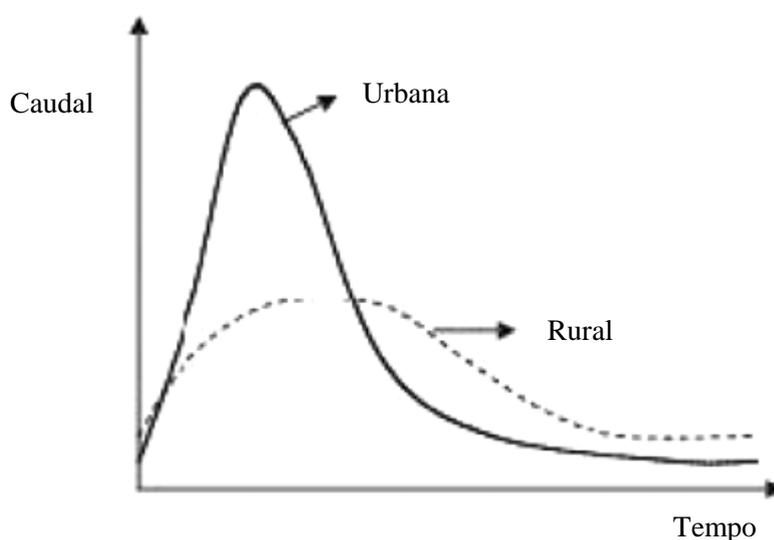


Figura 2.1 – Hidrograma de bacia rural e bacia urbana (adaptado de Tucci, 2008).

Uma estratégia de gestão de sistemas de drenagem deve integrar diferentes níveis de decisão (escala política, regional ou local, por exemplo), alicerçados em informação técnica, na compreensão clara das possibilidades existentes e no reconhecimento das consequências de cada decisão tomada. Nesse sentido torna-se fundamental reconhecer que as decisões efetuadas com base em informação insuficiente representam custos, desperdício de tempo e a possibilidade de surgimento de outros problemas relacionados com a gestão da água (Barbosa *et al.*, 2012).

Desta forma, é urgente implementar práticas de gestão e dimensionamento de estruturas de drenagem urbana adequadas que permitam um desenvolvimento socioeconómico sustentável. Para tal, é necessário atualizar as ferramentas de modelação existentes e promover uma

consciencialização das consequências decorrentes de ações incorretas, de acordo com a evolução do conhecimento técnico e científico.

Neste contexto, é importante introduzir o conceito de Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS), conforme consta no subcapítulo 2.1.4.

2.1.4 Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável

Perante o aumento da urbanização e o impacte das águas pluviais urbanas na vida do Homem e nos ecossistemas, a gestão da drenagem urbana constitui um desafio importante (Fletcher *et al.*, 2015). As consequências do desenvolvimento urbano, designadamente a impermeabilização do solo e a desmatação da vegetação, induzem alterações nas condições naturais de infiltração, diminuindo o atrito da água com o solo e aumentando a velocidade de escoamento. Desta forma, diminui a evapotranspiração e o tempo que a água permanece na bacia, o que provoca um aumento do volume de água a ser escoado superficialmente, provocando também a erosão. Neste contexto, no início dos anos 90 começou a surgir uma maior preocupação com o destino das águas em meio urbano, o que originou a introdução do conceito de drenagem sustentável (Kobayashi *et al.*, 2008).

Os SUDS são projetados para maximizar as oportunidades e os benefícios que é possível obter através da gestão integrada do ciclo urbano da água.

Na sua essência existem quatro categorias principais onde se podem verificar benefícios recorrendo aos SUDS, designadamente: quantidade de água, qualidade da água, bem-estar e biodiversidade. Estas categorias são frequentemente referidas como os quatro pilares do *design* de SUDS (Figura 2.2).

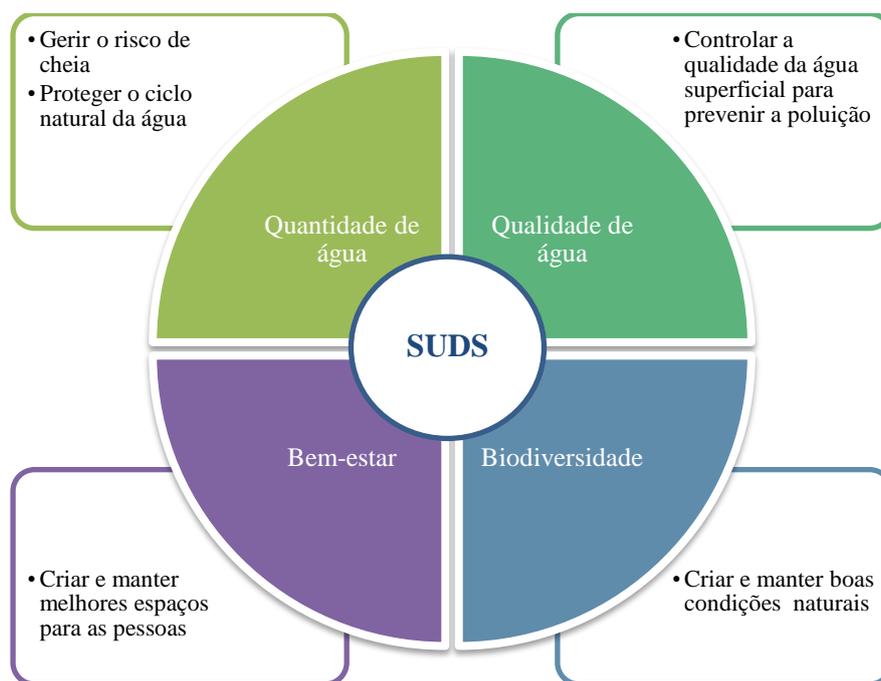


Figura 2.2 – Principais pilares dos SUDS (adaptado de Woods-Ballard *et al.*, 2015).

O primeiro manual onde foram abordadas as preocupações com a gestão de águas pluviais foi publicado no Reino Unido em 1992, onde se exibiu um conjunto de várias técnicas de controlo (Fletcher *et al.*, 2015). Atualmente, o documento *The SUDS Manual* apresenta-se como um guia bastante completo, fornecendo recomendações para a implementação de SUDS (Woods-Ballard *et al.*, 2015). Segundo este manual, os SUDS constituem sistemas de drenagem de águas que são idealizados respeitando os ideais de desenvolvimento sustentável.

Será importante referir que quando se pretende dimensionar uma rede de coletores pluviais para encaixar os caudais de ponta correspondentes a tempos de recorrência elevados, normalmente são implementados coletores de grandes dimensões, os quais funcionam, na maior parte do tempo, a secção parcialmente cheia. Este hábito corrente implica um custo elevado dos coletores, bem como, um subaproveitamento (Lima, 2005). Nesse sentido, com vista ao amortecimento dos caudais de ponta e conseqüente redução dos diâmetros dos coletores os SUDS podem assumir diversas formas, nomeadamente: vala artificial, bacia de retenção, superfície permeável ou telhado verde, entre outros.

Os SUDS, quando projetados, construídos e mantidos de forma apropriada tornam-se mais sustentáveis que os sistemas convencionais, uma vez que originam uma mitigação dos efeitos adversos do escoamento superficial urbano no meio ambiente. Desta forma, os SUDS apresentam como principais vantagens (Woods-Ballard *et al.*, 2015) (Figura 2.3):

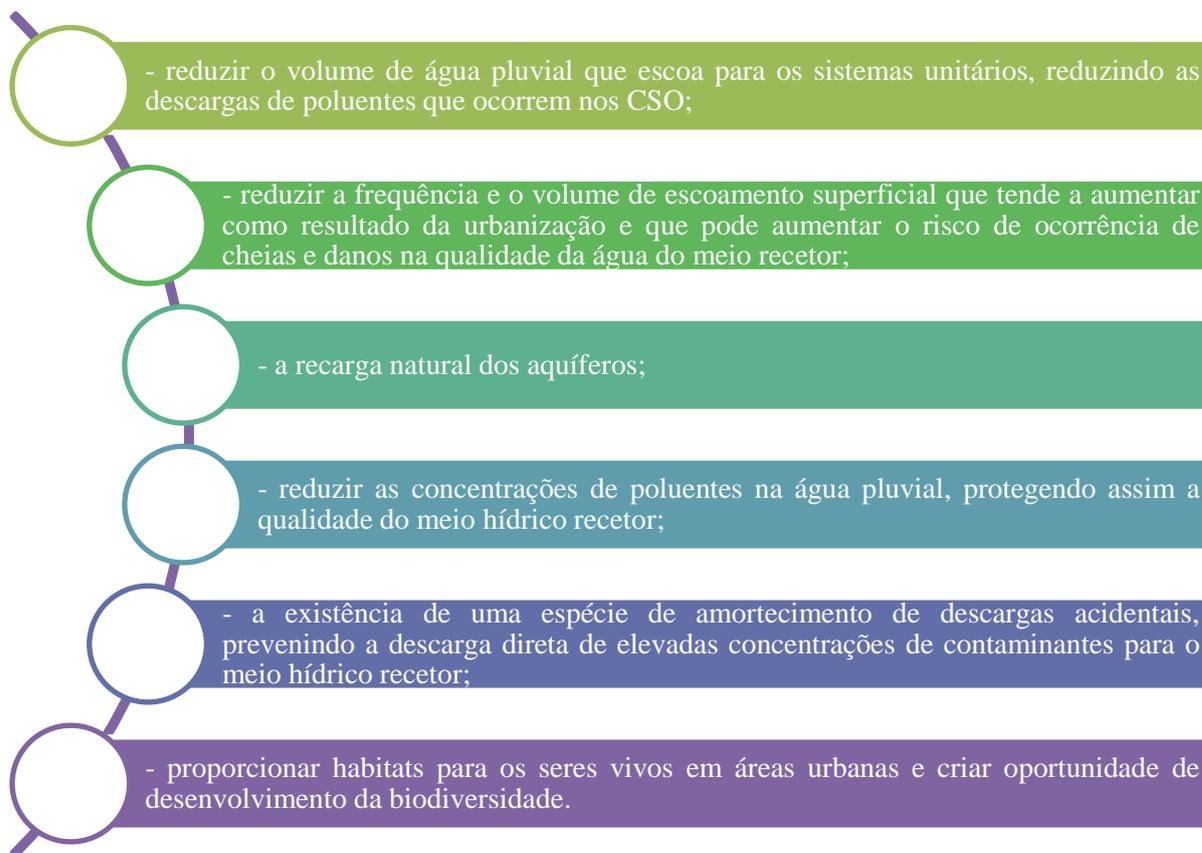


Figura 2.3 – Principais vantagens dos SUDS.

2.1.5 Combined Sewer Overflows

Em circunstâncias normais de afluência de caudal, os sistemas unitários transportam a água residual até à ETAR, onde é tratada e posteriormente descarregada no meio hídrico recetor. Contudo, em períodos de precipitação elevada, o volume escoado pode exceder a capacidade da rede ou da própria ETAR. Para contornar esta situação, os sistemas de drenagem são frequentemente dimensionados para originar descargas diretamente para o meio hídrico, como forma de proteger toda a infraestrutura da rede e a ETAR. Estas descargas ocorrem nos CSO e representam a maior fonte de degradação da qualidade da água (Fletcher e Deletic, 2007). Deste modo, este dispositivo serve para garantir que não afluem, a jusante, caudais superiores aos de dimensionamento dos coletores e da estação de tratamento. Segundo o artigo 168º do RGSPDADAR, esse caudal máximo, passível de ser descarregado, corresponde a seis vezes o caudal médio de tempo seco.

Os caudais devem ser descarregados em pontos onde existam linhas de água ou meios recetores com a capacidade auto-depuradora adequada às descargas a efetuar (Sá Marques e Sousa, 2008). Neste contexto, a descarga mais gravosa verifica-se para um sistema unitário, onde é libertada água residual diretamente para o meio recetor, com uma elevada carga poluente.

O dimensionamento hidráulico de um CSO requer um cuidado especial para evitar, por um lado, descargas frequentes e prematuras e por outro, uma sobrecarga dos dispositivos a jusante do CSO, tal como já foi referido.

Um CSO pode deixar de funcionar por diversas razões, tais como: a água residual não drenar convenientemente devido a obstruções a montante do sistema causados pelo acumular de sedimentos ou gorduras, colapso do coletor, entre outras. Desta forma, em vez de a água ser tratada no final do sistema de drenagem, podem ocorrer descargas frequentes ou bastante poluídas para o meio hídrico recetor, provocando um decréscimo da qualidade da água e a eventual morte de seres vivos (Price e Vojinovic, 2011).

2.1.6 Impacte da primeira descarga (*first flush*)

Quando ocorrem as primeiras descargas após um longo período sem ocorrência das mesmas, observa-se um fenómeno particularmente problemático que se insere no domínio ambiental. Nestas circunstâncias verifica-se que os sedimentos acumulados na rede de drenagem durante o período seco são arrastados durante a descarga. Uma vez que os maiores eventos de poluição ocorrem quando o caudal é menor e a quantidade descarregada é relativamente pequena (devido à baixa diluição) este fenómeno pode ser determinante no impacte global da poluição. Embora sejam raros, existem cenários onde os sistemas podem produzir um pico de poluentes num ponto intermédio ou mesmo no fim da descarga. Este fenómeno pode ser identificado em hidrogramas, perante um aumento acentuado da concentração de poluentes perto do início de uma tempestade. Verifica-se que mesmo que a concentração permaneça constante à medida que aumenta o caudal, isto significaria um aumento da carga de poluentes. Por outro lado, este fenómeno também pode ser identificado através da análise de um gráfico que apresente a carga de poluentes acumulada em função do caudal escoado acumulado (Figura 2.4). Uma linha inclinada a 45° indica que os poluentes estão uniformemente distribuídos ao longo da tempestade. Se essa linha estiver acima dos 45°, provavelmente ocorreu este fenómeno (Butler e Davies, 2011). No entanto, será importante referir que este fenómeno tem gerado controvérsia no meio científico e consequentemente existem várias interpretações na literatura relativas ao conceito de *first flush*. Saget *et al.* sugerem que existe *first flush* quando pelo menos 80% da carga poluente acumulada é arrastada durante 30% do

volume escoado inicial, por outro lado, segundo Deletic ocorre *first flush* quando 20% ou mais da carga poluente acumulada é arrastada durante 20% do volume escoado inicial (Saget *et al.*, (1996) e Deletic (1998) em Temprano *et al.*, (2006)).

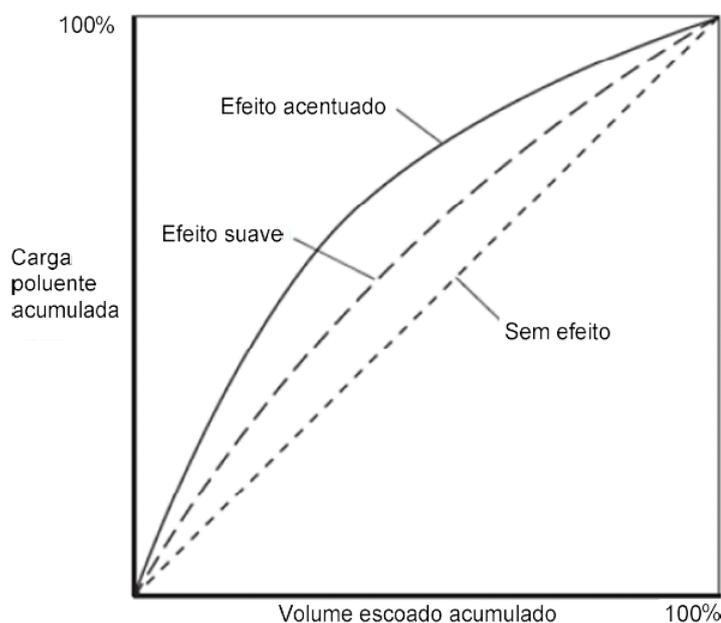


Figura 2.4 – Impacte da primeira descarga (adaptado de Metcalf *et al.*, 2003).

2.1.7 Enquadramento legal de descargas no meio hídrico

Uma das principais ferramentas de gestão e proteção dos recursos hídricos é a DQA, adotada pela União Europeia no ano 2000.

Esta Diretiva introduziu uma nova abordagem legislativa baseada em formações hidrológicas e geográficas naturais (as bacias hidrográficas) e não em fronteiras nacionais ou políticas. Através da gestão integrada das bacias hidrográficas, toda a massa de água é protegida por meio de uma estratégia holística e coordenada, em que todas as partes interessadas participam ativamente nos processos de decisão. É este o princípio subjacente à DQA.

No caso das águas de superfície, este objetivo é definido impondo limites à concentração de poluentes específicos de importância comunitária (substâncias prioritárias), tendo sido identificadas 33 até à data. Em Dezembro de 2008, foi publicada uma nova Diretiva que estabelece limites – as normas de qualidade ambiental (NQA) - para essas 33 substâncias e para outras 8 regulamentadas por legislação anterior. A Diretiva-Quadro Água impõe que as águas de superfície tenham um bom estado ecológico, o que permite aferir acerca da

qualidade ambiental dos ecossistemas. Para cumprir este objetivo, os Estados-Membros poderão ter de garantir o controlo de outros poluentes de importância nacional.

Relativamente às águas subterrâneas a Diretiva-Quadro Água impõe que estas tenham um bom estado químico. É ainda reforçada pela Diretiva Águas Subterrâneas, de 2006, que especifica medidas para avaliar, fiscalizar e controlar a poluição das águas subterrâneas (Comissão Europeia, 2008).

Com a entrada em vigor da DQA em 2000, foi necessário efetuar uma revisão da legislação nacional, tendo sido publicada a Lei da Água (Lei n.º 58/2005 de 29 de Dezembro) que assegura a sua transposição. Na Lei da Água, para além dos princípios gerais consignados na Lei de Bases do Ambiente (Lei n.º 19 de 2014), são definidos os princípios do valor social da água, da dimensão ambiental da água, do valor económico da água, tendo por base os princípios do “poluidor-pagador” e do “utilizador-pagador”, e da gestão integrada das águas e dos ecossistemas, condição necessária ao desenvolvimento sustentável. Esta lei indica a região hidrográfica como a unidade principal de planeamento e gestão das águas, tendo por base a bacia hidrográfica. No quadro da especificidade das bacias hidrográficas, são criadas em Portugal 10 regiões hidrográficas.

Além dos instrumentos legais anteriormente referidos, também merece destaque o Decreto-Lei n.º 236/98 de 1 de Agosto que estabelece normas, critérios e objetivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos (neste documento constam os Valores Limite de Emissão (VLE) na descarga de águas residuais).

Existem indicadores que têm como objetivo avaliar o controlo de descargas de águas residuais para o meio recetor de acordo com as recomendações das seguintes Diretivas (Freixial e Franco, 2012):

- Diretiva do Conselho 91/271/CEE: no seu Anexo I refere “...visto não ser possível na prática, construir sistemas coletores e ETAR capazes de tratar todas as águas residuais, em situações de que são exemplo, quedas de chuvas torrenciais excecionais, os Estados-membros tomarão uma decisão relativamente às medidas a tomar que poderão basear-se em taxas de diluição em relação ao caudal de tempo seco ou especificar um determinado número admissível de descargas por ano...”;
- Diretiva 2000/60/CE - Diretiva Quadro (n.º 1 e 2 do Art.10.º): reforça a necessidade do controlo de emissões de descargas de fontes tóxicas já definidas em Diretivas anteriores (descargas de águas residuais urbanas, águas balneares, águas piscícolas);
- Diretiva 2004/35/CE. (Art.º 7.º e 12.º): invoca a responsabilidade ambiental em termos de prevenção e reparação de danos ambientais (mecanismos de responsabilidade e princípio do poluidor-pagador).

Mais concretamente, em relação à descarga de águas residuais não tratadas existe um indicador que consiste na percentagem de CSO com descarga direta para o meio recetor monitorizados e com funcionamento satisfatório. Contudo, podem surgir algumas dificuldades inerentes à caracterização deste indicador, tais como, a inexistência dos equipamentos de monitorização das descargas e o desconhecimento da classificação do meio recetor. A definição dos valores de referência deste indicador na Europa tem evoluído ao longo dos anos. Relativamente à conceção e dimensionamento dos CSO é aceite uma aproximação pragmática, o fator de diluição (Freixial e Franco, 2012). Nesse sentido, como forma de avaliação deste indicador foi adotada pela Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) uma métrica com base na frequência das descargas em função dos usos do meio recetor.

2.2 Controlo em Tempo Real de sistemas de drenagem

2.2.1 Considerações gerais

Os sistemas de drenagem, responsáveis pela recolha e o transporte de água residual, representam uma parte fundamental das infraestruturas urbanas. O custo e a complexidade destes sistemas são elevados, principalmente em zonas com forte urbanização. Por outro lado, a operação e a manutenção destes sistemas também não constitui uma tarefa simples. Neste âmbito verifica-se que os impactes causados pelas descargas ocorridas em CSO têm sido motivo de preocupação nos últimos anos. Esta questão deve ser abordada considerando a escassez de recursos e promovendo a pressão administrativa necessária para solucionar o problema de forma eficaz e o menos dispendiosa possível. Adicionalmente, será ainda importante referir o facto de as limitações legalmente impostas serem cada vez mais restritivas, bem como a necessidade de adaptação às consequências das alterações climáticas (Vitasovic, 2006).

Perante a problemática das descargas para o meio hídrico recetor têm sido propostas intervenções baseadas na construção de redes separativas, novos segmentos de coletores ou dispositivos de armazenamento. Contudo, o custo destas intervenções é sobejamente elevado, especialmente em zonas urbanas mais antigas, onde a densidade populacional e o valor por m² são elevados.

Usualmente os sistemas de drenagem urbana são projetados segundo uma lógica conservadora, sendo considerados fatores de segurança que originam coletores de maior dimensão do que a estritamente necessária. Desta forma, o CTR de sistemas de drenagem urbana pode representar uma opção para maximizar a utilização do volume de

armazenamento já existente e evitar assim a introdução de alterações dispendiosas na rede existente.

Neste contexto, nos últimos anos o Sistema de Controlo em Tempo Real (doravante designado apenas por SCTR) tem-se apresentado como uma alternativa viável e promissora.

2.2.2 Sistema de Controlo em Tempo Real

O CTR compreende práticas e ferramentas que permitem efetuar uma gestão proativa da rede de drenagem. Um SCTR consiste numa combinação de estratégias operacionais e/ou algoritmos que controlam o escoamento que se verifica na rede de drenagem, com base em medições *online* recolhidas em tempo real e que permitem, posteriormente, ajustar o seu funcionamento consoante as condições dinâmicas verificadas. Desta forma, um SCTR permite manter ou atingir determinados objetivos operacionais, durante o tempo seco e tempo húmido.

Numa rede de drenagem vulgar, o caudal e o nível em coletores é normalmente controlado por descarregadores estáticos que não são ajustados em tempo real. Desta forma, o CTR permite introduzir uma componente dinâmica no sistema de drenagem, admitindo o ajuste da instalação em tempo real, segundo as condições do sistema.

Um SCTR pode ser utilizado para atingir diversos objetivos operacionais, dependendo da zona onde é aplicado e das condições verificadas. Do ponto de vista funcional, um SCTR atua segundo as seguintes etapas sequenciais:

- recolha de informação acerca do estado atual da rede de drenagem;
- comparação do estado atual da rede com o estado desejado;
- determinação das definições de controlo que permitirão atingir o estado desejado;
- implementação das definições de controlo, segundo ações, no ponto final de controlo (ex.: comportas, bombas, barragens insufláveis).

Ao dimensionar um SCTR torna-se necessário, em primeira instância, definir o estado desejado para o sistema de drenagem, com base em objetivos operacionais. Será importante referir que podem existir objetivos operacionais diferentes durante o tempo seco, uma tempestade intensa ou outras situações de emergência. Pelas razões supracitadas, a definição dos objetivos operacionais nem sempre constitui uma tarefa simples.

Um SCTR pode ser utilizado para atingir diversos objetivos, nomeadamente os que são enunciados na Figura 2.5:

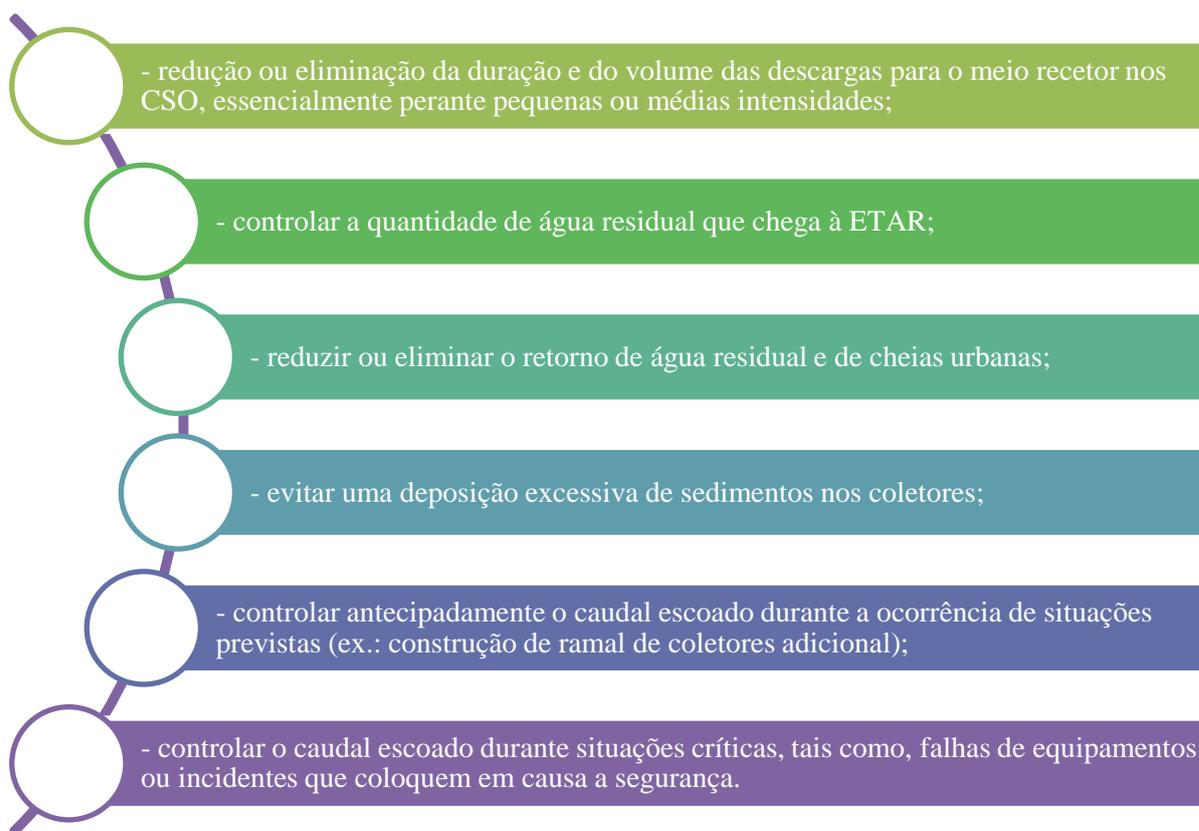


Figura 2.5 – Principais objetivos de um SCTR em sistemas de drenagem.

Um SCTR apresenta como vantagem o custo reduzido (o custo adicional quando comparado ao dos sistemas de operação convencionais é inferior), uma vez que é efetuado um aproveitamento da capacidade de retenção já existente na rede, diminuindo ou eliminando a necessidade de criar um volume de retenção adicional ou introduzir modificações consideráveis de âmbito estrutural. Simultaneamente, a sua aplicação introduz uma melhoria da capacidade de adaptação às consequências das alterações climáticas na gestão da água e aos requisitos legais (Beeneken *et al.*, 2013).

No decorrer da evolução tecnológica, os equipamentos técnicos exigidos para monitorizar a rede de drenagem tornaram-se bastante sofisticados. Os componentes básicos de SCTR são: os sensores (de nível, pluviométricos, de caudal ou de qualidade da água), os atuadores (comportas, eletrobombas, descarregadores, válvulas, dispositivos de dosagem, dispositivos de arejamento, etc.) e a estratégia de controlo.

A fiabilidade deste conjunto de equipamentos, a calibração e a manutenção constituem desafios importantes uma vez que os materiais são submetidos a condições extremas, sofrem corrosão e são normalmente colocados em locais de difícil acesso. Por outro lado, uma vez

que o equipamento necessita de ser integrado da rede, pode representar um potencial de ignição de gases (Fletcher e Deletic, 2007).

Fundamentalmente, o controlo do processo pode ser esquematizado através de um ciclo (Figura 2.6), que pode ser implementado através de componentes de *hardware*, incluindo sensores, que monitorizam a evolução do processo, atuadores, que influenciam o processo, controladores, que ajustam os atuadores para alcançar desvios mínimos da variável controlada relativamente ao valor desejado (*set point*) e sistemas de transmissão de dados que transmitem os dados entre os diferentes dispositivos (Schütze *et al.*, 2004). No esquema da Figura 2.6 as setas simples representam os dados de escoamento e as setas duplas indicam a ação hidrodinâmica.

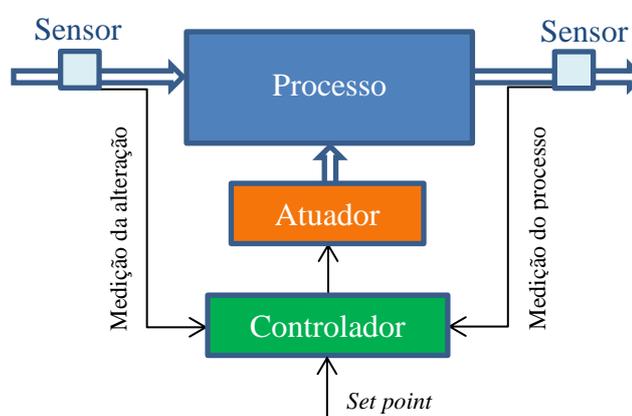


Figura 2.6 – Esquema de funcionamento do ciclo *feedforward* (medição da alteração) e *feedback* (medição do processo) (adaptado de Schütze *et al.*, 2004).

O controlo anteriormente definido é o elemento básico de qualquer SCTR. No controlo de *feedback*, os comandos são atuados dependendo do desvio relativamente ao *set point* medido no processo controlado. Nesse sentido, caso não se verifique um desvio, um controlador *feedback* não é atuado. Por sua vez, um controlador *feedforward* antecipa no imediato os valores futuros desses desvios utilizando um modelo do processo. Desta forma, torna possível ativar atuadores antes do tempo para evitar os desvios. Por último, um controlador *feedback/feedforward* é uma combinação destes dois tipos.

No âmbito dos sistemas de drenagem, as estratégias de CTR podem ser fundamentalmente baseadas em algoritmos heurísticos ou algoritmos de otimização. Os algoritmos heurísticos baseiam-se no conhecimento por via da componente experimental, que decorre da aplicação de um conjunto de procedimentos potenciais que é especificado e posteriormente melhorado através de um processo iterativo envolvendo um modelo de simulação do sistema. Existem principalmente dois tipos de algoritmos neste domínio, designadamente: a lógica *fuzzy*,

também denominada de lógica difusa (lógica multi-valor, que permite uma especificação flexível dos parâmetros de saída) ou o modelo baseado em regras (as condições hidráulicas são determinantes para o controlo do sistema e as ações a tomar devem considerá-las utilizando várias regras). Por sua vez, os algoritmos de otimização procuram uma ação de controlo ideal com base na função objetivo definida e na medição (ou estimativa) das variáveis atuais do sistema. Estes algoritmos podem incluir essencialmente: o modelo de controlo preditivo (utiliza uma previsão da resposta do sistema para estabelecer uma ação de controlo apropriada) ou o modelo regulador quadrático linear (produz uma ação de controlo linear para minimizar uma função objetivo) (García, *et al.* 2015).

Na maioria das situações, a instalação de um SCTR pode trazer benefícios e melhorar o desempenho do sistema de drenagem. Contudo, a decisão sobre a sua viabilidade incide, em grande parte das vezes, sobre a relação custo de implementação/ benefícios introduzidos.

Atualmente, os entraves mais frequentemente apontados quanto à difusão deste sistema são os seguintes:

- a perceção (errada) de que um SCTR tem que ser obrigatoriamente um sistema dispendioso, complexo, com alguma fragilidade e pouco fiável;
- a maioria das entidades responsáveis pelos sistemas de drenagem manifesta alguma preocupação relativamente às limitações legais. Se o sistema de drenagem não possuir automação e a descarga ocorrer, permanece a sensação de que se fez tudo o que podia ter sido feito. Nesse sentido, existe alguma relutância quanto ao facto de a introdução de um SCTR despoletar um aumento do escrutínio operacional e da necessidade de reportar informação dotada de maior detalhe às entidades reguladoras.

Existirão casos onde um SCTR poderá não trazer benefícios imediatos. Considere-se por exemplo o caso de um sistema de drenagem que já não dispõe de capacidade de armazenamento, onde os coletores se encontram na iminência de atingir a secção cheia. Não obstante, mesmo nestes casos, é prudente considerar um SCTR durante o planeamento de instalações adicionais futuras (caso permitam o aumento da capacidade de armazenamento) (Vitasovic, 2006).

Contudo, o SCTR é ainda frequentemente visto como uma opção complexa e demasiado dispendiosa, não constituindo por isso, uma alternativa viável (à luz desses argumentos).

2.3 Modelação de sistemas de drenagem

A modelação matemática consiste em quantificar os processos físicos e sociais que ocorrem no mundo real através de relações matemáticas. Um modelo matemático é essencialmente um

objeto matemático que gera dados de saída a partir de dados de entrada. Este objeto representa um aspeto da realidade e como tal, é necessariamente uma simplificação da realidade (Price e Vojinovic, 2011). O acesso generalizado aos computadores e a melhoria dos métodos de amostragem proporcionou um desenvolvimento dos modelos de drenagem urbana, que foram calibrados e validados através de comparações com medições de campo (Mays, 2004).

No âmbito da drenagem urbana, estes modelos permitem efetuar uma simulação do comportamento do sistema de drenagem sob determinadas condições, nomeadamente, condições extremas. Como tal, podem ser utilizados como ferramenta de apoio ao dimensionamento de novos sistemas ou à análise dos sistemas já existentes. Desta forma pode-se verificar se os novos sistemas são capazes de responder de forma eficaz perante as condições para as quais são dimensionados. Quando os sistemas já existem, os modelos podem desempenhar um papel importante ao permitir averiguar se existe a necessidade de implementar melhorias e qual a melhor forma de as conseguir obter.

Num modelo de drenagem urbana, existem tipicamente três tipos de módulos que são frequentemente utilizados: o módulo hidrológico (transformação da precipitação em escoamento superficial), o módulo hidráulico (simulação do escoamento) e o módulo de qualidade da água (Debo e Reese, 2003). O primeiro módulo quantifica o escoamento superficial através de algoritmos de transformação da precipitação em escoamento, que dependem das características da bacia de drenagem. O segundo módulo representa o movimento da água na rede de coletores ou canais, onde os dados de entrada são os resultados do primeiro módulo (Sá Marques *et al.*, 2013). Por fim, o módulo de qualidade da água permite simular a acumulação e o transporte da carga poluente, entre outros fenómenos.

Um processo de simulação inclui três fases essenciais: a validação, a calibração e a verificação. A validação corresponde a verificar se o modelo reproduz os processos tal como estes ocorrem na realidade. A fase de calibração consiste em verificar se o modelo validado reproduz as situações reais, confirmado por medições. Para tal é necessário ajustar o modelo para que os resultados obtidos sejam o mais próximo possível da realidade. Por fim, a verificação permite averiguar se os parâmetros do modelo, definidos através da calibração, conduzem a reproduções corretas da realidade em situações não testadas no processo de calibração (Sá Marques *et al.*, 2013).

2.3.1 Precipitação

A precipitação pode ser definida como um evento meteorológico onde uma determinada quantidade de água precipita sob a forma de chuva durante um determinado período de tempo. Cada evento de precipitação é caracterizado por uma distribuição espacial e temporal

diferente. Por norma, a precipitação é utilizada como dado de entrada para os modelos hidrológicos, permitindo, após vários estudos, a elaboração de sistemas de drenagem e a previsão de inundações urbanas (Estellés, 2010).

2.3.2 Modelação hidrológica

Um modelo hidrológico pode ser definido como um instrumento desenvolvido para permitir perceber o comportamento de uma bacia hidrográfica. O escoamento originado pela precipitação varia consoante determinados fatores, tais como: a rugosidade, a permeabilidade da superfície, a forma da bacia, ou as características da chuvada, como sejam a duração e a intensidade. Os modelos hidrológicos implementados nos *softwares* comerciais são, na maioria dos casos, modelos empíricos ou concetuais. Estes métodos descrevem a relação entre uma variável dependente e outras variáveis que descrevem o processo consoante o conhecimento dos processos físicos envolvidos e de medições empíricas (Leitão *et al.*, 2008).

Segundo Leitão *et al.* (2008) os modelos hidrológicos mais utilizados são os seguintes: o método racional, o modelo da curva tempo-área, o método do hidrograma unitário e o modelo de reservatório. O método racional constitui o modelo hidrológico mais simples e também o mais utilizado. A racionalidade do método consiste em supor que o caudal máximo no extremo jusante de uma bacia se verifica quando toda a bacia está a contribuir, o que acontece quando a duração da chuvada iguala o tempo de concentração.

Tal como é referido Leitão *et al.* (2008), no modelo da curva tempo-área, o volume do escoamento superficial é controlado pelas perdas iniciais, pela área da bacia e pela perda hidrológica contínua. O tempo de concentração da bacia e a curva tempo-área controlam o hidrograma de escoamento.

No método do hidrograma unitário admite-se que a bacia se comporta como um sistema linear, e que as chuvas complexas podem ser subdivididas em chuvas simples de modo que, se forem conhecidos os hidrogramas resultantes das chuvas simples, determina-se facilmente o hidrograma correspondente à chuva complexa. Para tal, baseia-se na propriedade principal dos sistemas lineares, que é a sobreposição dos efeitos (Lima, 2005).

Por último, os modelos de reservatório caracterizam-se por apenas considerar a lei de conservação da massa, não considerando a equação de conservação da quantidade de movimento. Desta forma, a resposta da bacia é instantânea. No caso dos modelos de reservatório linear, assume-se que uma bacia atua como um reservatório, onde o caudal de saída evolui linearmente em função do armazenamento (Leitão *et al.*, 2008).

No *software* SWMM, cada sub-bacia é tratada como um reservatório não linear. As contribuições para o escoamento superficial provêm dos diferentes tipos de precipitação (chuva e neve) e de qualquer outra sub-bacia que esteja situada a montante (Rossman, 2010). O caudal de saída está associado a fenómenos de infiltração, evaporação e escoamento superficial, tal como se exemplifica na Figura 2.7.

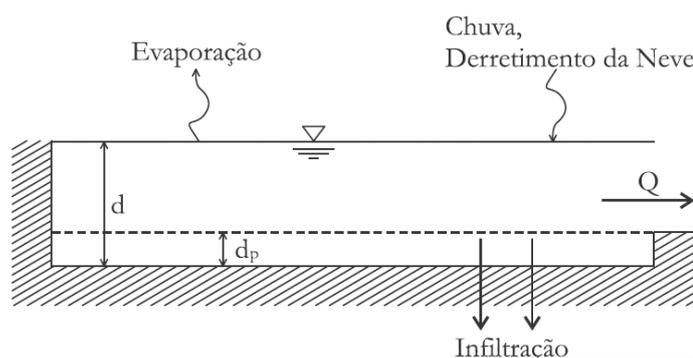


Figura 2.7 – Conceito de escoamento superficial incorporado no SWMM (Rossman, 2010).

2.3.3 Modelação hidráulica

Quando um sistema de drenagem é submetido a uma situação de chuvadas intensas, fica sujeito a uma variação de caudal grande e rápida, podendo originar fenómenos como inundações, inversões de sentido do escoamento, efeitos de jusante, mudança de regime e escoamento sob pressão. Estes fenómenos só são convenientemente representados através de modelos hidrodinâmicos.

As equações matemáticas unidimensionais e bidimensionais mais utilizadas para descrever o comportamento de um escoamento variável em superfície livre são as equações de Saint-Venant. Estas equações resultam da integração vertical das equações de Navier-Stokes, quando se efetuam as seguintes considerações:

- a componente da velocidade e aceleração no eixo vertical são desprezáveis;
- a pressão é hidrostática;
- o fundo apresenta uma inclinação pequena;
- numa secção a velocidade horizontal é constante ao longo da vertical;
- os efeitos da turbulência e das tensões tangenciais podem ser considerados de uma forma agregada.

Estas equações permitem conhecer a altura de escoamento e uma velocidade média do escoamento ao longo de uma secção transversal. Perante eventos de precipitação extremos,

um sistema de drenagem pode atingir a capacidade máxima dos coletores. Nestas circunstâncias o escoamento dá-se sob pressão, pelo que, para que as equações de Saint-Venant possam continuar a ser consideradas, é necessário introduzir o conceito de fenda de Preissmann (Butler e Davies, 2011). Desta forma, considera-se a existência de uma fenda imaginária situada na parte superior do coletor, permitindo que a altura de escoamento exceda o diâmetro do coletor, simulando assim o efeito do escoamento sob pressão. Quando um coletor entra em carga, a água pode sofrer um movimento ascendente, passando o escoamento a processar-se também à superfície. No caso do estudo do escoamento em coletores, existe uma direção muito bem definida e uma secção constante, o que permite a utilização de modelos unidimensionais (Sá Marques *et al.*, 2013).

2.4 Principais estudos realizados sobre Controlo em Tempo Real em sistemas de drenagem

Existem vários estudos efetuados sobre a implementação de CTR em redes de drenagem e que divergem no seu foco. Verifica-se que cada sistema é único devido às especificidades da bacia e características da infraestrutura existente.

No estudo efetuado por Poulsen *et al.* (2017) foi demonstrado o potencial da utilização da previsão pluviométrica no controlo *online* de sistemas de drenagem de água residual. No ano 2014, na maior ETAR existente na Dinamarca (750 000 habitantes equivalentes), entre outras, foi incorporada a plataforma Preact para realizar a otimização do controlo de caudal afluente segundo os eventos de precipitação observados e consequentemente, reduzir as descargas que ocorrem nos CSO existentes na rede de drenagem e provocam situações de poluição ambiental. Através da medição e previsão da precipitação é possível estimar o caudal escoado em determinados pontos de controlo da rede e posteriormente melhorar de forma proactiva o controlo *online* do sistema de drenagem e/ou ETAR, reduzindo desta forma as descargas para o meio hídrico recetor. Com recurso a um radar é efetuada uma previsão da precipitação que irá ocorrer na bacia. Por sua vez, a precipitação que ocorre a cada instante é medida em pluviómetros, permitindo ajustar em tempo real a previsão do caudal escoado. Adicionalmente, no futuro pretende-se considerar a concentração de amónia nas previsões futuras, evitando as descargas com maiores concentrações.

Wortberg *et al.* (2017) desenvolveram e implementaram um SCTR, tendo evidenciado os benefícios de uma utilização mais eficiente do volume de armazenamento da própria rede de drenagem e a redução de descargas de emergência. Com recurso ao *software* SIMBA# foi testado um SCTR que incluiu a comparação dos volumes descarregados e respetiva frequência. A rede de drenagem considerada na simulação contemplou cinco reservatórios

instalados em série, com uma capacidade total de 17 000 m³. Os resultados demonstram uma redução total do volume de descarga de 9%. Contudo, esta redução é fundamentalmente observada em apenas um dos reservatórios. Nos restantes, a descarga é igual ou até superior quando o controlador se encontra operacional. Conclui-se que a infraestrutura tem potencial para ser otimizada recorrendo ao CTR, sendo que futuramente o controlador será implementado e testado em grande escala para validar os dados da simulação e testar a operacionalidade em condições reais.

Na Alemanha foi implementado um CTR na cidade de Gelsenkirchen utilizando a informação da precipitação proveniente de radar como dados para o CTR de uma rede de drenagem com CSO (Petrucek *et al.*, 2003).

O sistema de CTR denominado ADESBA (Pabst *et al.*, 2011), inclui um algoritmo que permite equilibrar a utilização da capacidade de armazenamento da rede ao regular o caudal escoado na rede de drenagem da cidade de Hildesheim, Alemanha (as válvulas regulam a saída de caudal de bacias de retenção e de CSO). Assim, o objetivo principal consiste em otimizar o uso do volume de armazenamento e reduzir o volume de descargas de tempestade. Os resultados evidenciaram uma redução do volume de descargas de 30%.

Os governantes da cidade de Omaha entendem que é fundamental a eficácia na gestão de águas pluviais existente e futura para melhorar a qualidade da água e mitigar os caudais de ponta nas bacias hidrográficas para evitar a ocorrência de descargas em CSO. Neste contexto, num estudo realizado por Struck (2017) foram definidos vários pontos de monitorização com diversos sensores (nomeadamente, sensores de nível ultrassónicos) para fornecer a informação necessária a um SCTR de válvulas. Através da modelação (recorrendo ao software SWMM), implementação e monitorização de um inovador SCTR, este projeto demonstrou os benefícios na redução e controlo do volume escoado na rede de drenagem. O algoritmo utilizado permite, ao recorrer a previsões de precipitação, atuar de forma a controlar o escoamento de forma autónoma.

Vezzaro e Grum (2014) elaboraram um SCTR, com o intuito de minimizar o risco de ocorrência de descargas em CSO ao considerar: o volume de água armazenado na rede de drenagem num determinado instante, o caudal de escoamento previsível (com base em modelos de previsão por radar) e a estimativa da incerteza de previsões de caudal escoado. A consideração da incerteza permitiu um incremento do grau de confiança no resultado do SCTR. O resultado final da simulação efetuada com recurso ao *software* MIKE permitiu concluir que o sistema contribuiu para a redução do volume de descargas ocorridas nos CSO. Adicionalmente, os resultados evidenciam que a inclusão de previsões de pluviosidade e da respetiva incerteza quanto ao caudal escoado contribuem para a melhoria do desempenho do sistema de drenagem. Este sistema, designado por DORA (*Dynamic Overflow Risk Assessment*), será testado em grande escala em três cidades diferentes da Dinamarca.

Garofalo *et al.* (2017), desenvolveram um SCTR com comportas controladas eletronicamente em tempo real com base num algoritmo. O objetivo do estudo consistiu em avaliar a capacidade de rede de drenagem da cidade de Cosenza (Itália) para reduzir as inundações e descargas de CSO. Como tal, foram efetuadas simulações considerando vários cenários (onde essencialmente, variam as características dos eventos de precipitação e o número de comportas utilizadas), recorrendo ao *software* SWMM, tendo-se observado uma redução significativa do volume de descarga em CSO e de ocorrência de cheias. A investigação futura incidirá sobre uma variação dos dados hidrológicos de entrada, bem como da alteração das condições de fronteira.

No subcapítulo 2.5 serão analisados com maior detalhe os trabalhos já efetuados e integrados no projeto CENTAUR, que se reveste de elevada importância no âmbito deste estudo.

2.5 O projeto CENTAUR

O CENTAUR é uma iniciativa financiada pelo programa Horizonte 2020 da União Europeia, que teve início em Setembro de 2015 e apresenta uma duração de três anos, culminando no final de Agosto de 2018, estando, portanto, em curso à data da realização deste documento.

O projeto integra um consórcio de sete entidades, onde se incluem Universidades e empresas que atuam nos setores de abastecimento e drenagem de água, bem como no desenvolvimento de equipamentos e infraestruturas de monitorização e controlo (Figura 2.8). A entidade que assume a coordenação e liderança técnica do projeto é a Universidade de Sheffield, no Reino Unido.



Figura 2.8 – Parceiros do projeto CENTAUR (The University of Sheffield, 2017).

O projeto CENTAUR pretende ser um sistema de controlo em tempo real económico, descentralizado e autónomo (autoaprendizagem) que aproveita o espaço disponível e já existente nos coletores, com o objetivo de reduzir o risco de inundações urbanas.

O CENTAUR utiliza a informação de determinados dados de entrada para desenvolver estratégias de CTR que permitem efetuar o armazenamento de caudal nos coletores existentes. Nesse sentido, trata-se de uma combinação de técnicas computacionais sofisticadas (*fuzzy logic*) com dispositivos de controlo de caudal especialmente projetados para reduzir o risco de inundação. A Figura 2.9 representa esquematicamente o funcionamento do sistema, que inclui pontos de medição de altura de água através de sensores de nível situados a montante e a jusante do próprio dispositivo de controlo de caudal.

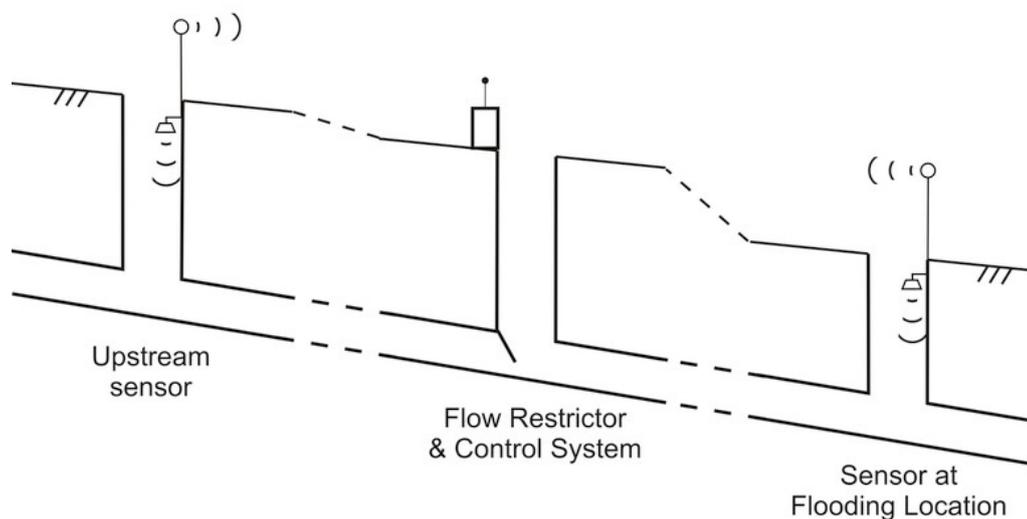


Figura 2.9 – Funcionamento do sistema CENTAUR (adaptado de The University of Sheffield, 2017).

Ao apresentar um baixo custo e uma infraestrutura mínima, pode ser instalado gradualmente em sistemas de drenagem para lidar com locais de alto risco de inundação e/ou descargas de emergência e desta forma permitir que as entidades gestoras e as autoridades locais adotem uma abordagem adaptativa para gestão de risco nas suas bacias (The University of Sheffield, 2017).

No âmbito deste projeto, inicialmente foi efetuado um estudo de laboratório na Universidade de Sheffield utilizando um sistema piloto à escala real para otimizar e testar a viabilidade da metodologia antes da implementação numa rede de drenagem real (Abdel-Aal, *et al.* 2017).

Posteriormente, foi efetuada a modelação deste sistema, com base na rede de drenagem da cidade de Coimbra, em Portugal. Os resultados obtidos demonstraram a capacidade do sistema para diminuir o nível da água num determinado local crítico, com vista à redução do risco de

inundação a jusante sem, contudo, aumentar o mesmo risco a montante (Maluf *et al.*, 2017). Foi também instalado um sistema piloto em Coimbra em Setembro de 2017 e que atualmente se encontra a ser submetido a ensaios de campo.

3 METODOLOGIA

3.1 Caso de estudo

O Município de Coimbra possui uma área de cerca de 319,4 km² e uma população residente de cerca de 135 000 habitantes, o que corresponde a uma densidade populacional de 423 habitantes por km², segundo dados de 2015 (Pordata, 2017). A cidade de Coimbra é uma cidade de média dimensão que é atravessada pelo rio Mondego, cuja extensão no Município é de 24 km. Segundo os últimos dados disponíveis, a população servida por sistemas de drenagem de águas residuais no Município é de 94% (Figura 3.1).

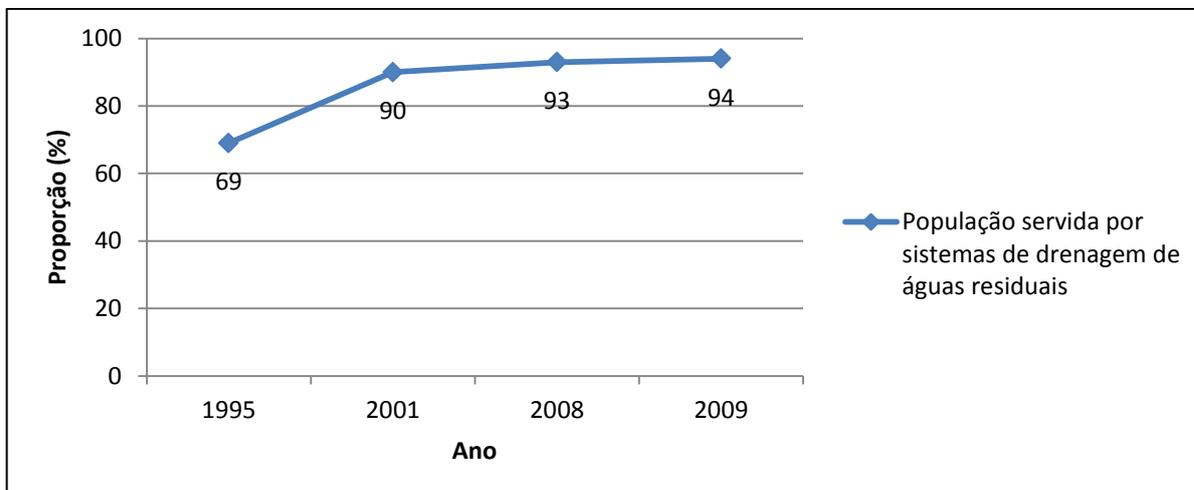


Figura 3.1 – População servida por sistemas de drenagem de águas residuais no Município de Coimbra (Pordata, 2017).

A zona central será a zona analisada neste estudo e é apresentada na Figura 3.2, onde também se encontra identificada a localização no CSO. A bacia hidrográfica da zona apresenta uma área total de cerca de 1,5 km². Esta área pode ser dividida em três regiões com características distintas (Sá Marques *et al.*, 2013):

- a “Baixa”, que é uma zona de cota reduzida, maioritariamente ocupada por comércio e serviços, com 0,4 km²;
- a “Alta”, que é uma zona com relevo acentuado e grandes declives, altamente urbanizada e com uma área de aproximadamente 0,2 km²;
- a área restante, que também é altamente urbanizada, com uma área de 0,9 km².

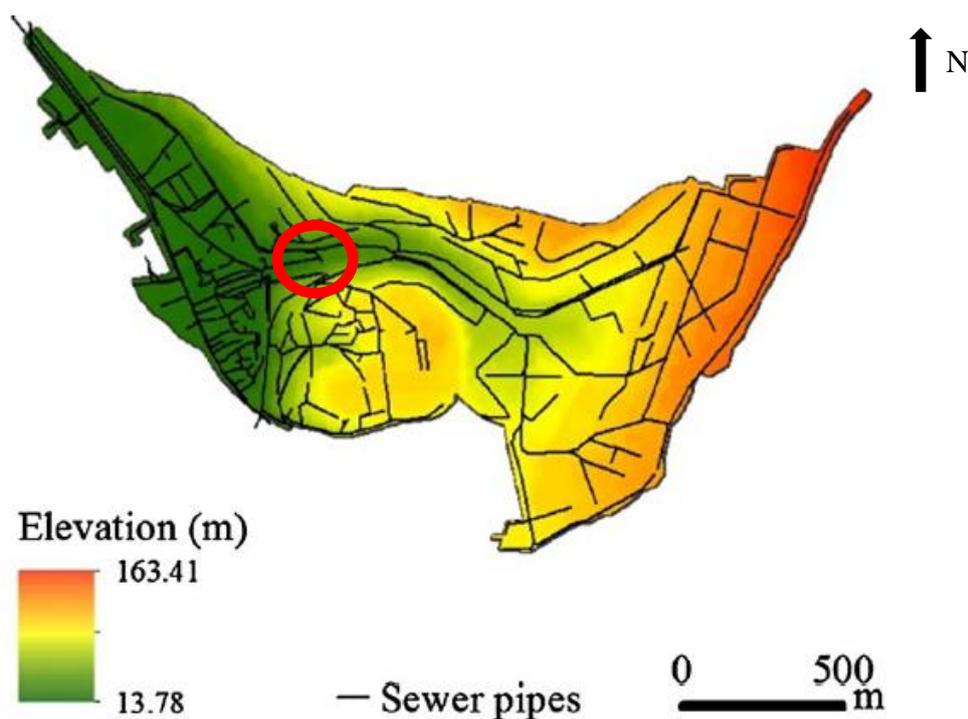


Figura 3.2 – Zona central e identificação da localização do CSO.

Os principais constituintes da rede em estudo são coletores, caixas-de-visita, CSO, uma bomba elevatória e um tanque de armazenamento. Os coletores apresentam uma secção circular, diâmetros compreendidos entre os 200 e 1550 mm e uma extensão de 34,8 km, 29 km dos quais unitários, e apenas 1,2 km são exclusivamente para águas pluviais. O tempo de concentração da bacia é estimado em 45 minutos.

De seguida será descrita a metodologia aplicada neste estudo e que pode ser exposta na sua essência em quatro fases.

Inicialmente, neste estudo, aplicando a mesma metodologia considerada no âmbito do projeto CENTAUR e efetuando a necessária adaptação dos parâmetros utilizados, foi desenvolvido um modelo de CTR para reduzir o volume e a quantidade de descargas que ocorrem num CSO inserido num sistema de drenagem unitário concreto, designadamente, a zona central da

cidade de Coimbra. As descargas de emergência ocorridas neste CSO escoam para o coletor designado por pentagonal, que por sua vez descarrega diretamente no meio hídrico recetor. O objetivo concreto deste estudo é, portanto, reduzir as descargas que ocorrem para o pentagonal.

A redução dos caudais afluentes ao CSO é efetuada através de um FCD, que consiste num orifício que abre e fecha de acordo com as “ordens” de um algoritmo de *fuzzy logic*, que processa a informação dos níveis de água obtida em tempo real. O FCD vai abrindo e fechando de forma controlar o caudal, para que a altura de água a jusante não ultrapasse os valores predefinidos, armazenando água a montante do FCD e aproveitando assim o volume livre disponível, mas sem provocar inundações a montante.

Numa segunda fase, após a definição do objetivo proposto foi necessário proceder à seleção do melhor local para implementação do FCD. Com base no estudo realizado por Leitão *et al.* (2018) pode ser escolhido o melhor local. Este estudo avalia todos os locais possíveis para a localização do FCD e faz um *ranking* com base em *Reward Functions*, que dependem do volume de armazenamento disponível no sistema de drenagem, da área drenante e do número de bacias drenantes (Figura 3.3).

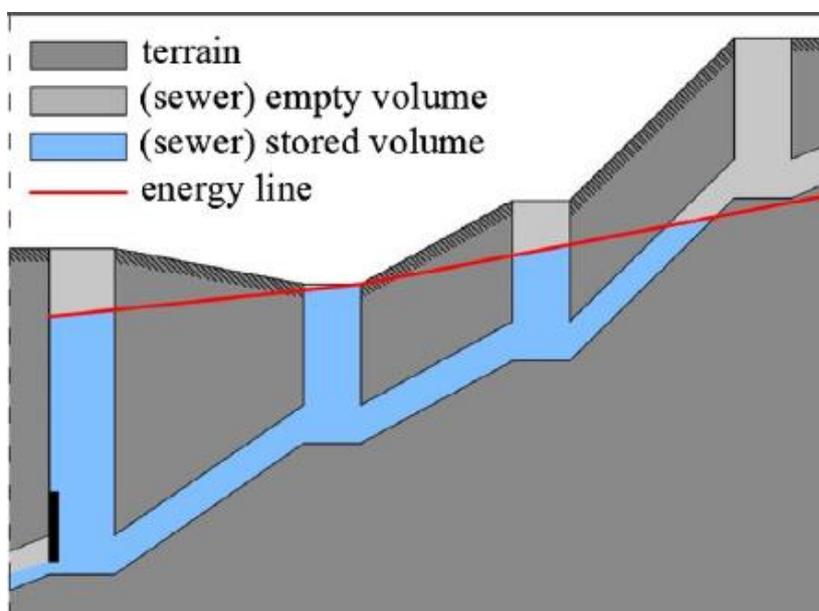


Figura 3.3 – Avaliação do volume disponível para armazenamento de água (Leitão *et al.*, 2018).

Posteriormente, para avaliar o comportamento do FCD em estudo ao longo de um determinado período de tempo (neste caso foi considerado o registo pluviométrico

correspondente ao ano 2017), foi executada uma análise da sensibilidade do modelo relativamente aos principais parâmetros e que constam na linha de código em MATLAB. Os dois principais parâmetros que permitem ajustar o comportamento do FCD face às circunstâncias verificadas, são:

- *MaxDepth* (m) – altura de água máxima na secção de controlo. A abertura e fecho do FCD é efetuada de forma a que a altura de água na secção de controlo não ultrapasse este valor;
- *MinGateOpening* (%) – abertura mínima do FCD.

Será ainda importante referir que, perante situações de grande afluência de caudal torna-se necessário assegurar que o FCD não provoca uma obstrução. Desta forma, no modelo foi considerado um descarregador acima do FCD (*trop-plein*) dimensionado para funcionar perante eventos de precipitação com um tempo de retorno de 100 anos (evento de precipitação extremo).

Por último, foi efetuada uma simulação do modelo para o ano completo de 2016 considerando os valores dos parâmetros obtidos no decorrer da análise de sensibilidade, sendo que os respetivos resultados são apresentados e discutidos no subcapítulo 4.2.

A ferramenta de modelação utilizada consiste numa integração do *software* de simulação hidráulica SWMM com o software de cálculo numérico MATLAB, através da ligação e comunicação estabelecida pelo software MATSWMM, conforme se abordará com maior detalhe no subcapítulo 3.2.

3.2 Plataforma de modelação

O *software Storm Water Management Model* (SWMM), é um modelo de gestão de drenagem urbana desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA) (Rossman, 2010). O SWMM consiste num modelo dinâmico chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas. Este modelo contempla duas componentes: hidrológica e hidráulica.

A componente relativa ao escoamento superficial do SWMM opera com um conjunto de sub-bacias hidrográficas que recebem precipitações e geram escoamentos, bem como, cargas poluentes.

O módulo de transporte hidráulico simula o percurso destas águas através de um sistema composto por coletores, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, bombas e elementos de regulação. Este modelo permite acompanhar a evolução da quantidade e qualidade do escoamento dentro de cada sub-bacia, assim como a vazão, a altura de

escoamento e a qualidade da água em cada coletor e canal, durante o período de simulação composto por múltiplos intervalos de tempo (Rossman, 2010).

Os motivos que justificam a escolha deste *software* são o facto de ser de livre acesso e código aberto, bem como, ser frequentemente utilizado para avaliar o comportamento de CSO integrados em redes de drenagem, conforme comprovam os vários estudos publicados neste âmbito por diversos autores.

No modelo do SWMM, o FCD foi implementado a montante do CSO, por forma a proporcionar um controlo da água escoada até este ponto. Desta forma, torna-se possível, através de CTR, realizar uma descarga progressiva da água que chega ao FCD e assim reduzir a quantidade de água que é descarregada a jusante no CSO e que posteriormente segue pelo coletor designado por pentagonal.

Será ainda importante referir que no modelo o FCD foi simulado recorrendo a um orifício, sendo que, as instruções de abertura ou fecho são definidas no código inserido no MATLAB. O modelo 1D da rede simulada no SWMM, bem como a legenda dos principais componentes é apresentado na Figura 3.4.

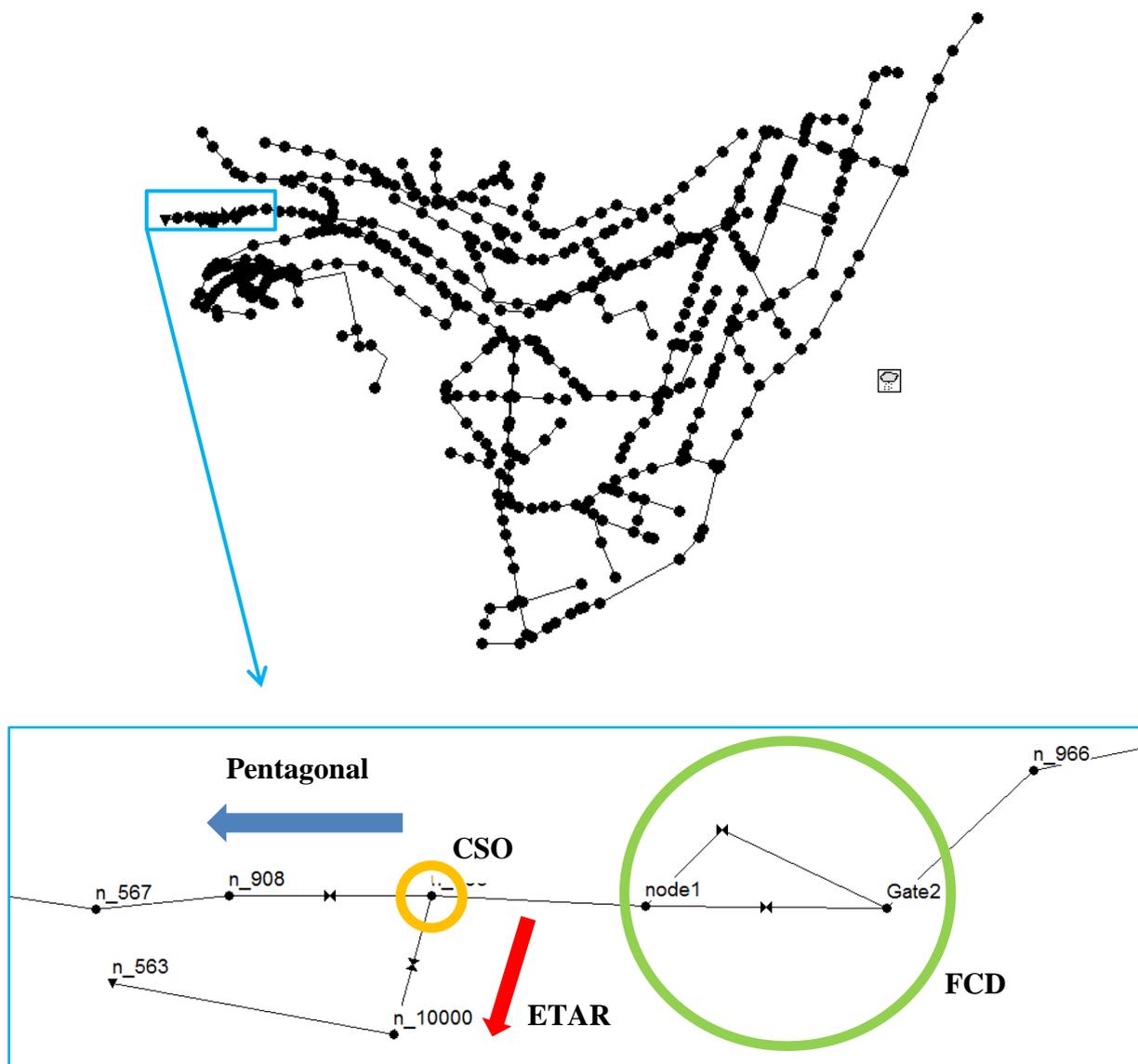


Figura 3.4 – Representação da rede de drenagem 1D no SWMM.

Na Figura 3.5 é apresentado o registo fotográfico efetuado no interior do coletor a montante do CSO:



Figura 3.5 – Registo fotográfico efetuado no interior do coletor a montante do CSO (cortesia de Nuno Simões).

Por sua vez, o MATLAB é fundamentalmente um programa de cálculo numérico. A estrutura de dados básica é a matriz, que pode ter elementos reais ou complexos. Além das funções de carácter genérico, existem também diversas bibliotecas de funções adicionais (designadas por *toolboxes*) que permitem expandir o seu potencial em domínios de aplicação mais específicos.

O código principal do modo de operação do FCD aplicado neste estudo foi criado em MATLAB e desenvolvido no âmbito do projeto CENTAUR.

Por último, o MATSWMM serve o propósito de ligar ambas as ferramentas anteriormente enunciadas e consiste num *software* que permite analisar e definir estratégias de CTR em sistemas urbanos de drenagem (Riano-Briceno, *et al.* 2016). Assim, a cada passo de cálculo, o SWMM e o MATLAB comunicam de forma a aplicar as regras de controlo do FCD.

O modelo 1D da rede de drenagem da zona central de Coimbra que será utilizado neste estudo foi desenvolvido por Simões (2012) no *software InfoWorks CS*, tendo sido posteriormente importado para o *software* SWMM.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Análise de sensibilidade

No presente subcapítulo e no próximo são apresentados os principais resultados obtidos no decorrer deste estudo e posteriormente é efetuada a respetiva discussão. Inicialmente foi efetuada uma análise de sensibilidade ao funcionamento do FCD desenvolvido no âmbito do projeto CENTAUR quando integrado num sistema unitário com o propósito de reduzir o número e o volume de descargas de emergência, com base na variação dos dois parâmetros que permitem ajustar o comportamento do FCD, conforme referido anteriormente. Para tal, foram considerados os dados pluviométricos relativos ao mês de Fevereiro de 2017 para realizar esta análise. A Figura 4.1 representa os resultados obtidos relativamente à análise de sensibilidade efetuada ao parâmetro *MaxDepth*, ou seja a altura de água no coletor que se pretende a jusante do FCD. O CSO apresenta uma altura de 0,6 m. No entanto, foram testados valores inferiores, por uma questão de segurança e eventual melhoria, uma vez que seria um objetivo mais exigente, dando assim alguma margem de segurança. É de realçar que o FCD tenta manter a altura de água abaixo deste valor, mas em algumas situações, pode não ser capaz.

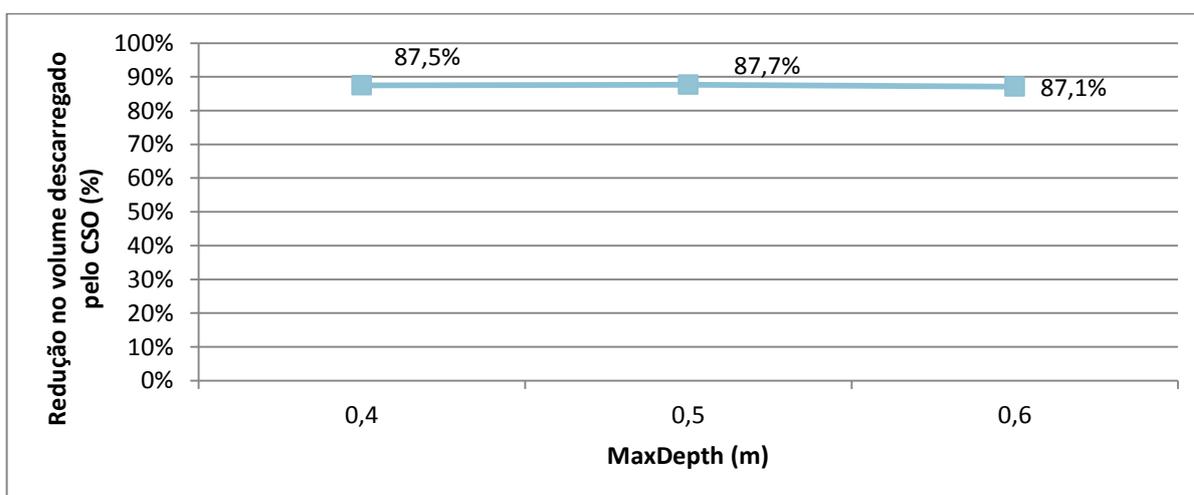


Figura 4.1 – Análise de sensibilidade ao parâmetro *MaxDepth*.

Conforme se pode observar na Figura 4.1, a maior redução do volume de descarga ocorrida no CSO verifica-se para um valor de *MaxDepth* correspondente a 0,5 m. Será importante referir que estas simulações foram efetuadas mantendo o parâmetro *MinGateOpening* com valor fixo, igual a 10%, porque apenas desta forma seria possível aferir sobre a influência do parâmetro *MaxDepth* no resultado final. Posteriormente, considerando um valor de *MaxDepth* igual a 0,5 m (valor para o qual se obteve maior redução do volume de descarga na análise anterior) procedeu-se à análise do parâmetro *MinGateOpening*, cujos resultados se encontram explicitados na Figura 4.2.

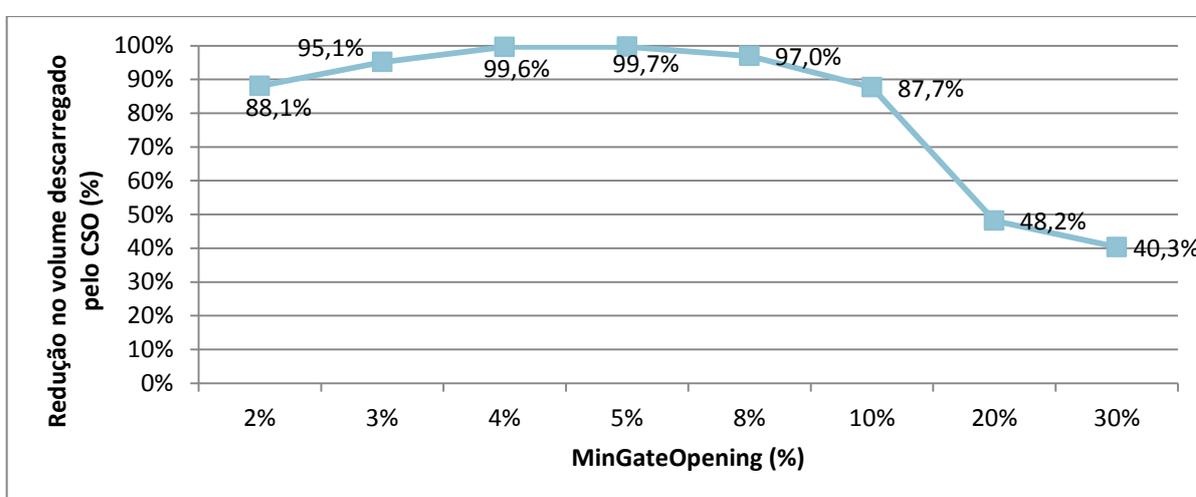


Figura 4.2 – Análise de sensibilidade ao parâmetro *MinGateOpening*.

Os resultados demonstrados na Figura 4.2 evidenciam que a maior redução do volume de descarga ocorre para um valor de *MinGateOpening* igual a 5%. Nesse sentido, os valores ótimos encontrados para os parâmetros indicados nesta análise foram posteriormente considerados no estudo que se explicita de seguida.

4.2 Modelo de Controlo em Tempo Real

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados de um ano completo da simulação do FCD em estudo com base nos dados pluviométricos relativos ao ano de 2016, em Coimbra. Nesse sentido, graficamente serão apresentados os resultados obtidos relativamente a um mês húmido (Fevereiro) e a um mês seco (Setembro), bem como um quadro resumo.

Ainda neste subcapítulo será apresentado um quadro resumo com os principais resultados obtidos relativamente ao ano completo de simulação. A Figura 4.3 apresenta o caudal descarregado pelo CSO (com e sem FCD) e o registo pluviométrico relativo a Fevereiro de 2016. A Figura 4.4 apresenta o caudal escoado até à ETAR (com e sem FCD) no mesmo período. Por sua vez, a Figura 4.5 apresenta as alturas de água a montante do FCD também no mesmo período.

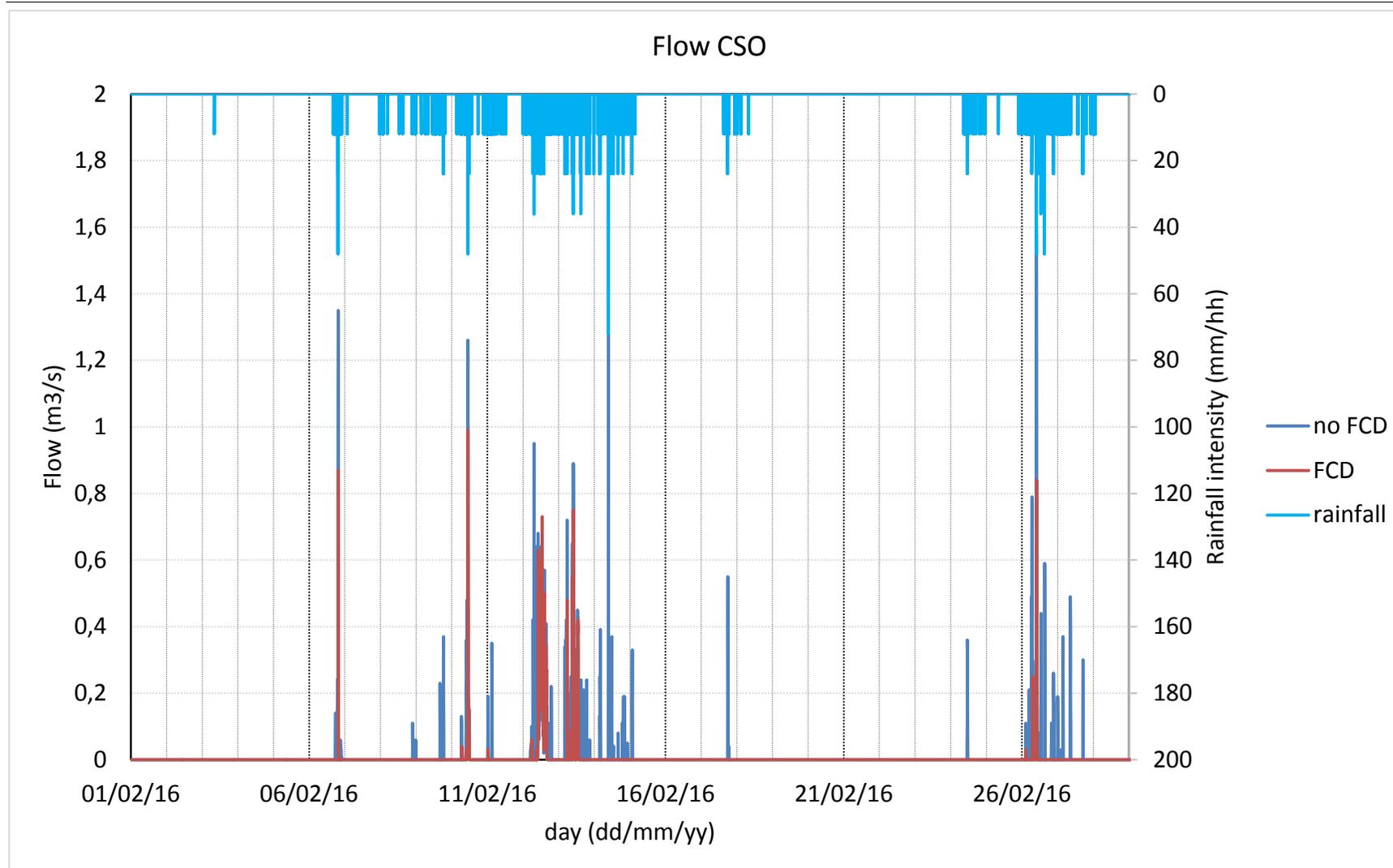


Figura 4.3 – Caudal descarregado pelo CSO (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Fevereiro de 2016.

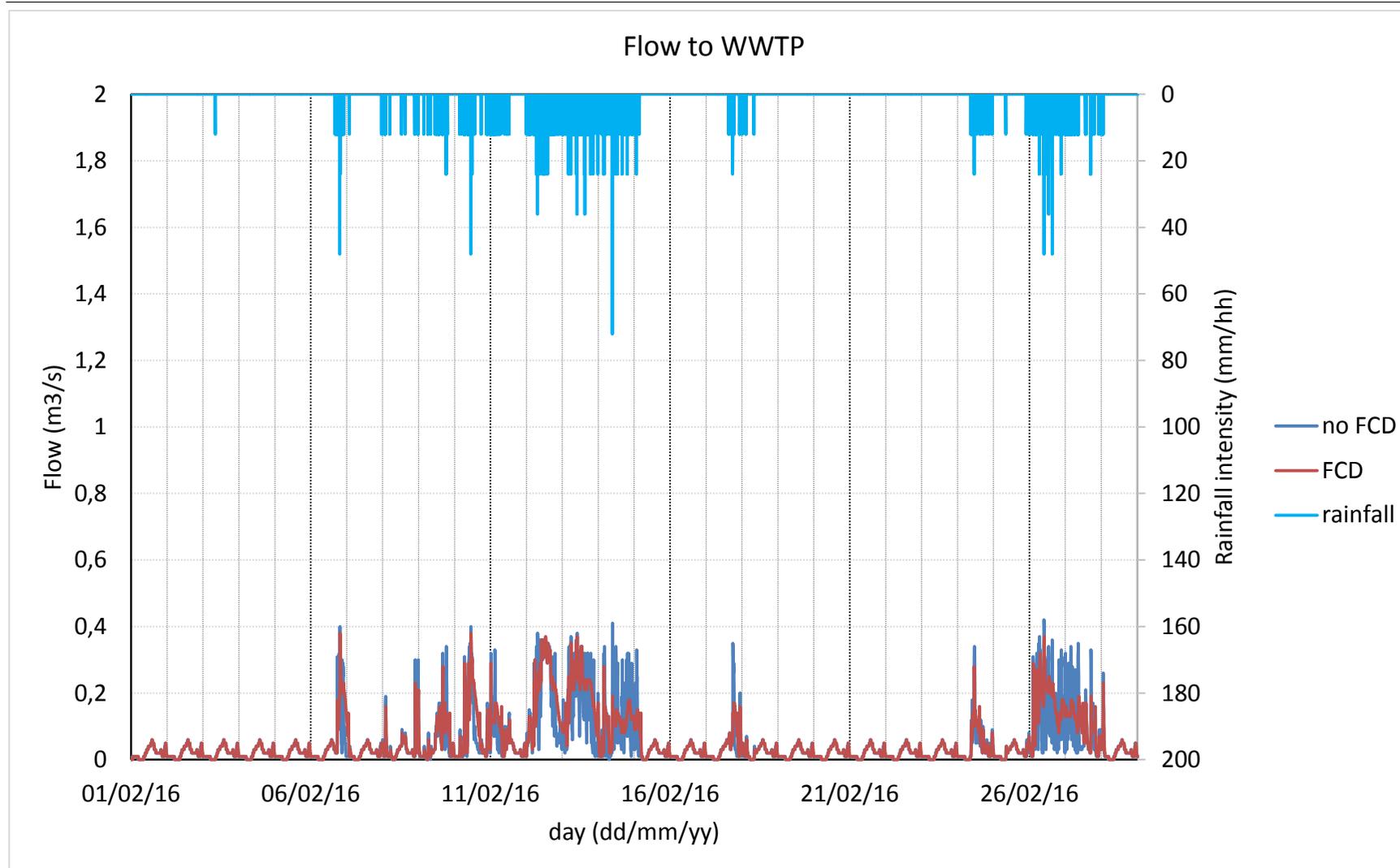


Figura 4.4 – Caudal escoado até à ETAR (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Fevereiro de 2016.

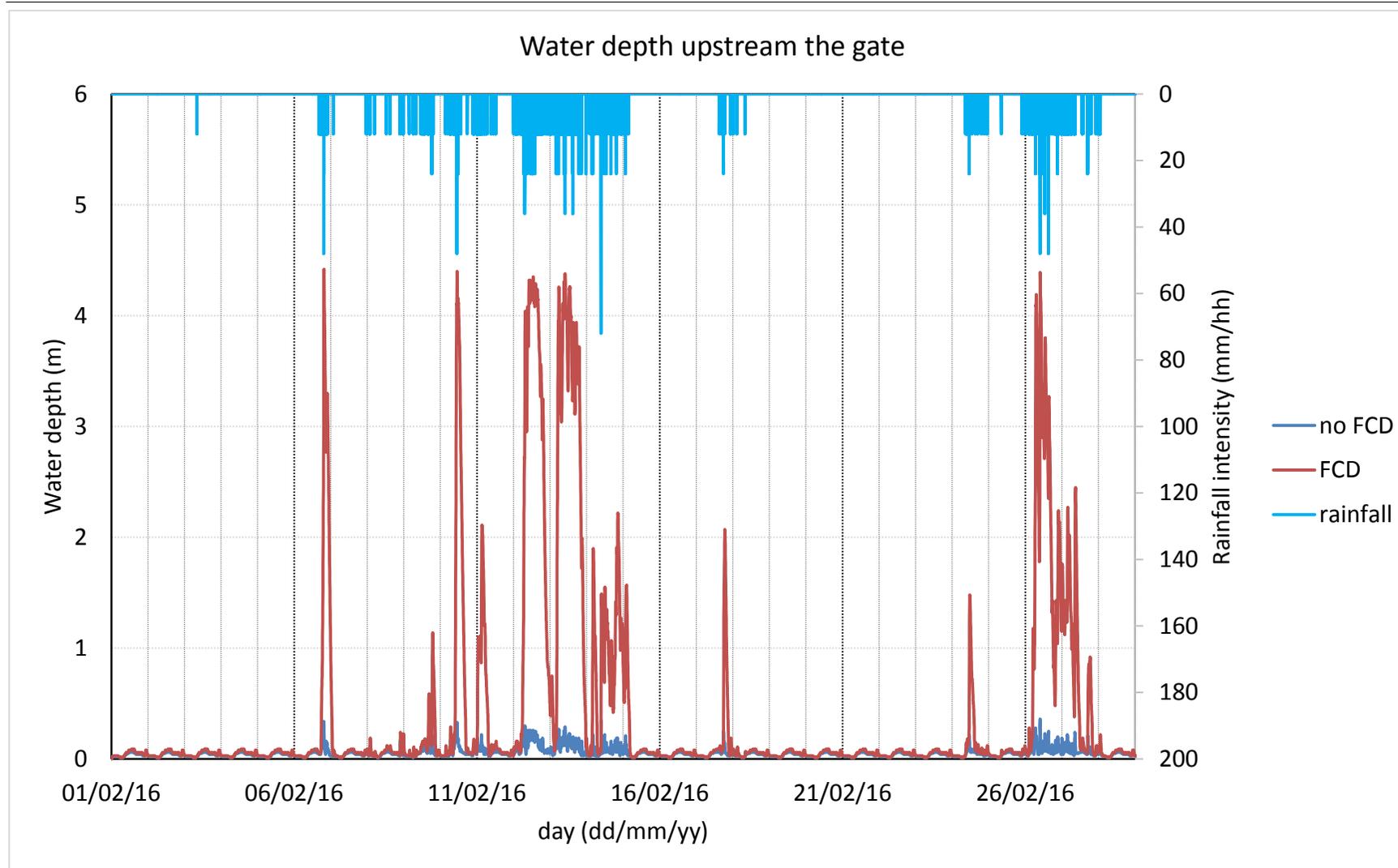


Figura 4.5 – Altura de água a montante do FCD (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Fevereiro de 2016.

A Figura 4.3 representa no eixo xx o período temporal da simulação em dias, no eixo yy principal (lado esquerdo) o caudal descarregado pelo CSO e no eixo yy secundário (lado direito) a intensidade da precipitação (mm/h). Ao analisar esta figura é evidente a redução do volume descarregado no CSO bem como número de vezes que tal acontece, em comparação com o cenário 0, onde não existe o FCD. A redução do volume descarregado pelo CSO relativa ao mês de Fevereiro de 2016 (onde se registou uma precipitação de 287 mm) é de 52% e o número de descargas reduz de 46 para 13, o que perfaz uma redução de 72%.

Por sua vez, a Figura 4.4 é em tudo idêntica à figura anteriormente analisada, com a diferença de apresentar no eixo yy principal (lado esquerdo) o caudal escoado até à ETAR. Conforme se pode observar, com a introdução do FCD os picos de caudal outrora verificados são atenuados.

Por último, a Figura 4.5 representa no eixo xx o período temporal da simulação em dias, no eixo yy principal (lado esquerdo) a altura de água a montante do FCD e no eixo yy secundário (lado direito) a intensidade da precipitação (mm/h). Conforme seria de esperar, em períodos de maior pluviosidade e consequentemente maior afluência de caudal, verifica-se que o FCD é ativado, o que provoca a acumulação de água a montante, aproveitando assim a capacidade de armazenamento disponível na rede de coletores.

Os resultados obtidos relativamente ao mês de Setembro de 2016, onde se registou uma precipitação de 25 mm, são apresentados nas figuras seguintes.

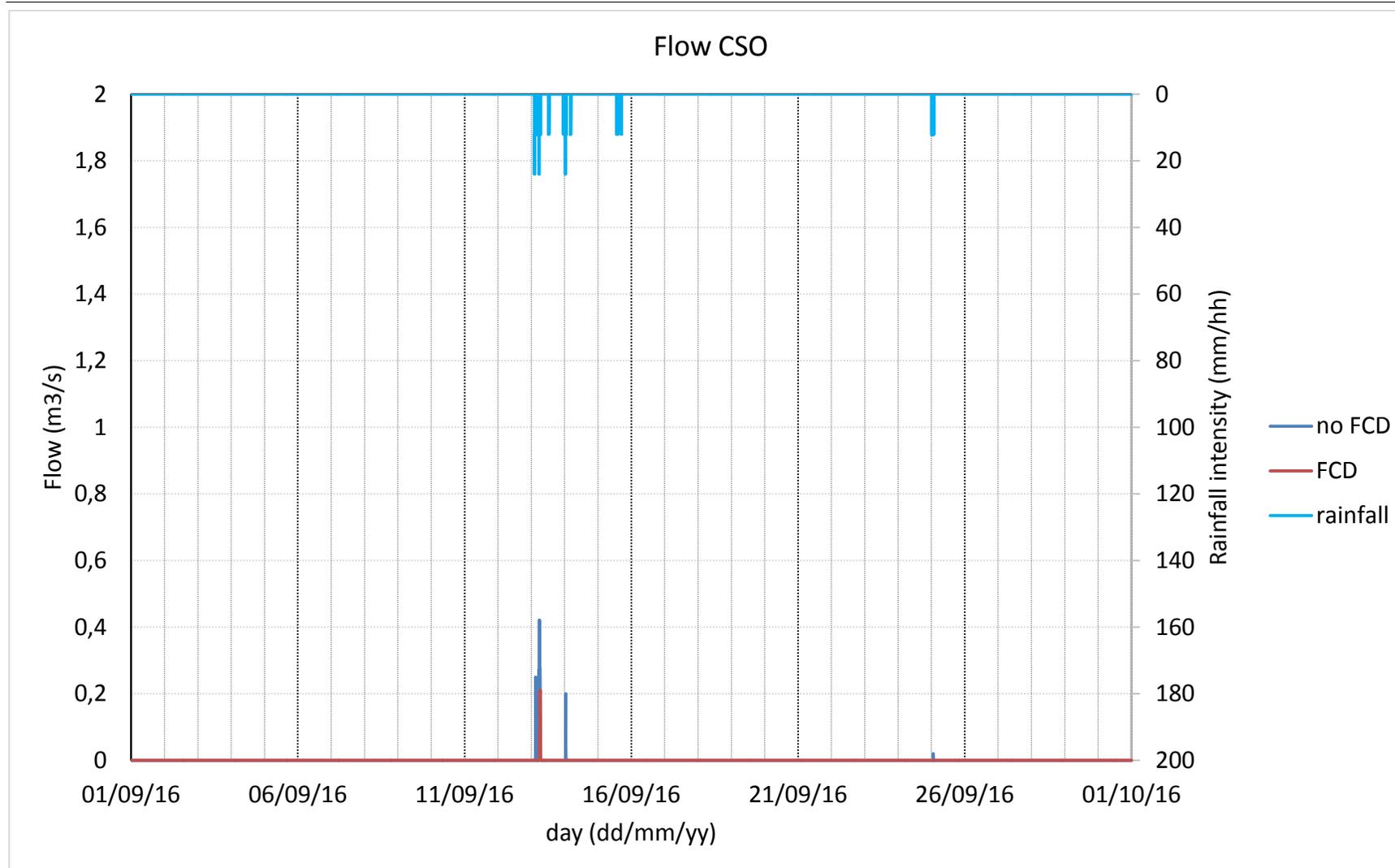


Figura 4.6 – Caudal descarregado pelo CSO (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Setembro de 2016.

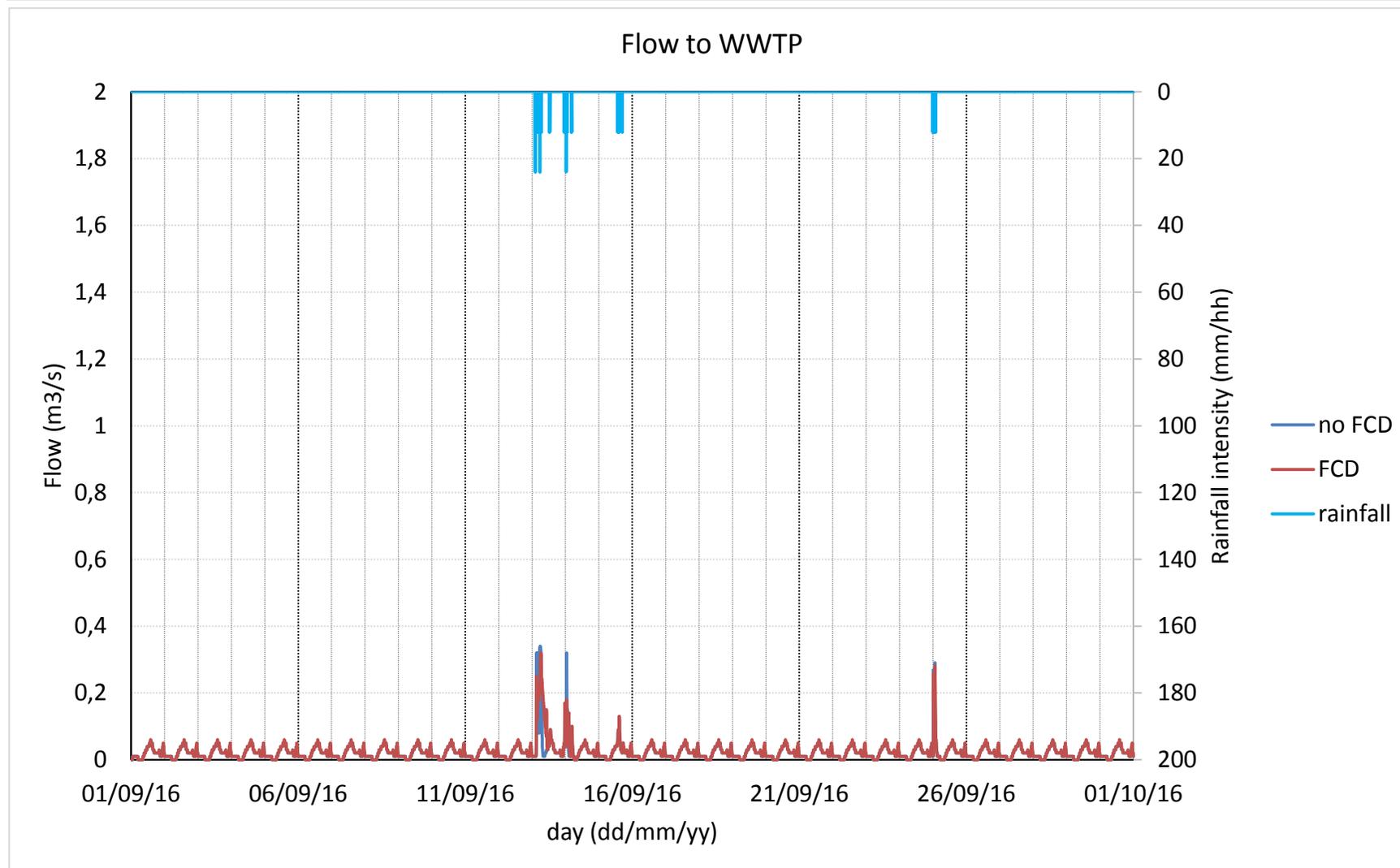


Figura 4.7 – Caudal escoado até à ETAR (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Setembro de 2016.

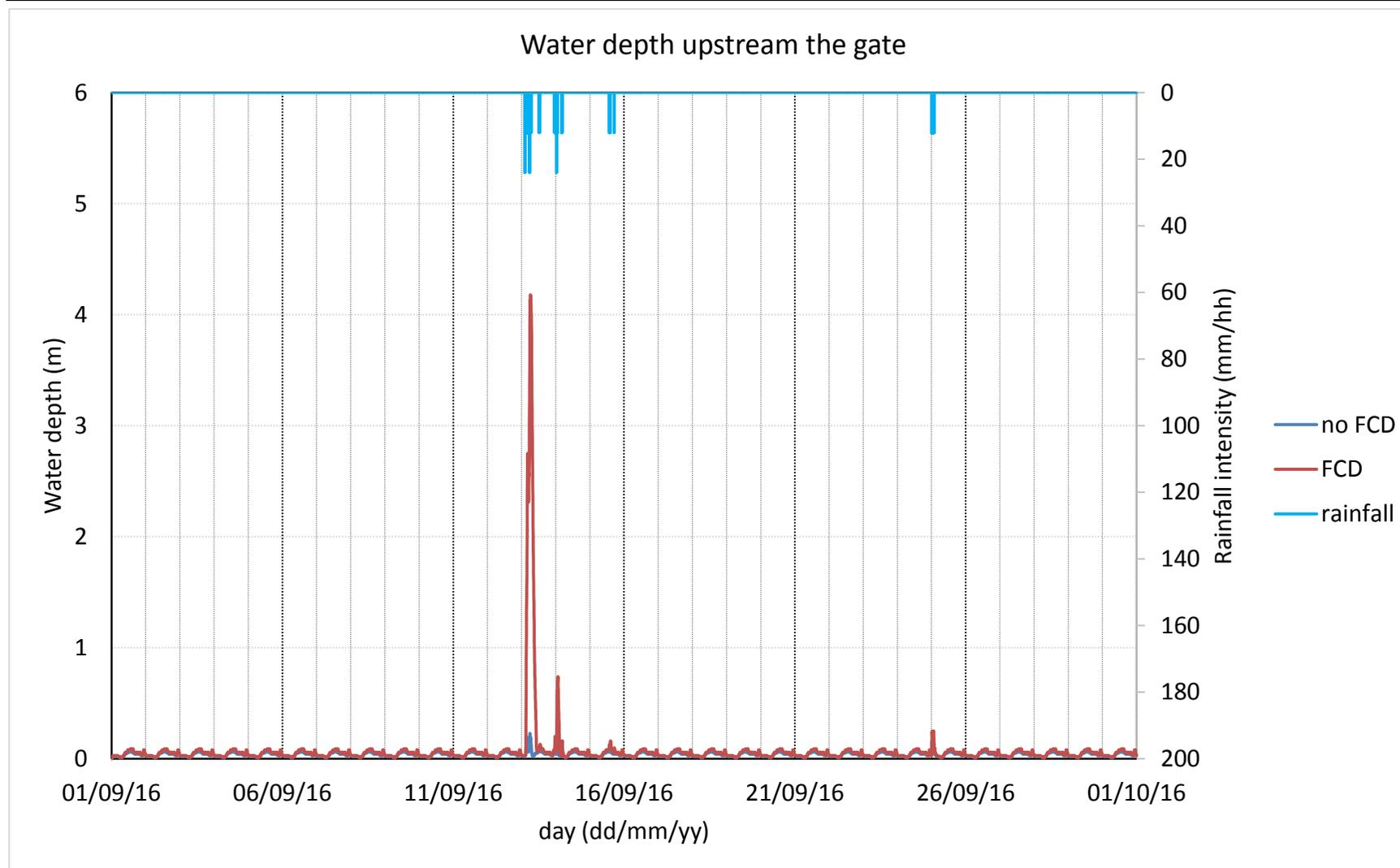


Figura 4.8 – Altura de água a montante do FCD (com e sem FCD) e registo pluviométrico, Setembro de 2016.

Os resultados obtidos relativamente ao mês de Setembro de 2016 evidenciam que o comportamento do sistema em estudo também é válido perante a afluência de caudais mais reduzidos (Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8). Neste caso verificou-se uma redução do volume descarregado pelo CSO de 74% e uma redução do número de descargas de 75%, conforme se pode constatar através da análise do Quadro 1, onde é apresentado um resumo dos resultados obtidos nas simulações do modelo:

Quadro 1 – Resumo dos resultados quantitativos relativos aos meses de Fevereiro e Setembro do ano 2016.

	Fevereiro de 2016	Setembro de 2016
Precipitação (mm)	287	25
Com FCD	Volume, descarregado para o Pentagonal (m ³)	11022
	Volume, afluente ao emissário com destino à ETAR (m ³)	133524
	Volume, <i>Flooding</i> (m ³)	8298
	Volume, armazenado (m ³)	45
	N.º de descargas	13
Sem FCD	Volume, descarregado para o Pentagonal (m ³)	23100
	Volume, afluente ao emissário com destino à ETAR (m ³)	121956
	Volume, <i>Flooding</i> (m ³)	8298
	Volume, armazenado (m ³)	46
	N.º de descargas	46
Balanço de volumes (% de erro)	0,4%	1,5%
Redução do n.º de descargas	71,7%	75,0%
Redução do volume descarregado	52,3%	74,3%

No Quadro 2 são apresentados os resultados obtidos em termos quantitativos relativamente ao ano completo de 2016:

Quadro 2 – Resumo dos resultados quantitativos relativos ao ano 2016.

	1º Trimestre	2º Trimestre	3º Trimestre	4º Trimestre	Total	
Precipitação (mm)	661	213	30	315	1218	
Com FCD	Volume, descarregado para o Pentagonal (m ³)	10449	627	5	9967	21048
	Volume, afluyente ao emissário com destino à ETAR (m ³)	365907	236333	169852	250880	1022972
	Volume, <i>Flooding</i> (m ³)	26090	25107	24915	26270	102382
	Volume, armazenado (m ³)	46	46	46	46	184
	N.º de descargas	15	5	1	9	30
Sem FCD	Volume, descarregado para o Pentagonal (m ³)	55266	15837	1542	36813	109458
	Volume, afluyente ao emissário com destino à ETAR (m ³)	319872	219225	163917	222717	925731
	Volume, <i>Flooding</i> (m ³)	26090	25107	24915	26270	102382
	Volume, armazenado (m ³)	46	45	46	46	183
	N.º de descargas	61	30	5	31	127
Balço de volumes (% de erro)	0,3%	0,8%	2,6%	0,5%	1,1%	
Redução do n.º de descargas	75,4%	83,3%	80,0%	71,0%	77,4%	
Redução do volume descarregado	81,1%	96,0%	99,7%	72,9%	87,4%	

Conforme é possível analisar no Quadro 2, as simulações efetuadas permitiram concluir que, recorrendo à implementação de um único sistema de CTR na atual rede da zona central de Coimbra foi possível diminuir o número de descargas em 77% e em cerca de 87% o volume descarregado no CSO (com base em dados de precipitação referentes ao ano completo de 2016, onde se registou uma precipitação de 1218 mm). Durante o primeiro trimestre, onde foi registado o maior valor de precipitação (661 mm), verificou-se uma diminuição do número de descargas em 75% e em cerca de 81% no volume descarregado no CSO. Por sua vez, no terceiro trimestre, onde foi registado o menor valor de precipitação (30 mm), verificou-se uma diminuição do número de descargas em 80% e em cerca de 99% no volume descarregado no CSO.

O FCD em estudo funciona muito bem no controlo de descargas ocorridas em CSO, permitindo diminuir drasticamente o impacte ambiental causado por estas descargas de água residual não tratada no meio recetor.

Será importante referir que o volume relativo ao *flooding* (volume acumulado relativo a nós que entraram em carga, exportado pelo SWMM) indicado em ambos os Quadros está relacionado com a existência de alguns nós da rede, afastados da zona em estudo e que,

segundo o modelo computacional, entram em carga muito frequentemente. No entanto, não apresentam relevância para o estudo aqui apresentado (com e sem FCD, verifica-se que o volume é igual). Por sua vez, o erro no balanço de volumes, apresentado em percentagem, está relacionado com o passo utilizado no processo de cálculo do *software* SWMM e tem influência direta na duração de cada simulação, que por sua vez depende da capacidade de processamento do computador utilizado.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O processo de urbanização e as alterações climáticas têm vindo a provocar um aumento do caudal escoado nas redes de drenagem, que por sua vez provoca um aumento da ocorrência de inundações, de descargas de emergência e dos encargos com energia e tratamento. Consequentemente, o aumento do número de descargas de emergência dos CSO induzido pelo aumento dos eventos de precipitação extrema, coloca em risco a qualidade das águas e dos habitats onde essas descargas ocorrem. De facto, devido à sua carga poluente, as descargas de emergência que ocorrem em CSO têm vindo a ser reconhecidas como um grave problema ambiental em muitos países.

A DQA estabelece um quadro para o desenvolvimento de políticas integradas de gestão da água, por forma a garantir o bom estado químico das massas de água, subterrâneas ou de superfície, em toda a Europa, impondo limites à concentração de poluentes na água.

Nesse sentido, torna-se fulcral estudar e implementar soluções que permitam dar uma resposta efetiva aos problemas atualmente enfrentados pela drenagem de água em meios urbanos, entre os quais se destaca a problemática de carácter ambiental e de saúde pública das descargas de emergência que ocorrem em CSO.

Geralmente os sistemas de drenagem urbana são projetados segundo uma lógica conservadora, sendo considerados fatores de segurança que originam coletores de maior dimensão do que a estritamente necessária. Neste contexto, o projeto CENTAUR pretende ser um sistema de CTR económico, descentralizado e autónomo (autoaprendizagem) que aproveita o espaço disponível e já existente nos coletores, por forma a diminuir a ocorrência de inundações.

Por sua vez, no estudo aqui apresentado o dispositivo inovador e autónomo e o respetivo algoritmo desenvolvidos no âmbito do projeto CENTAUR foram testados e adaptados, por forma a obter uma diminuição do volume e número de descargas ocorridas num CSO integrado no sistema unitário da Zona Central, em Coimbra, reduzindo assim drasticamente o impacto ambiental provocado no meio hídrico recetor.

Numa segunda fase, após a definição do objetivo proposto, foi necessário proceder à seleção do melhor local para implementação do dispositivo de controlo de caudal com base no estudo realizado por Leitão *et al.* (2018).

Posteriormente foi efetuada uma análise de sensibilidade aos principais parâmetros responsáveis por controlar o funcionamento da comporta estudada, designadamente a altura de água imediatamente a montante do CSO e a percentagem mínima de abertura do FCD. A análise foi conduzida com base nos dados de precipitação relativos a Fevereiro de 2017, tendo-se verificado que a maior percentagem de redução do volume descarregado ocorreu para uma altura de água de 0,5 m e uma percentagem mínima de abertura do FCD de 5%.

Por último, as simulações efetuadas e explicitadas neste documento permitiram concluir que, recorrendo à implementação de um único sistema de CTR na atual rede da zona central de Coimbra foi possível diminuir o número de descargas em 77% e em cerca de 87% volume descarregado no CSO (com base em dados de precipitação referentes ao ano completo de 2016), diminuindo assim drasticamente o impacto ambiental causado por estas descargas de água residual não tratada no meio recetor. Nesse sentido, esta solução pode promover uma desejável melhoria na qualidade da água do meio recetor por via da redução das descargas de emergência, indo de encontro ao teor legal plasmado na DQA, designadamente, garantir o bom estado químico das massas de água.

Pelo facto de poder ser aplicada na rede existente de forma não intrusiva, esta solução inovadora apresenta-se como vantajosa do ponto de vista ambiental (cujas restrições legais serão tendencialmente mais severas no futuro) e da melhoria da capacidade de adaptação às consequências das alterações climáticas, podendo ser replicada sobretudo em zonas urbanas onde a logística e o custo associado a transformações profundas de uma rede de drenagem é elevado.

Como sugestões para trabalhos futuros, seria importante obter informação sobre a qualidade da água que é descarregada, seja através de uma simulação recorrendo ao *software* SWMM ou outro, bem como através medições *in situ* deste índice (estudando a evolução da concentração de poluentes, como por exemplo sólidos suspensos totais).

Adicionalmente, será relevante referir a elaboração de uma análise energética e do custo de implementação do sistema aqui apresentado, por forma a confirmar a sua viabilidade económica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel-Aal, M., Shepherd, W., Ostojin, S., Mounce, S., Shucksmith, J., Schellart, A., Skipworth, P., Steinhardt, J. e Tait, S. (2017). “Developing and testing a Fuzzy Logic algorithm to alleviate the risk of flooding by controlling a flow control device in a laboratory setting”. 14th IWA / IAHR International Conference on Urban Drainage. ICUD-0198.

Barbosa, A.E., Fernandes, J.N. e David, L.M. (2012). “Key issues for sustainable urban stormwater management”. *Water Research* 46, 6787-6798.

Beeneken, T., Erbe, V., Messmer, A., Reder, C., Rohlfing, R., Scheer, M., Schuetze, M., Schumacher, B., Weilandt, M. e Weyand, M. (2013). “Real time control (RTC) of urban drainage systems – A discussion of the additional efforts compared to conventionally operated systems”. *Urban Water Journal*, 10:5, 293-299.

Butler, D. e Davies, J. W. (2011). *Urban Drainage*. Oxon, Spon Press.

Comissão Europeia (2008). *Poluição: Reduzir os produtos químicos perigosos nas águas da Europa*, Water Information System for Europe.

Debo, T. N. e Reese, A. J. (2003). *Municipal Stormwater Management*. Florida, Lewis Publishers.

Decreto-Lei n.º 11/87, de 7 de Abril (1987).

Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto (1998).

Decreto-Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro (2005).

Diretiva n.º 2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro (2000).

Diretiva n.º 2004/35/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de Abril (2004).

Diretiva n.º 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de Maio (1991).

Estellés, M. A. A. (2010). *Analysis of rainfall data and rainfall forecasting techniques used as input for urban pluvial flood simulation and prediction*. Tese de Mestrado, Department of Civil Engineering - Imperial College, Londres.

Fletcher, T.D. e Deletic A. (2007). “Statistical evaluation and optimisation of stormwater quality monitoring programmes”. *Water Sci Technol*. 56(12):1-9.

Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, Bertrand-Krajewski, J., Mikkelsen, P.S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D. e Viklander, M. (2015). “SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage”. *Urban Water Journal*, 12:7, 525-542.

Freixial, P. e Franco, M. J. (2012). Controlo de descargas de águas residuais no âmbito da regulação da qualidade dos serviços prestados aos utilizadores. Encontro Técnico da Comissão Sectorial para a Água (CS/04), Almada.

García, L., Barreiro-Gomez, J., Escobar, E., Téllez, D., Quijano, N. e Ocampo-Martinez, C. (2015). “Modeling and real-time control of urban drainage systems: A review”. *Advances in Water Resources* 85, 120–132.

Garofalo, G., Giordano, A., Piro, P., Spezzano, G. e Vinci, A. (2017). “A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems”. *Journal of Network and Computer Applications* 78, 30–42.

Kobayashi, F. Y., Faggion, F. H. M., Bosco, L. M. D., Chirinéa, M. L. B. e Fernandes, M. (2008). *Drenagem Urbana Sustentável*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia hidráulica e Sanitária.

Leitão, J. P., Matos, J. S., Maksimovic, C. e Prodanovic, D. (2008). Modelos de simulação do escoamento superficial em meio urbano - potencialidades e limitações. 13º Encontro Nacional de Saneamento Básico, Covilhã.

Leitão, J.P., Carbajal, J.P., Rieckermann, J., Simões, N.E., Sá Marques, A. e Sousa, L.M. (2018). “Identifying the best locations to install flow control devices in sewer networks to enable in-sewer storage”. *Journal of Hydrology*, Volume 556, Pages 371-383.

Lima, J. L. M. P. (2005). *Hidrologia Urbana*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.

Mailhot, A., Talbot, G. e Lavallée, B. (2015). “Relationships between rainfall and Combined Sewer Overflow (CSO) occurrences”. *Journal of Hydrology* 523, 602-609.

Maluf, L., Shepherd, W., Ostojin, S., Simões, N., Sá Marques, A., Mounce, S., Skipworth, P. e Leitão, J.P. (2017). “Real time flow control to utilise existing in-sewer storage “. 14th IWA / IAHR International Conference on Urban Drainage. ICUD-0448.

Matos, J. S. (2003). "Aspetos Históricos e Atuais da Evolução da Drenagem de Águas Residuais em Meio Urbano." *Revista Engenharia Civil* 16: 13-23.

Mays, L. W. (2004). *Stormwater Collection Systems Design Handbook*, McGraw-Hill.

Metcalf, E., Tchobanoglous, G., Burton, F. L. e Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. New York, McGraw-Hill.

- Pabst, M., Alex, J., Beier, M., Niclas, C., Ogurek, M., Peikert, D. & Schütze, M. (2011) "ADESBA-A new general global control system applied to the Hildesheim sewage system". Proceedings of the 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre.
- Petruck, A., Holtmeier, E., Redder, A., Teichgräber, B. (2003). "Real Time Control of a Combined Sewer System using Radar-Measured Precipitation – Results of the Pilot Study". *Water Science Technology*, 47, No. 78, pp. 365 – 370.
- Pordata (2017). Acedido a 6/12/2017 em: <https://goo.gl/nPTwgV>
- Poulsen, T.S., Joergensen, A.T. e Thirsing, C. (2017). "Proactive online control of waste water using PRACT". 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage, ICUD-0214.
- Price, R. K. e Vojinovic, Z. (2011). *Urban Hydroinformatics*. London, IWA Publishing.
- Riano-Briceno, G., Barreiro-Gomez, J., Ramirez-Jaime, A., Quijano, N. e Ocampo-Martinez, C. (2016). "MatSWMM - An open-source toolbox for designing real-time control of urban drainage systems". *Environmental Modelling & Software* 83, 143-154.
- Rogers, P. (1994). "Hydrology and water quality. Changes in land use and land cover: A global perspective". Cambridge University Press.
- Rossman, L. A. (2010). *Storm Water Management Model - User's Manual, Version 5.0*. Cincinnati, National Risk Management Research Laboratory.
- Sá Marques, A. e Sousa, J. (2008). *Hidráulica Urbana - Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais*. Coimbra, Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Sá Marques, A., Lima, J. P. d., Sousa, J., Simões, N. E. e Pina, R. (2013). *Hidrologia Urbana - Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais Urbanas*. Lisboa, ERSAR e Universidade de Coimbra.
- Schütze, M., Campisano, A., Colas, H., Schilling, W. e Vanrolleghem, P.A. (2004). "Real time control of urban wastewater systems—where do we stand today?". *Journal of Hydrology* 299, 335–348.
- Simões, N. E. (2012). *Urban Pluvial Flood Forecasting*. Tese de Doutoramento, Department of Civil Engineering - Imperial College, Londres.
- Struck, S. (2017). "Modeling and results to support retrofit projects that apply real time controls for improved stormwater management performance". 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage, ICUD-0446.
- Temprano, J., Arango, Ó., Cagiao, J., Suárez, J. e Tejero, I. (2006). "Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain". *Water SA* 32 (1).

The University of Sheffield (2017). “Cost Effective Neural Technique for Alleviation of Urban Flood Risk - CENTAUR”. Acedido a 14/12/2017 em: <https://www.sheffield.ac.uk/centaur>

Tucci, C. E. M. (2008). “Urban waters”. Estudos avançados, vol.22, no.63, São Paulo.

Vezzaro, L. e Grum, M. (2014). “A generalised Dynamic Overflow Risk Assessment (DORA) for Real Time Control of urban drainage systems”. Journal of Hydrology 515, 292–303.

Vitasovic, Z. C. (2006). “Real Time Control of Urban Drainage Networks”. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-06/120, Washington, DC.

Woods-Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R. e P. Kellagher, R. (2015). The SUDS manual. Ciria. London.

Wortberg, T., Mietzel, T., Gerner, N., Flores, C. e Schuetze, M. (2017). “Potential analysis and assessment of a real time control system aiming at reduction of combined sewer overflow volumes”. 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage, ICUD-0423.