



*Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni*

# **Definizione e sperimentazione di un sistema per la gestione dei deflussi nella rete idrica tramite smart object**

Giuseppina Garofalo<sup>(2)</sup>,  
Andrea Giordano<sup>(1)</sup>,  
Giandomenico Spezzano<sup>(1)</sup>,  
Andrea Vinci<sup>(1)</sup>

(1) ICAR-CNR

(2) Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria

**RT-ICAR-CS-15-04**

**Ottobre 2015**



Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni (ICAR)  
– Sede di Cosenza, Via P. Bucci 41C, 87036 Rende, Italy, URL: [www.icar.cnr.it](http://www.icar.cnr.it)  
– Sezione di Napoli, Via P. Castellino 111, 80131 Napoli, URL: [www.icar.cnr.it](http://www.icar.cnr.it)  
– Sezione di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, URL: [www.icar.cnr.it](http://www.icar.cnr.it)

## Sommario

In questo documento è presentato un sistema di controllo in tempo reale per reti di drenaggio urbano in grado di evitare o mitigare i fenomeni di allagamento, sempre più frequenti a causa della crescente urbanizzazione del territorio e del cambiamento climatico. L'approccio qui descritto utilizza un sistema di paratoie regolabili, controllate da agenti software che utilizzano un algoritmo decentralizzato basato su gossip per coordinarsi al fine di ottimizzare la capacità di invaso effettiva della rete fognaria.

# Indice

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduzione</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Reti di deflusso urbano e allagamenti</b>                          | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Controllo real-time distribuito per reti di deflusso urbane</b>    | <b>7</b>  |
| 3.1      | Smart paratoie . . . . .  | 7         |
| 3.2      | Formalizzazione e ottimizzazione di reti di deflusso urbane . . . . . | 8         |
| 3.2.1    | Algoritmo gossip-based . . . . .                                      | 14        |
| 3.2.2    | Regolare la paratoia tramite PID . . . . .                            | 15        |
| 3.3      | Implementazione . . . . .   | 16        |
| 3.3.1    | SWMM . . . . .  | 16        |
| 3.3.2    | Customizzazione SWMM . . . . .  | 17        |
| <b>4</b> | <b>Evidenze sperimentali</b>  | <b>18</b> |
| 4.1      | Scenario . . . . .  | 18        |
| 4.1.1    | Maximum Capacity Reduction, CRmax . . . . .                           | 19        |
| 4.1.2    | Capacity Reduction 80%, CR80 . . . . .                                | 20        |
| 4.1.3    | Delay in peak maximum capacity, DTp . . . . .                         | 20        |
| 4.2      | Risultati . . . . .   | 20        |

## Elenco delle figure

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Due severi allagamenti . . . . .  | 6  |
| 2  | Paratoia regolabile elettronicamente . . . . .  | 8  |
| 3  | esempi di reti in base alla definizione . . . . .   | 9  |
| 4  | sotto reti in un caso realistico . . . . .  | 10 |
| 5  | Posizione delle paratoie . . . . .  | 12 |
| 6  | Gli Agenti nelle reti generate . . . . .  | 14 |
| 7  | controllore PID. . . . .  | 15 |
| 8  | SWMM. . . . .   | 16 |
| 9  | Customizzazione SWMM. . . . .   | 17 |
| 10 | Caso di studio: Rete di drenaggio città di Cosenza . . . . .  | 18 |
| 11 | Precipitazioni ed idrografi per lo scenario 0 e lo scenario 1 riferiti<br>agli eventi del 11 ottobre e l'11 marzo 2011. Valori riferiti alla<br>sezione d'uscita della rete . . . . .                           | 20 |
| 12 | Distribuzione temporale del livello di riempimento per le condotte<br>4 (a, b), 5 (c,d) e 7 (e,f) e per le parti più critiche degli eventi<br>dell'8 ottobre 2011 (a,c,e) e del 11 Marzo 2011 (b,d,f) . . . . . | 21 |
| 13 | Riduzione del $CR_{max}$ e ae del $CR_{80}$ . . . . .   | 22 |

## Listings

# 1 Introduzione

I fenomeni di allagamento in ambiente urbano, sempre più frequenti a causa della crescente urbanizzazione e del cambiamento climatico, si verificano a causa dell'inefficienza idraulica delle reti di drenaggio in concomitanza ad eventi meteorici intensi e/o a eventuali occlusioni e intasamenti in caditoie e condotte dovuti ad una non corretta e scarsa manutenzione. Per gestire gli allagamenti in aree urbane ed evitare il sovraccarico della rete di drenaggio al di sopra dei valori prefissati da normativa (grado di riempimento  $GR < 75\%$ ) si ricorre, frequentemente, a soluzioni efficaci, ma molto dispendiose sia dal punto di vista economico che tecnico-ambientale, quali, ad esempio, la realizzazione di vasche volano, di bacini di laminazione, etc. [4]. Negli ultimi anni, invece, grazie al potenziamento degli strumenti hardware e software la comunità scientifica ha rivolto il suo interesse verso soluzioni tecnologiche innovative di controllo in tempo reale (RTC) delle reti di drenaggio urbano. Queste tecniche offrono numerosi vantaggi sia dal punto di vista tecnico-ambientale sia economico, poichè permettono di ottimizzare in maniera dinamica la capacità di invaso della rete di drenaggio urbano già esistente attraverso l'uso di "attuatori" [2]. In questo documento si propone un RTC dei sistemi di drenaggio utilizzando un sistema di paratoie intelligenti, che durante eventi intensi si autoregolano per ottimizzare la capacità di invaso effettiva delle condotte fognarie. L'idea progettuale è quella di dotare la rete di deflusso di sensori che monitorano flusso e capacità delle condotte, e paratie controllabili elettronicamente. L'apertura graduale delle paratoie si basa sul bilanciare le capacità di riempimento delle condotte localmente in ogni punto della rete. Sebbene un sistema RTC presenta numerosi vantaggi, al tempo stesso rimane una problematica complessa, vista la quantità di dati che il sistema deve registrare, gestire e processare. In un sistema centralizzato le misure monitorate sono riportate ad una unità centrale che definisce, in base al modello, le attuazioni su tutte le paratoie. Un approccio del genere prevede una complessa modellazione matematica, che può risultare molto difficile e in alcuni casi non fattibile. Pur ammettendo di avere a disposizione il modello, un controllo così complesso comporterebbe dei tempi di elaborazione e risposta troppo lunghi rispetto alla velocità di evoluzione del sistema fisico. Peraltro, un controllo di questo tipo difficilmente si adatta a eventi non previsti quali: intasamento condotte o pozzetti, lesioni strutturali, etc. Un controllo centralizzato non è indicato anche per una motivazione squisitamente tecnica/tecnologica: sarebbe necessario che tutta la parte fisica (sensori, paratoie) sia accessibile remotamente. L'approccio proposto in questo documento prevede un sistema completamente distribuito. Diversi nodi di calcolo sono diffusi all'interno della rete di deflusso e opportunamente collegati ai sensori ed alle paratoie. Ogni nodo di calcolo può comunicare solo con i nodi fisicamente vicini, tramite collegamento wired o wireless. Il controllo

complessivo è distribuito su questa rete di nodi di calcolo e realizzato utilizzando il paradigma multi-agente e più specificatamente algoritmi di swarm intelligence [1]. Tali algoritmi prevedono che si definisca il comportamento di semplici entità che, interagendo tra loro, producono una cosiddetta proprietà emergente. Nel contesto delle reti di deflusso le semplici entità sono rappresentate da agenti/paratoie e la proprietà emergente è il bilanciamento delle capacità delle condotte. Approcci di swarm intelligence godono, tra l'altro, della proprietà di adattatività verso eventi non previsti a priori come quelli menzionati precedentemente. In questo studio un esempio di rete di drenaggio urbano con paratoie intelligenti soggetta a un evento critico è stata modellata con il software SWMM [5] modificato per permettere l'interazione real-time con un modulo software esterno che realizza l'algoritmo di swarm intelligence. I risultati dimostrano che l'uso di paratoie intelligenti forniscono effetti positivi sul rendimento idraulico complessivo della rete riducendo sensibilmente il fenomeno dell'allagamento.

## 2 Reti di deflusso urbano e allagamenti

Tradizionalmente, con il termine fognature si intende il sistema di impianti destinato all'allontanamento delle acque reflue e meteoriche dal centro abitato. Oggi tale termine viene sostituito dalla denominazione *sistema di drenaggio urbano*, sottintendendo un insieme di impianti destinati sia all'allontanamento delle acque, sia al controllo dell'inquinamento sull'ambiente.

Gli elementi di un sistema di drenaggio urbano sono:

- Opere di raccolta delle acque meteoriche (caditoie e pluviali) e reflue (scarichi privati)
- Reti di collettori stradali
- Opere per il controllo idraulico ed ambientale (vasche di prima pioggia, scaricatori di piena, vasche volano, impianti di sollevamento)
- Impianti per il trattamento e lo scarico nel corpo ricettore dei reflui

Un sistema di drenaggio urbano deve quindi garantire da un lato una efficace difesa idraulica del centro abitato, dall'altro un controllo sulla qualità degli scarichi dei reflui nel corpo idrico. Le acque che vengono convogliate in un sistema di drenaggio urbano sono di due tipologie principali:

- Acque nere, costituite dai reflui civili e/o industriali.
  - Basse portate, poca variabilità

- Caratteristiche qualitative particolarmente nocive per l'ambiente
- Acque meteoriche (bianche)
  - Portate elevate con elevata variabilità nel tempo e nello spazio (per sistemi molto estesi)
  - Qualità variabile: scarsa durante la prima fase dell'evento meteorico (dilavamento strade), che migliora con il tempo

Quando una rete di deflusso funziona male o è sovraccaricata dall'ingresso dell'acqua meteorica può avvenire il fenomeno dell'allagamento. Oggigiorno questo fenomeno è sempre più presente nelle nostre città e causa non pochi problemi. I danni in ambiente urbano sono numerosi: disturbi nel traffico, danni economici, ambientali, etc.

In figura 1 si possono osservare gli esiti di 2 importanti allagamenti urbani occorsi a Corigliano Calabro nel 2009 e a Catania nel 2012.

L'aumento di questi fenomeni negli ultimi anni è legata a 2 fattori principali:

- I *cambiamenti climatici* e relative frequenti alluvioni che determinano, ovviamente, un incremento dell'acqua in ingresso alla rete di deflusso
- La crescente *urbanizzazione* che si produce in un aumento della pavimentazione stradale che risulta molto più impermeabile del terreno rurale, impedendo così che l'acqua esondata dalla rete di deflusso filtri nel territorio.

Inoltre diversi studi hanno dimostrato che l'esondatazione della rete fognaria combinata (ovvero che serve per defluire sia le acque bianche che quelle nere), utilizzata nelle nostre città, risulta essere la principale causa di inquinamento dei fiumi. Storicamente l'attenzione è rivolta principalmente alle inondazioni causate dai corsi d'acqua attraversanti i centri urbani. Poco attenzione si pone, invece, ai fenomeni innescati da condizioni di sovraccarico della rete fognaria o da inefficienza delle caditoie e del sistema di drenaggio urbano (sewer flooding). Tali fenomeni sono ancor peggiori quando nella rete fognaria ci sono ostruzioni o lesioni nelle condotte e nei bacini di raccolta a causa di una non corretta manutenzione.

In accordo alle direttive europee a riguardo (European Water Framework Directive (WFD) and the EU Flood Directive (2007/60/EC)) [5] che si pongono l'obiettivo di mantenere buona, ecologica e in un buon stato chimico dell'acqua (CEC,2000), è necessario mettere in essere opportune misure per prevenire l'allagamento dovuto alla rete fognaria/di deflusso. Una misura che viene spesso adottata per ottemperare alle direttive europee è quella di accumulare temporaneamente l'acqua piovana in strutture realizzate ad hoc da dove l'acqua viene



Figura 1: Due severi allagamenti

poi reimpressa nella rete gradualmente quando l'evento meteorico è terminato. Questa soluzione è però veramente costosa, soprattutto se applicata in zone altamente popolate.

Altre misure possono essere adottate per utilizzare la rete idraulica esistente in una maniera più sofisticata evitando di dover disporre di grandi investimenti monetari per l'estensione statica del sistema. Il concetto principale è quello di utilizzare il modo più ottimizzato la capacità di immagazzinamento presente nella preesistente rete fognaria, accumulando quei volumi d'acqua che altrimenti causerebbero l'esondazione. Questo approccio può consentire buoni risultati in modo molto più economico e fattibile. Il tutto poggia sull'assunto che le attuali reti fognarie siano state costruite con criteri di conservazione nel tempo e che quindi risultano avere delle condotte più grandi di quanto sarebbe necessario.

Per attuare una strategia del genere è sicuramente necessario monitorare in *real-time* la rete e poter operare dinamicamente su essa per mantenere determinate condizioni ottimali o preferibili anche durante gli eventi meteorici. Predisporre una rete di deflusso di dispositivi per regolare in *real-time* consente di sfruttare la capacità residua di una rete in modo ottimale senza la necessità di predisporre strutture ad hoc di accumulo.

Sebbene non vi sia una copiosa documentazione di controlli in *real-time* applicati a a questo scenario applicativo, questo approccio è stato comunque implementato in diverse grandi reti fognarie/di deflusso.

### **3 Controllo real-time distribuito per reti di deflusso urbane**

In questa sezione presenteremo in dettaglio un controllo in *real-time* distribuito basato su swarm intelligence e paratoie intelligenti per regolare dinamicamente i parametri della rete idraulica in modo da evitare/attenuare il fenomeno delle inondazioni causate dal riempimento della rete di drenaggio a causa di eventi meteorici [7]. Nella sezione 4 vengono mostrati i vantaggi dell'approccio proposto usando, come testbed, la rete di drenaggio della città di Cosenza.

Nelle successive sottosezioni verranno introdotte le paratoie intelligenti, successivamente si descriverà l'approccio in modo esaustivo, quindi verranno forniti dettagli riguardanti l'implementazione.

#### **3.1 Smart paratoie**

Le *Smart Gates* (paratoie intelligenti) sono distribuite in tutta la rete di deflusso così come specificato in sezione 3.2. Esse sono costituite da un *piatto*

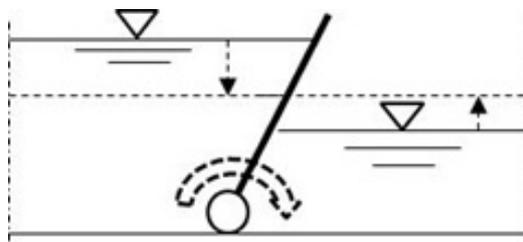


Figura 2: Paratoia regolabile elettronicamente

*mobile* che ruota intorno ad un perno orizzontale come si può osservare in Figura 2. La paratoia risulta completamente chiusa quando il piatto mobile viene ruotato in una posizione perpendicolare alla direzione flusso dell'acqua. Viceversa, la paratoia è completamente aperta quando il piatto mobile è esattamente parallelo al flusso. La paratoia è tipicamente impernata in basso piuttosto che in alto per evitare flussi d'acqua troppo alti che possono ripercuotersi sullo smaltimento dei sedimenti (che con flusso troppo elevato tenderebbero a rimanere in basso).

Il grado di apertura del piatto è quindi proporzionale al flusso d'acqua onde per cui, considerando che il piatto viene mosso in modo elettromeccanico, siamo in grado di modificare dinamicamente il flusso d'acqua nei punti della rete dove sono state inserite le paratoie.

### 3.2 Formalizzazione e ottimizzazione di reti di deflusso urbane

Per poter approcciare il problema con un qualsivoglia automatismo è necessario prima avere una definizione formale/matematica rigorosa di una rete. In prima istanza, una rete di drenaggio urbano può essere vista come un grafo  $(V, E)$  con nodi  $v \in V$  connessi tramite archi  $e \in E$ . I nodi  $V$  possono essere dei seguenti tipi: *Giunzioni*  $j \in J$ , *Nodi d'ingresso*  $l \in L$  e *Nodi d'uscita*  $o \in O$ .  $E$  è l'insieme delle *Condotte*  $c \in C$ . Le giunzioni sono punti di intersezioni tra condotte. I nodi d'ingresso sono quei nodi dove l'acqua entra nel sistema. I nodi d'uscita, invece, sono quei punti della rete dove l'acqua esce dal sistema per finire in fiumi, laghi, serbatoi, etc. Infine, le condotte sono tubi di differenti forme e dimensione dove l'acqua scorre.

In realtà, ci sono delle altre caratteristiche peculiari delle reti di drenaggio che possono essere utilizzate per rifinire il modello in modo che sia più utile agli scopi preposti.

Innanzitutto, nello scenario tipo di una rete cittadina, l'intera rete di drenaggio può essere suddivisa in diverse reti non connesse tra loro in cui ogni rete possiede un solo nodo d'uscita. Inoltre, ognuna di queste reti può essere facil-

mente modellata tramite una tipica struttura ad *albero*. Infatti ognuna di esse è composta da un *canale principale*, che termina con il nodo d'uscita, dove diverse sotto-reti definite nello stesso modo (ricorsivamente) scaricano. Infine, le "foglie" dell'albero sono i nodi d'ingresso del sistema. Una rete di questo tipo, molto semplice, è riportata come esempio in Figura 3(a).

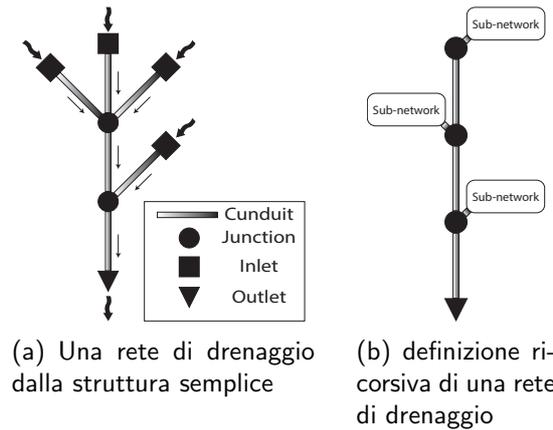


Figura 3: esempi di reti in base alla definizione

Sulla base delle considerazioni appena effettuate possiamo ridefinire la rete di drenaggio come segue. Innanzitutto, definiamo *Most Simple Drainage Network* ( $MSDN = (c, l)$ ) una rete composta solamente da una condotta  $c$  che termina con un nodo d'ingresso  $l$ . Quindi, definiamo come rete di drenaggio  $DN$  un oggetto che può essere o una  $MSDN$  oppure una coppia  $(M, S)$  dove  $M$  rappresente il canale principale e  $S$  un insieme di  $DN$ . Un canale principale  $M$  è un insieme ordinato di condotte dove ogni condotta è collegata alla successiva tramite un nodo giunzione. L'ultima condotta, opzionalmente, termina con un il nodo d'uscita. La Figura 3(b) sottolinea in modo grafico questa definizione ricorsiva. Le Figure 4(a) e 4(b) mostrano rispettivamente: un esempio realistico di rete di deflusso e le sottoreti, racchiuse da una linea tratteggiata, come risultano seguendo la definizione. Definiamo, inoltre, *Grado* di una  $DN$  come un numero naturale  $D$  che è 0 per una  $MSDN$ , mentre risulta  $1 + \max(Deg(s))$  per una  $DN = (M, S)$  dove  $s \in S$  and  $Deg(s)$  è il grado di  $s$ .

Questa definizione ricorsiva ci permette di adoperare una più semplice strategia di ottimizzazione, come nel caso di semplici reti come quella di Figura 3(a)), anche in scenari molto complessi. In pratica, si tratta di spezzettare l'intera rete in un insieme di reti più semplici.

Data una rete  $DN$ , definiamo  $nets(DN)$  come l'insieme di tutte le reti ricavate a partire da  $DN$  nel seguente modo:

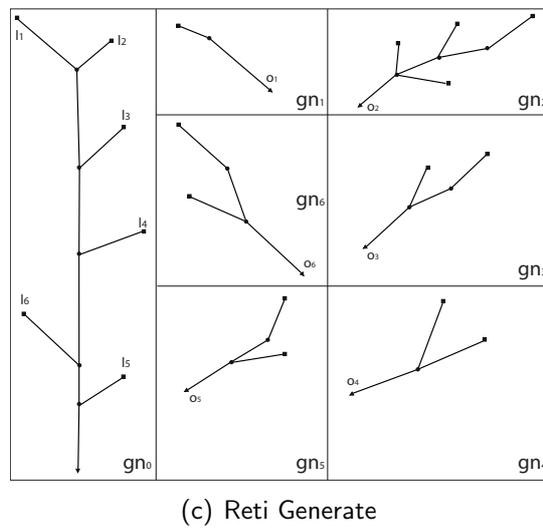
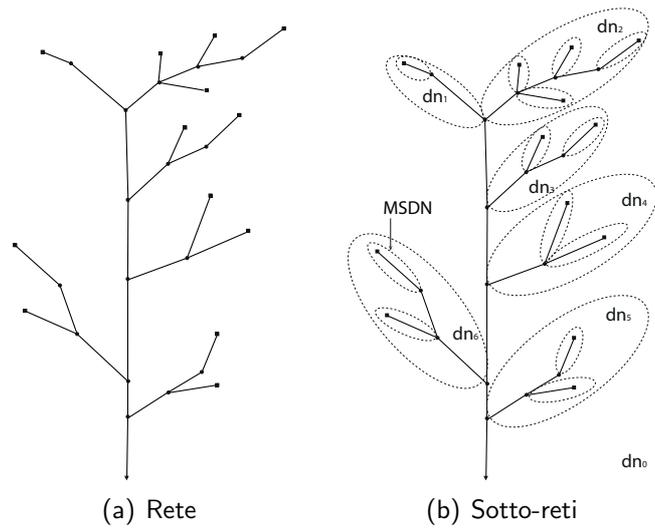


Figura 4: sotto reti in un caso realistico

$$nets(DN) = \begin{cases} \emptyset, & \text{se } DN \text{ è una } MSDN \\ \{DN\} \cup \bigcup_{s_i \in S} nets(s_i), & \text{if } DN = (M, S) \end{cases} \quad (1)$$

Quindi, partendo da una generica rete  $DN$ , con  $DN^* = nets(DN) = \{dn_i\}$  e  $dn_i = (M_i, S_i)$ , generiamo un nuovo insieme di reti (dette *generate*)  $GN = \{gn_i\}$ , con  $Degree(gn_i) = 1$  nelle quali ogni  $gn_i = (M'_i, S'_i)$ , è definita come segue:

$$M'_i = \begin{cases} M_i, & \text{se } i = 0 \\ M_i \cup o_i, & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2)$$

$$S'_i = \{msdn_k = (c_k, l_k) : \exists dn_k \in S_i\} \cup \{msdn_x : msdn_x \in S_i\}$$

L'idea intuitiva che sta dietro a questa formalizzazione è di rimpiazzare tutte le sotto-reti  $dn_k \in S_i$  con una MSDN  $msdn_k = (c_k, l_k)$  come  $S'_i$ .  $M'_i$  è uguale a  $M_i$  con l'aggiunta di un nodo d'uscita  $o_i$  tranne nei casi che  $i = 0$ , poichè la sottorete di livello 0 ha già il nodo d'uscita. Questa decomposizione ci permette di eseguire separatamente l'algoritmo d'ottimizzazione (descritto nel seguito) per tutte le sotto-reti generate contemporaneamente in modo da ottenere un ottimo globale per la rete originaria. Il flusso d'acqua dei nodi d'ingresso  $l_k$  sarà posto uguale al flusso in uscita del corrispondente nodo d'uscita  $o_{i=k}$ , ovvero, il nodo d'uscita della sottorete generata  $gn_k$ . le condotte  $c_k$  sono, invece, solo condotte "dummy" che collegano  $l_k$  al canale principale. Figura 4(c) mostra le sotto-reti generate a partire dalla rete di Figura 4(a).

Lo scopo è quello di bilanciare il livello d'acqua tra tutte le condotte della rete in modo da ridurre il più possibile il livello d'acqua nelle condotte più sovraccariche. A questo fine, la rete è instrumentata con: (i) *sensori*, (ii) *nodi computazionali*, (iii) *paratoie "intelligenti"*.

- I sensori misurano il livello d'acqua in ogni condotta;
- I nodi computazionali sono dei cosiddetti single-board computers come *Raspberry pi* [10] o *Beagleboard* che possono essere efficacemente montati all'interno della rete di deflusso poichè consumano poca energia e hanno piccole dimensioni;
- Le paratoie intelligenti sono come quelle descritte in 2.

I nodi computazionali collezionano i dati dai sensori ed elaborano collegialmente queste informazioni allo scopo di impostare le appropriate attuazioni sulle paratoie. Questa computazione di tipo collettivo è in grado di fornire le paratoie di un comportamento "intelligente".

Le paratoie intelligenti sono posizionate nei punti in cui le sottoreti si connettono al canale principale. La Figura 5(a) la logica con cui si scelgono le posizioni per l'inserimento delle paratoie, mentre Figura 5(b) mostra il posizionamento delle paratoie in una rete d'esempio realistica.

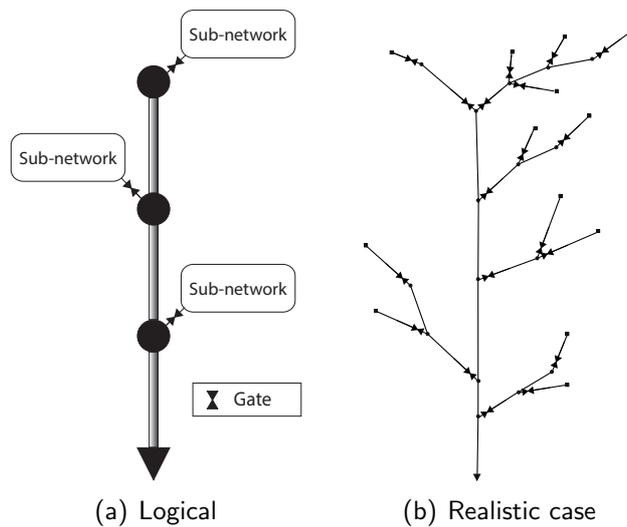


Figura 5: Posizioni delle paratoie

Ogni nodo computazionale ha solo una vista parziale della rete, infatti può leggere solo dai sensori che si trovano nelle sue vicinanze, ovvero, quelli che può fisicamente raggiungere. Nello stesso modo, può operare attuazioni solo sulle paratoie vicine e scambiare informazioni con i nodi computazionali anch'essi vicini. Sulla base di queste considerazioni appare opportuno approcciare il problema usando una architettura *basata ad agenti e distribuita* [8]. Difatti il paradigma ad agenti possiede alcune interessanti caratteristiche:

**Autonomia.** Ogni agente ha un suo proprio comportamento, esso percepisce l'ambiente circostante, interagisce con i suoi pari e pianifica autonomamente cosa fare.

**Località.** Nessun agente possiede la conoscenza globale dell'ambiente ma decide il suo comportamento solo sulla base di informazioni locali.

**Decentralizzazione.** Non esiste nessun agente con un ruolo predominante rispetto agli altri, infatti il sistema complessivo si determina sulla base delle interazioni dei vari agenti tra loro.

Sulla base di queste basilari caratteristiche, un sistema multi-agente è in grado di esibire comportamenti anche complessi (detti *emergenti*) attraverso

l'interazione tra agenti che invece singolarmente esibiscono comportamenti anche molto semplici. Esempi di comportamenti emergenti possono avere a che fare con le proprietà di adattività, tolleranza ai guasti, riconfigurazione automatica etc. In generale possiamo parlare di *swarm-intelligence* [1] quando un comportamento "intelligente" emerge dall'interazione tra semplici entità.

Nel nostro campo di applicazione, ovvero le reti di drenaggio urbano, la proprietà di fault tolerance è particolarmente utile poichè l'intero sistema deve poter continuare il suo corretto funzionamento anche in caso si verificano condizioni inaspettate come, ad esempio, ostruzioni e lesioni che possono impattare notevolmente sulla capacità idraulica complessiva.

Dal punto di vista hardware, i nodi computazionali sono distribuiti fisicamente lungo tutta la rete di drenaggio in modo che tutti i punti di interesse, ovvero i sensori e le paratoie, siano raggiungibili. Dal punto di vista dell'architettura software, l'approccio prevede che ci sia un agente per ogni paratia. Ciascuno di questi agenti eseguirà nel nodo computazionale che riesce a coprire l'area dove è locata la paratoia di riferimento. Ogni *agente-paratoia*, quindi, leggerà i valori di livello dell'acqua localmente e dialogherà con i suoi pari (gli altri agenti paratoia) in modo da elaborare come attuare efficacemente sulla sua paratoia. Oltre agli agenti-paratoia, è previsto un agente associato al nodo d'uscita che si comporta in modo del tutto uguale agli altri eccezion fatta, ovviamente, per quanto riguarda la parte attuativa. La Figura 6 mostra graficamente il ruolo degli agenti in ogni rete generata. Considerando la struttura appena descritta, l'algoritmo consiste nel bilanciare, per ogni rete generata, il livello d'acqua percepito dagli agenti.

Questo bilanciamento è ottenuto tramite gli agenti che eseguono ripetutamente 2 task:

**Task 1.** stimare la media del livello d'acqua nella rete

**Task 2.** regolare opportunamente la specifica paratoia in modo da portare il livello d'acqua il più vicino possibile a tale media

Dato che gli agenti non hanno una visione globale del livello d'acqua nei vari punti della rete, il task 1 è realizzato sfruttando un algoritmo *Gossip-based* [3] descritto in 3.2.1. Un algoritmo del genere è in grado di fornire anche la proprietà di fault tolerance di cui si parlava precedentemente. Per quanto riguarda il task2 c'è da considerare quanto segue: anche se conoscessimo il livello d'acqua ottimale da impostare non avremmo comunque modo di ricavare un livello d'apertura della paratoia in grado di garantire tale livello. Ciò è dovuto al fatto che il livello d'acqua in un punto dipende da caratteristiche globali della struttura di tutta la rete e dinamiche in base a come l'acqua scorre in tutta la rete in quel preciso istante. Per questi motivi possiamo affermare che un modello matematico

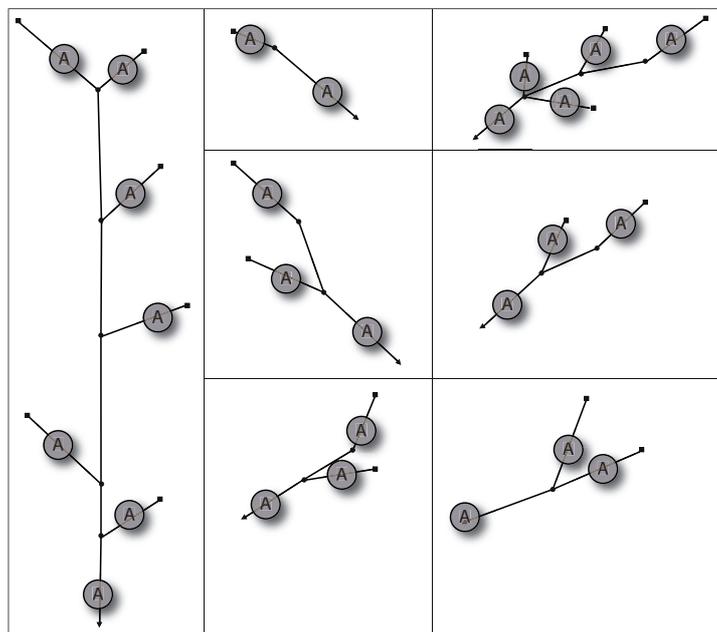


Figura 6: Gli Agenti nelle reti generate

“chiuso” da utilizzare per stabilire quanto aprire la paratoia per ottenere il livello desiderato è molto difficile se non impossibile da desumere. Per questi motivi, viene utilizzato un controllore *PID* [9] come spiegato in 3.2.2.

### 3.2.1 Algoritmo gossip-based

In un algoritmo Gossip-Based [3] si prevede che ci siano diversi nodi interconnessi da una rete. Ciascun nodo possiede alcuni valori numerici e può scambiare informazioni solo con un limitato insieme di altri nodi, ovvero i suoi vicini. L'obiettivo finale è quello di stimare valori aggregati globali, come la media, il massimo, la varianza, etc., nonostante siano possibili solo comunicazioni locali.

Nel nostro caso siamo interessati al valore aggregato media. L'algoritmo funziona nel seguente modo: ogni nodo mantiene il valore corrente (ovvero l'ultima misurazione nel nostro caso) e un valore locale di media impostata inizialmente al valore corrente. Queste medie locali sono scambiate continuamente tra i nodi che risultano vicini. Ogni volta che un nuovo valore di media viene ricevuto da qualche vicino, si provvede ad aggiornare la media locale (applicando l'operatore media). Si può dimostrare [3] che dopo un certo numero di passi le medie locali tendono a convergere alle medie globali.

Quando l'algoritmo arriva alla convergenza, il valore medio così stimato è usato da ogni agente paratoia per regolare la sua paratoia in modo da portare il

livello dell'acqua più vicino possibile a tale valore. Dopodiché, l'algoritmo viene eseguito da capo prendendo le nuove misurazioni e arrivando ad una nuova convergenza, e così via. Questo modo di procedere assicura le proprietà di adattività e di fault tolerance in quanto anche se la struttura della rete viene drasticamente modificata (ad esempio a causa di un evento imprevisto) l'algoritmo convergerà al nuovo valore di media.

### 3.2.2 Regolare la paratoia tramite PID

Una volta che conosciamo il valor medio globale tramite l'algoritmo gossip-based, rimane la problematica di regolare opportunamente la paratia in modo da portare il livello dell'acqua a questo valore "desiderato"

Nel nostro approccio si usano i controllori PID (Proporzionale, Integrativo, Derivativo) [9]. Tali controllori sono molto utilizzati nell'industria e nella ricerca proprio in quei casi in cui si vuole portare l'uscita di un sistema (del quale, magari, non si conosce un modello matematico esaustivo) ad un valore richiesto.

Un PID è costituito da un loop di controllo (si veda la Figura 7) dove si minimizza un certo valore d'errore costituito dalla differenza tra l'output del processo controllato e un valore desiderato (detto setpoint).

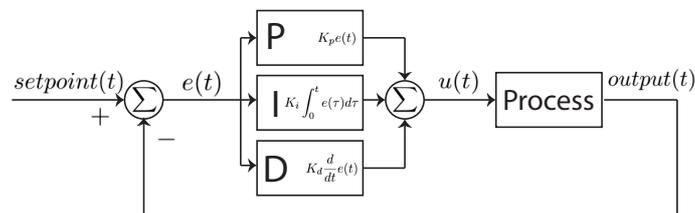


Figura 7: controllore PID.

Il setting che il controllore esercita sul processo controllato dipende da tre effetti combinati: il proporzionale, l'integrativo e il derivativo. Il proporzionale dipende dal valore corrente di errore, il derivativo misura l'errore che prevedibilmente si avrà al prossimo step, mentre l'integrativo è legato alla storia pregressa del segnale d'errore. L'equazione seguente definisce un generico controllore PID a tempo continuo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

dove  $e(t) = \text{setpoint}(t) - \text{output}(t)$ ;  $u(t)$  è l'output del controllore al tempo  $t$ , ovvero, il segnale d'attuazione;  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  sono tre costanti.

Nel nostro caso, ogni paratia della rete di drenaggio è controllata da un PID.  $u$  sarà il grado d'apertura della paratia, mentre  $\text{output}$  è il livello d'acqua corrente e  $\text{setpoint}$  è il valore "desiderato" calcolato con l'algoritmo gossip-based.



Il modello per il calcolo dei flussi d'acqua è quello dinamico e non stazionario che permette, a differenza di modelli più semplici, di modellare efficacemente anche fenomeni quali il backwater effects, il flow reversals, il flusso pressurizzato e l'entrata/uscita di perdite d'energia. Tale modello è espresso dalle equazioni di Saint Venant (3) per il calcolo del flusso in ogni condotta.

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAh_L = 0 \end{cases} \quad (3)$$

dove  $x$  è la distanza lungo la condotta,  $t$  è il tempo,  $A$  è l'area della sezione trasversale,  $Q$  è il rate di flusso,  $H$  è la portata idraulica dell'acqua nella condotta (legata all'altezza e alla pressione),  $S_f$  è l'attrito in pendenza (ovvero la perdita di portata per unità di lunghezza),  $h_L$  è la perdita locale di energia per unità di lunghezza della condotta e  $g$  è l'accelerazione di gravità.

### 3.3.2 Customizzazione SWMM

Sebbene SWMM permetta di definire alcune semplici regole per controllare in real-time la rete idraulica simulata, non è comunque possibile implementare controlli complessi e basati su una logica complessiva come quello presentato in 3.2. Per questo motivo è stato necessario customizzare il software SWMM per rendere possibile la comunicazione real time tra quest'ultimo e un software *esterno* (ovvero eseguito in un differente processo) che realizza il controllo distribuito.

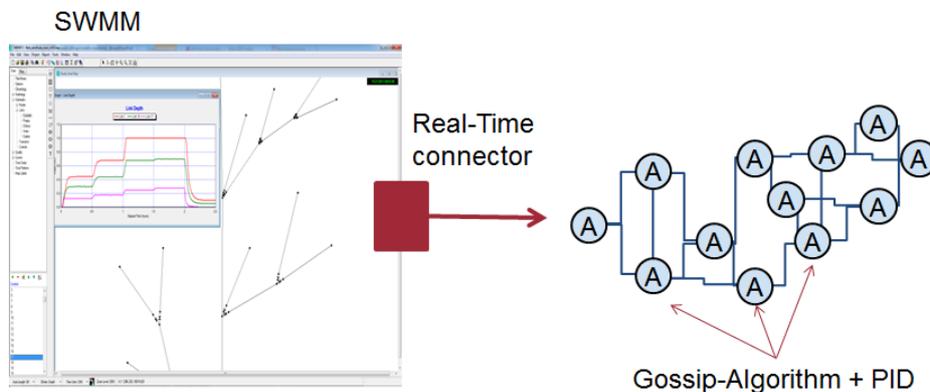


Figura 9: Customizzazione SWMM.

In pratica, il software è stato esteso aggiungendo un modulo che usa una connessione tcp/ip per inviare e ricevere informazioni tra SWMM e la parte di controllo durante l'avanzamento della simulazione.

Questo modulo permette anche di scegliere dove posizionare i sensori all'interno della rete, Ovvero permette la scelta delle grandezze fisiche da misurare in

real-time che sono d'interesse per la parte di controllo. Ad ogni intervallo di tempo predefinito tutti i valori d'interessi sono raccolti e inviati alla parte di controllo che, a sua volta, risponde con le attuazioni da effettuare nella rete (ovvero i gradi d'apertura da impostare sulle paratie per il successivo intervallo temporale). La parte di controllo altro non è che l'algoritmo multi-agente presentato in 3.2.

## 4 Evidenze sperimentali

In questa sezione saranno mostrate le evidenze sperimentali a prova della bontà dell'approccio proposto. Dapprima, verrà delineato lo scenario scelto per i test unitamente con le metriche utilizzate per misurare i vantaggi ottenuti, successivamente, si discuteranno i risultati ottenuti.

### 4.1 Scenario

Come caso di studio è stata scelta una rete di drenaggio urbano reale, ovvero quella della città di Cosenza (Figura 10(a))

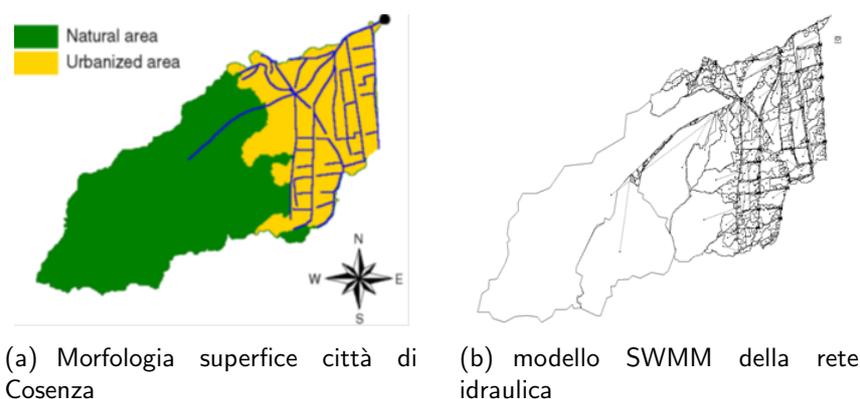


Figura 10: Caso di studio: Rete di drenaggio città di Cosenza

Cosenza è una città densamente popolata (circa 50000 residenti). La superficie del suo bacino idrogeologico è di 414 ettari, di cui 202 sono di terreno *permeabile*, ovvero coperta da vegetazione, mentre il resto consiste in superficie pavimentata. Sul territorio sono presenti sia edifici residenziali che, in misura minore, strutture a fini commerciali.

L'acqua fognaria e quella meteorica, se non eccede la capacità di trattamento, viene direttamente inviata all'impianto regionale per lo smaltimento delle acque (WasteWater Treatment Plant(WWTP)) attraverso la rete di drenaggio urbano. L'acqua in eccesso viene invece scaricata senza alcun trattamento nel fiume Crati.

Il flusso tipico dell'acqua nella rete è di circa  $0.23m^3/s$ , l'overflow dell'acqua occorre quando il flusso è circa 3 volte di più rispetto al livello gestibile tramite WWTP, in questo caso  $0.7m^3/s$ .

In Figura 10(b) è mostrata la rete di drenaggio relativa a Cosenza modellata tramite il software SWMM. E' composta da 324 condotte. Le condotte sono tubi di cui alcuni di forma circolare o ovale con diametro che varia tra  $0.3m$  e  $1.5m$  e altri policentrici con profondità massima di  $3.20m$ . La pendenza dei tubi varia tra  $0.5\%$  e  $0.6\%$ . I punti di connessione tra la rete di drenaggio e la superficie stradale sono modellati in SWMM come bacini di raccolta che collezionano e rilasciano l'acqua di superficie nella rete fognaria. Questi nodi sono in tutto 326.

Gli esperimenti sono stati realizzati nei seguenti scenari:

Scenario 0 . Sistema senza rtc distribuito. Ovvero lo scenario attuale della rete

Scenario 1 . Sistema con rtc distribuito

Dal punto di vista dell'input alla simulazione della rete di drenaggio si sono usati cinque casi di eventi meteorici estremi occorsi durante il 2011, specificatamente: il primo marzo, l'8 ottobre, il 16 giugno, il 5 dicembre e il 22 gennaio. Le caratteristiche idrologiche di tali eventi sono stati presi da [www.cfd.calabria.it](http://www.cfd.calabria.it) e sono documentati in seguente tabella :

| Data Evento | Profondità (mm) | allagamento in superficie (mm) | $I_{max}$ (mm/h) |
|-------------|-----------------|--------------------------------|------------------|
| 1 Marzo     | 97.40           | 62.63                          | 17.2             |
| 8 Ottobre   | 48.6            | 23.65                          | 14.4             |
| 16 Giugno   | 20.4            | 9.38                           | 20.2             |
| 5 Dicembre  | 54              | 27.89                          | 10.2             |
| 22 Gennaio  | 31              | 13.14                          | 5.2              |

Per stimare la bontà dell'approccio sono state usati i seguenti indici:

#### 4.1.1 Maximum Capacity Reduction, CR<sub>max</sub>

Questo indice corrisponde alla riduzione relativa della massima capacità raggiunta, nel corso dell'evento meteorico, nello scenario con RTC distribuito (scenario 1)  $C_{max,1}$  rispetto allo scenario senza  $C_{max,0}$  (scenario 0) per una data condotta:

$$CR_{max} = \frac{C_{max,0} - C_{max,1}}{C_{max,0}} \quad (4)$$

dove  $C$  è la capacità idraulica e rappresenta il grado di riempimento delle condotte nel tempo. Se la condotta è completamente piena (in pressione)  $C$  è uguale ad 1, mentre se la condotta è vuota  $C$  è uguale a 0:

### 4.1.2 Capacity Reduction 80%, CR80

Rappresenta la misura dell'overloading di una condotta rispetto ad una capacità limite di 0.8.

$$CR_{80} = \frac{C_{80,0} - C_{80,1}}{C_{80,0}} \quad (5)$$

con

$$CR_{80} = \int_0^t \check{C}_0(t) dx \quad \text{con} \quad \check{C}_0(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } C_0(t) \leq 0.8 \\ C_0(t) - 0.8, & \text{se } C_0(t) > 0.8 \end{cases} \quad (6)$$

dove  $C_1(t)$  è la capacità nello scenario 1 e  $C_0(t)$  la capacità nello scenario 0.

### 4.1.3 Delay in peak maximum capacity, DTp

E' pari alla differenza tra il tempo necessario per raggiungere la massima capacità  $t_{p,1}$  nello scenario 1 e il tempo per raggiungere la massima capacità  $t_{p,0}$  nello scenario 0:

$$DT_p = t_{p,1} - t_{p,0} \quad (7)$$

## 4.2 Risultati

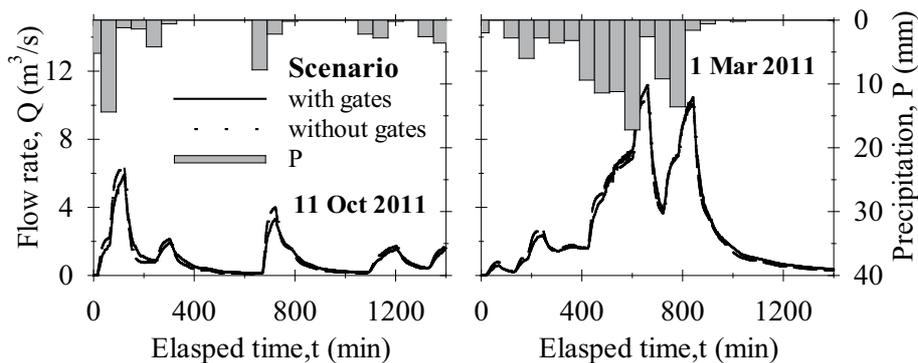


Figura 11: Precipitazioni ed idrografi per lo scenario 0 e lo scenario 1 riferiti agli eventi del 11 ottobre e l'11 marzo 2011. Valori riferiti alla sezione d'uscita della rete

La distribuzione del flusso d'acqua nello scenario 0 e 1 sperimentata all'uscita della rete di drenaggio della città di Cosenza usando il modello SWMM è mostrato in figura 11. In questa figura è possibile notare che il nostro approccio riesce a rallentare il raggiungimento del picco del flusso. Ciononostante, non si sperimenta una riduzione significativa del massimo del flusso che è pari a circa  $6m^3/s$  per l'evento del 1 ottobre e di circa  $11m^3/s$  per quello dell'11 marzo. La riduzione del flusso massimo è di circa l'8% per tutti gli eventi

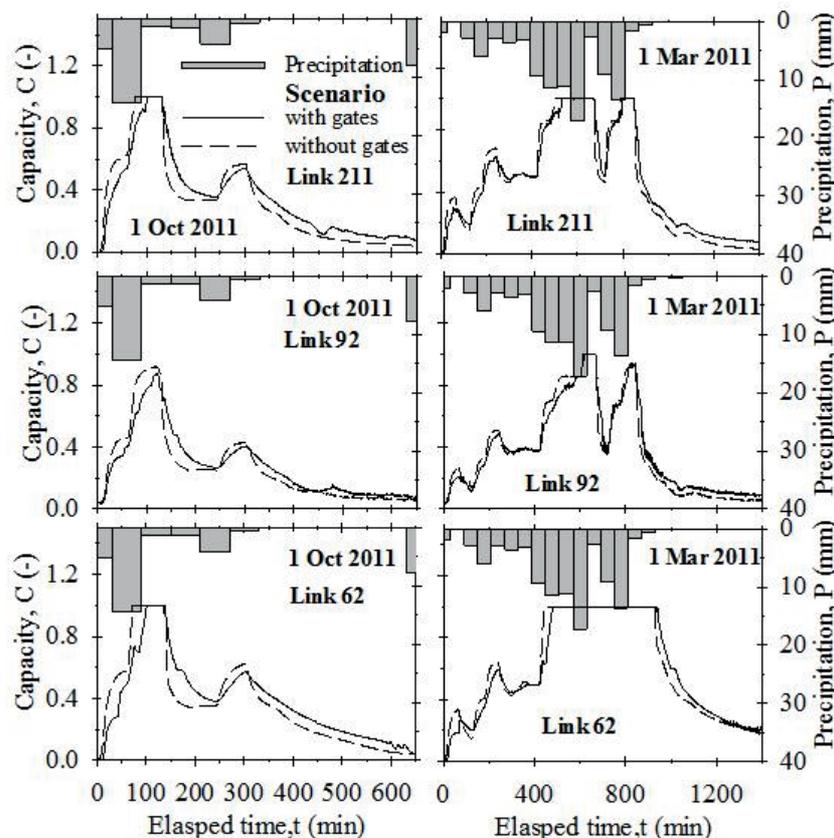


Figura 12: Distribuzione temporale del livello di riempimento per le condotte 4 (a, b), 5 (c,d) e 7 (e,f) e per le parti più critiche degli eventi dell'8 ottobre 2011 (a,c,e) e del 11 Marzo 2011 (b,d,f)

In figura 12 è mostrata la distribuzione temporale delle capacità d'acqua in tre condotte critiche per entrambi gli scenari. La figura si riferisce alla parte più critica degli eventi meteorici rispettivamente del 1 ottobre e dell'11 marzo. I risultati mostrano chiaramente un ritardo significativo nel raggiungimento del picco di flusso nello scenario 1. l'RTC distribuito è in grado di ritardare l'arrivo del picco di flusso di circa 30 minuti per tutti gli eventi meteorici presi in esame.

Il ritardo nel raggiungere il picco rappresenta un importante indicatore che può aiutare a gestire meglio i rischi e prendere decisioni per fronteggiare le emergenze. La figura 12 mostra inoltre che, nello scenario 1, le acque reflue sono parzialmente *trattenute* dalla rete durante gli eventi meteorici e rilasciate più gradualmente rispetto a ciò che accade nello scenario 0. La riduzione del picco massimo, durante gli eventi selezionati, è limitata per quelle condotte che hanno un grado di riempimento molto alto mentre risulta maggiore per le altre condotte.

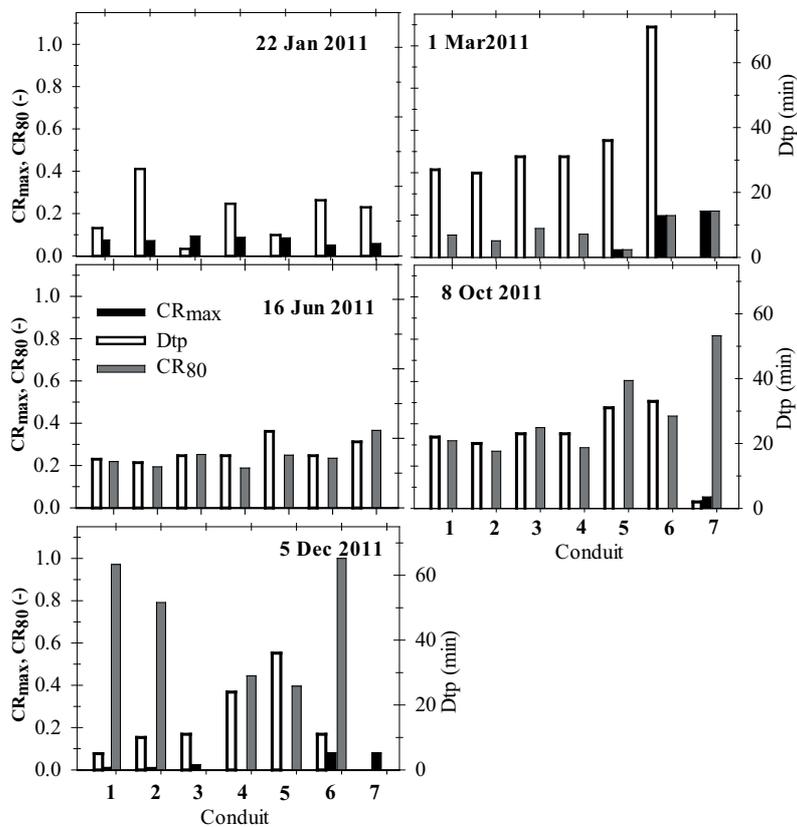


Figura 13: Riduzione del  $CR_{max}$  e ae del  $CR_{80}$

La figura 13 mostra, invece, i benefici dell'approccio in termini di riduzione del  $CR_{max}$  e ae del  $CR_{80}$  durante gli eventi meteorici esaminati.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G., Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, New York, NY: Oxford University Press, Santa Fe

Institute Studies in the Sciences of Complexity, Paper: ISBN 0-19-513159-2, 1999.

- [2] Campisano A., Cabot Ple J., Muschalla D., Pleau M., Vanrolleghem P. A., Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems, *Urban Water Journal*, 10, 5, 300-311, 2013.
- [3] Jelasity M., Montresor A., Babaoglu O., Gossip-based aggregation in large dynamic networks, *ACM Transactions on Computer Systems* 23, 3, 219 - 252, 2005.
- [4] Piro, P., Carbone, M., Garofalo, G., Distributed vs. concentrated storage options for controlling CSO volumes and pollutant loads, *Water Practice & Technology*, 5, 3, 2010.
- [5] Rossman L. A., Storm water management model user's manual, version 5.0. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.
- [6] Giordano A., Spezzano G., Vinci A., Rainbow: An Intelligent Platform for Large-Scale Networked Cyber-Physical Systems, *Proceedings of 5th International Workshop on Networks of Cooperating Objects for Smart Cities (UBICITEC)* 70-85, Berlin 2014.
- [7] Giordano A., Spezzano G., Vinci A., Garofalo G., Piro P: A Cyber-Physical System for Distributed Real-Time Control of Urban Drainage Networks in Smart Cities, *Internet and Distributed Computing Systems (IDCS)* 87-98, Calabria 2014
- [8] Wooldridge M., *An introduction to multi-agent systems*, John Wiley & Sons, Ltd., 2002.
- [9] Åström K.J., Häggglund T., *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 1995
- [10] RaspBerry online, <http://www.raspberrypi.org/>.