

Modeling Water Distribution Systems:

A technical report

Massimo Micieli, Luigi Rizzo

RT- ICAR-CS-25-11

Luglio 2025



Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni (ICAR)
– Sede di Cosenza, Via P. Bucci 8-9C, 87036 Rende, Italy, URL: www.icar.cnr.it
– Sezione di Napoli, Via P. Castellino 111, 80131 Napoli, URL: www.icar.cnr.it
– Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa, 153, 90146 Palermo, URL: www.icar.cnr.it

Sommario

Premessa.....	3
1. Introduzione.....	4
2. Background e stato dell'arte	5
3. SEM: un SE Metamodel Framework	6
3.1. Prospettiva dei dati del SEM.....	7
4. Applicazione del SEM ai WDS	8
4.1. Il Sistema di Distribuzione Idrica (WDS) considerato.....	8
4.2. Il modello SEM per il WDS considerato	9
4.3. Discussione critica e lezioni apprese	11
Conclusioni	12
Bibliografia	13

Premessa

I Sistemi di Distribuzione Idrica (Water Distribution Systems – WDS) rappresentano infrastrutture critiche di primaria importanza per la società moderna, in quanto garantiscono la disponibilità continua e sicura di acqua potabile alle comunità urbane e ai poli industriali. Negli ultimi decenni tali sistemi hanno subito una profonda trasformazione, evolvendosi da reti idrauliche tradizionali a sistemi cyber-fisici complessi e altamente integrati. Questa evoluzione è stata resa possibile dall'introduzione di tecnologie avanzate di sensoristica, controllo automatizzato, comunicazione in tempo reale e analisi predittiva dei dati, che mirano a migliorare l'efficienza operativa, la resilienza agli eventi avversi e la sostenibilità ambientale. La gestione di un WDS, tuttavia, si caratterizza per un'elevata complessità intrinseca, dovuta all'interazione tra molteplici fattori: aspetti idraulici legati al flusso e alla pressione dell'acqua, variabili ambientali quali cambiamenti climatici e disponibilità delle risorse, e dimensioni operative come la manutenzione, la sicurezza e la risposta alle emergenze. Tali complessità rendono imprescindibile l'adozione di approcci di modellazione avanzati e robusti, capaci non solo di supportare la progettazione iniziale, ma anche di ottimizzare il funzionamento quotidiano e di prevedere scenari di vulnerabilità.

Nonostante la consapevolezza diffusa sull'importanza di metodologie sistematiche, gli strumenti attualmente disponibili presentano spesso una frammentarietà concettuale e non offrono un quadro strutturato a un adeguato livello di astrazione. In questo contesto si inserisce la proposta di adottare un approccio di metamodellazione ai WDS, basato sul framework Smart Environment Metamodel (SEM). Il SEM fornisce un metodo rigoroso per rappresentare sistemi complessi mediante livelli di astrazione gerarchici e componenti riutilizzabili, consentendo così una modellazione più coerente, flessibile e adattabile alle esigenze specifiche del dominio idrico. L'applicazione del SEM ai WDS assume particolare rilevanza in quanto permette di integrare fin dalle fasi iniziali meccanismi di sicurezza, resilienza e adattività, favorendo l'identificazione preventiva delle vulnerabilità e la definizione di strategie di mitigazione. Questo studio intende quindi esplorare le potenzialità del SEM nel dominio dei sistemi idrici, evidenziandone i vantaggi rispetto agli approcci tradizionali, e discutendo possibili miglioramenti del framework per affrontare sfide emergenti quali la digitalizzazione crescente, la variabilità climatica e l'incremento della domanda idrica. Tali prospettive aprono la strada verso infrastrutture idriche di nuova generazione, più intelligenti, resilienti e in grado di adattarsi dinamicamente ai cambiamenti del contesto.

Questo studio è stato reso possibile grazie alle attività realizzate nell'ambito dei progetti:

- “SoBigData.it – Strengthening the Italian RI for Social Mining and Big Data Analytics”, finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU – National Recovery and Resilience Plan (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, PNRR) – Prot. IR0000013 – Avviso n. 3264 del 28/12/2021;
- “COCOWEARS - A framework for Continuum COmputing WEARable Systems”, finanziato dall'Unione Europea – Next Generation EU, Missione 4 Componente 1 – the Italian Ministry of University and Research, PRIN 2022, grant n. 2022T2XNJE, CUP B53D23013190006;
- “AQUA-PREDICT” (an AI-based methodological approach in the Edge-Cloud continuum for Urban Water distribution Predictive maintenance); The National Research Council of Italy (CNR), “Le Scienze per le TRansizioni Industriale, Verde ed Energetica”: Towards Sustainable Cognitive Build-ings (ToSCoB) project, CUP B53C22010110001.

1. Introduzione

L'acqua costituisce una delle risorse più essenziali per la vita umana e per lo sviluppo economico globale. I Sistemi di Distribuzione Idrica (Water Distribution Systems – WDS) [1]–[3] rappresentano infrastrutture critiche, poiché assicurano la fornitura di acqua pulita e sicura a una vasta gamma di utenti, comprendenti contesti urbani, industriali e agricoli. Una progettazione e una gestione adeguate di tali sistemi sono indispensabili per garantire sostenibilità, efficienza e resilienza, soprattutto in relazione a sfide sempre più pressanti come l'incremento demografico, i cambiamenti climatici e il progressivo degrado delle infrastrutture esistenti [4].

L'evoluzione tecnologica degli ultimi anni ha trasformato i WDS in sistemi intelligenti: grazie all'integrazione di sensori IoT, algoritmi di intelligenza artificiale (AI) e infrastrutture di calcolo Edge/Cloud, questi sistemi hanno acquisito capacità avanzate di monitoraggio in tempo reale, manutenzione predittiva e ottimizzazione operativa [5], [6]. Tale trasformazione colloca i WDS all'interno della categoria dei Sistemi Ciber-Fisici (CPS) e degli Smart Environments (SE), contesti in cui la complessità crescente rende indispensabile lo sviluppo di metodologie innovative di modellazione e gestione [7].

Nonostante la diffusione di tecnologie smart, la progettazione e la modellazione dei WDS continuano a basarsi in gran parte su approcci ingegneristici tradizionali, che raramente includono framework di metamodellazione capaci di fornire una metodologia strutturata, adattabile e riusabile. La metamodellazione riveste un ruolo cruciale nello sviluppo di CPS e SE complessi, poiché fornisce un meccanismo sistematico per definire astrazioni, relazioni e componenti funzionali che caratterizzano un dominio specifico [8]–[11]. Un metamodello consente infatti di rappresentare il sistema a un alto livello di astrazione, facilitando le attività di analisi, progettazione e implementazione di infrastrutture intelligenti.

In diversi domini degli Smart Environments, i metamodelli hanno già trovato applicazioni di successo: un esempio significativo riguarda il settore degli edifici intelligenti, dove essi sono stati utilizzati per strutturare la progettazione e il coordinamento di sistemi eterogenei [9]. Tuttavia, l'applicazione di tali metodologie ai WDS rimane ancora un campo poco esplorato.

Per affrontare questa lacuna, il presente rapporto tecnico propone l'adozione dello Smart Environment Metamodel (SEM) [9], [10] per la modellazione di infrastrutture critiche come i WDS. Il SEM, originariamente sviluppato per il dominio degli SE, permette di rappresentare sia la prospettiva funzionale sia quella informativa di un sistema, fornendo un approccio metodologico strutturato per definire servizi, flussi di dati e interazioni tra componenti. In questo modo, facilita lo sviluppo di WDS intelligenti basati su architetture IoT.

L'impiego del SEM risulta particolarmente rilevante nei sistemi critici, poiché consente ai progettisti di integrare fin dalle fasi iniziali meccanismi di protezione e resilienza, garantendo che le vulnerabilità vengano identificate e affrontate durante l'intero ciclo di vita del sistema. Lo scopo di questo rapporto tecnico è quindi esplorare i punti di forza e i limiti derivanti dall'applicazione del SEM ai WDS. Un tale approccio, oltre a migliorare la modellazione e la gestione delle infrastrutture idriche, contribuisce al continuo perfezionamento e alla validazione del framework stesso. Questo processo di miglioramento progressivo rafforza l'applicabilità del SEM in più domini, tra cui i Cognitive Buildings, nei quali ha già dimostrato la propria efficacia [9], [10].

2. Background e stato dell'arte

La letteratura scientifica recente mostra come i progressi nel campo dell'Intelligenza Artificiale e le innovazioni introdotte dal paradigma di calcolo distribuito Edge/Cloud possano abilitare una nuova generazione di Sistemi di Distribuzione Idrica (WDS). In [12], ad esempio, vengono analizzati e confrontati diversi modelli di machine learning, tra cui random forest e reti neurali artificiali, applicati alla previsione dei guasti principali nelle condotte idriche della città di Kitchener, evidenziando l'efficacia dell'IA nella manutenzione predittiva. Un ulteriore contributo significativo è presentato in [13], dove gli autori propongono un approccio orientato all'ottimizzazione dei consumi e alla prevenzione degli sprechi, dimostrando come l'IA possa essere impiegata non solo nella manutenzione, ma anche nella gestione sostenibile delle risorse.

In [14] viene esplorata l'applicazione del deep reinforcement learning per la gestione dinamica delle valvole e degli idranti antincendio durante situazioni di inquinamento o rotture delle condotte, con l'obiettivo di isolare rapidamente le contaminazioni e ridurre i rischi per la salute pubblica. Allo stesso modo, in [15] è presentato un approccio innovativo per il rilevamento delle perdite idriche mediante deep autoencoder applicati a spettrogrammi idroacustici. Sebbene validato in un contesto sperimentale di laboratorio, questo metodo mostra potenzialità concrete per applicazioni in WDS equipaggiati con sensori idroacustici, consentendo un monitoraggio in tempo reale e più accurato.

L'articolo [5] offre una panoramica estesa delle tecnologie ICT per la gestione delle risorse idriche, includendo sensori, attuatori, reti di comunicazione e strumenti di calcolo avanzati, sottolineando le opportunità che queste soluzioni aprono per lo sviluppo di WDS intelligenti. Una rassegna ancora più focalizzata sugli sviluppi più recenti è proposta in [16], dove vengono analizzati studi che integrano tecnologie IoT e AI all'interno dei sistemi idrici. La revisione mette in luce come l'uso combinato di IoT e AI migliori sensibilmente le capacità di monitoraggio, controllo e ottimizzazione, identificando il continuum Edge/Cloud come tecnologia abilitante cruciale.

Nonostante questi progressi, viene anche sottolineato come la complessità intrinseca delle reti idriche renda difficile la loro integrazione con IoT e AI. In particolare, sebbene in [16] venga presentata un'architettura di riferimento IoT per WDS intelligenti, non vengono proposti strumenti in grado di catturare e gestire in modo sistematico l'elevata complessità del dominio, né metodologie strutturate per supportare progettazione e analisi efficaci. Tale lacuna rafforza la motivazione alla base del presente rapporto tecnico, che mira a proporre l'impiego di un framework di metamodellazione per affrontare in maniera più rigorosa la progettazione e la gestione dei WDS.

Su queste basi si passa ora a descrivere il SEM, presentandone la struttura e le potenzialità per il dominio idrico.

Un elemento emergente della ricerca riguarda la necessità di unire modellazione funzionale e architetturale con metodologie di manutenzione predittiva basata su AI. In particolare, l'integrazione tra metamodellazione (SEM), modellazione del deployment in continuum Edge/Cloud e tecniche di machine learning per il rilevamento delle anomalie rappresenta una frontiera cruciale per i WDS intelligenti.

In questo scenario, l'adozione di un framework di metamodellazione come il SEM si configura come una soluzione promettente, poiché consente di coniugare la complessità funzionale e informativa dei WDS con un approccio metodologico rigoroso, strutturato e riutilizzabile.

3. SEM: un SE Metamodel Framework

Questa sezione introduce il framework Smart Environment Metamodel (SEM), sviluppato per supportare la progettazione, l'analisi e, quando necessario, la retro-ingegnerizzazione degli Smart Environments (SE). Il framework si articola in due dimensioni complementari: un metamodello funzionale e un metamodello dei dati, entrambi rappresentati mediante diagrammi UML, lo standard di riferimento per la modellazione in ingegneria informatica. In questa sede ci si concentra sulla prospettiva funzionale, mentre ulteriori dettagli sul metamodello dei dati sono disponibili in [9].

Il metamodello funzionale (Fig. 1) enfatizza i servizi che un SE deve garantire agli utenti finali. Le entità che lo compongono agiscono come blocchi costitutivi fondamentali, personalizzabili in base a vincoli e requisiti specifici del dominio. Due entità centrali ne definiscono la struttura: SmartEnvironment e SmartFunctionality. Lo SmartEnvironment, identificato da uno stereotipo, può essere concepito come una composizione gerarchica di ambienti annidati. Esso comprende: (a) il PhysicalEnvironment, che rappresenta l'aspetto fisico dell'ambiente; (b) entità di tipo CyberStatus, che descrivono lo stato dei componenti cibernetici; (c) un insieme di Property, che definiscono attributi e requisiti del sistema; (d) un Fingerprint, che ne sintetizza l'identità. L'aspetto cyber del PhysicalEnvironment è caratterizzato da un PhysicalStatus e da ulteriori Property, tra cui Location, che specifica il sito fisico.

Tutte le funzionalità di un SE sono rappresentate dallo stereotipo SmartFunctionality. Ogni ambiente offre almeno una funzionalità, che può essere condivisa da più ambienti, e che viene classificata come AtomicFunctionality o ComposedFunctionality. Le AtomicFunctionality comprendono: (a) Actuation and Sensing, che abilitano l'interazione con l'ambiente fisico tramite EmbeddedDevices, coordinati dal DeviceAbstractor; (b) Usage, che permette di sfruttare funzionalità esterne fornite da ServiceProviders terzi; (c) Communication, che gestisce lo scambio di dati con entità esterne. Le ComposedFunctionality, invece, derivano dalla combinazione di più SmartFunctionality e sono suddivise in sei categorie: (a) Monitoring and Control, per supervisionare e regolare il sistema; (b) Prediction, per anticipare eventi o anomalie; (c) Recognition, per identificare situazioni rilevanti; (d) KnowledgeDiscovery, per estrarre schemi e relazioni nascoste; (e) Execution, per supportare l'esecuzione di attività complesse.

In relazione ai WDS, il SEM permette di formalizzare in maniera sistematica sia la dimensione fisica della rete (ad esempio condotte, valvole e sensori) sia quella cibernetica (algoritmi di monitoraggio, AI per la manutenzione predittiva, moduli di comunicazione). Funzionalità atomiche come il sensing trovano un'immediata corrispondenza nei sensori IoT installati nelle reti idriche, mentre funzionalità composte come monitoring, prediction e knowledge discovery risultano essenziali per il rilevamento di guasti, la previsione di consumi o rotture, e l'identificazione di schemi nascosti nelle grandi moli di dati generate dal sistema. In questo modo, il SEM fornisce un linguaggio e una struttura unificati per descrivere i WDS come veri e propri ambienti intelligenti, colmando le lacune degli approcci tradizionali di modellazione e offrendo un supporto metodologico per la progettazione di infrastrutture idriche resilienti e adattive.

La prospettiva funzionale e dei dati offerta dal SEM si rivela particolarmente efficace quando viene arricchita con vincoli logici che collegano direttamente i valori sensoriali a stati operativi corretti o anomali del sistema. Ad esempio, la corrispondenza tra misurazioni di sensori contigui, la rilevazione di differenze attese dovute a cadute di pressione e le relazioni di uguaglianza tra letture di sensori di

temperatura sono formalizzabili direttamente nel metamodello, garantendo un controllo più rigoroso e strutturato delle dipendenze tra dati.

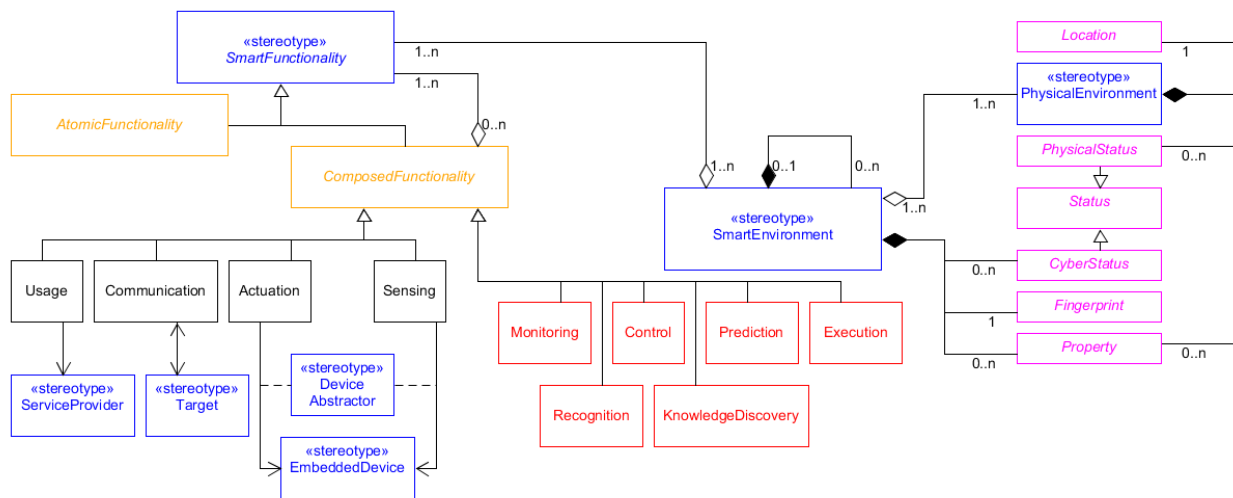


Figura 1 – Il SEM Metamodel.

3.1. Prospettiva dei dati del SEM

Accanto al metamodello funzionale, il SEM include una prospettiva dei dati che consente di rappresentare in maniera sistematica le informazioni prodotte e consumate dai diversi componenti di un sistema. Questa prospettiva ha l'obiettivo di catturare non solo i tipi di dato e le loro proprietà, ma anche le relazioni logiche e semantiche che li collegano, fornendo così un quadro coerente e validabile delle interazioni tra il mondo fisico e quello cibernetico.

Nel dominio dei WDS, la prospettiva dei dati assume un ruolo particolarmente rilevante. Attraverso di essa è possibile formalizzare vincoli operativi direttamente legati al funzionamento della rete, ad esempio:

- la corrispondenza tra valori registrati da sensori di temperatura collocati in prossimità;
- la differenza attesa tra misure di pressione a monte e a valle di un tratto di condotta, dovuta alle perdite di carico;
- la relazione tra sensori posti ai lati di una valvola, che devono registrare valori equivalenti quando la valvola è aperta e divergere in caso di chiusura.

Tali vincoli, espressi in forma concettuale all'interno del metamodello, rendono possibile il controllo della consistenza dei dati e l'individuazione di comportamenti anomali fin dalle fasi di progettazione. In questo modo, il SEM non si limita a descrivere le funzionalità di un sistema idrico intelligente, ma fornisce anche gli strumenti per garantire che il flusso informativo che lo attraversa sia coerente, verificabile e conforme ai requisiti di sicurezza e resilienza.

4. Applicazione del SEM ai WDS

Lo scenario di riferimento adottato in questo studio è stato costruito al fine di ottenere un quadro rappresentativo e realistico delle sfide che caratterizzano i moderni Sistemi di Distribuzione Idrica. Su questa base viene applicato il framework SEM, con l'obiettivo di dimostrare come esso possa supportare la modellazione di infrastrutture idriche complesse. Nelle sottosezioni seguenti vengono descritti in dettaglio il sistema oggetto di modellazione, il processo metodologico seguito e le principali lezioni apprese, evidenziando come l'approccio proposto permetta di affrontare la complessità dei WDS con un linguaggio strutturato e con strumenti concettuali riusabili.

4.1. Il Sistema di Distribuzione Idrica (WDS) considerato

Il caso di studio analizzato riguarda un WDS urbano di medie dimensioni. Si tratta di un'infrastruttura avanzata che integra componenti intelligenti per il monitoraggio della qualità dell'acqua e per la manutenzione predittiva, sostenuta da serbatoi di approvvigionamento e da un sistema di pompaggio distribuito che garantiscono la continuità ed efficienza della distribuzione.

I principali elementi costitutivi del sistema includono: (i) condotte e tubazioni, tra cui Smart Pipes equipaggiate con sensori per il monitoraggio in tempo reale delle condizioni strutturali; (ii) nodi di distribuzione, dislocati strategicamente per regolare pressione e flusso; (iii) valvole intelligenti, capaci di gestire automaticamente il flusso idrico e di chiudersi in caso di anomalie; (iv) serbatoi e bacini, fondamentali per l'equilibrio idraulico e la regolazione della pressione; (v) una rete di comunicazione, che assicura la connettività tra i dispositivi di campo, i nodi edge e le infrastrutture cloud per l'elaborazione avanzata dei dati.

Il sistema così integrato consente l'implementazione di funzionalità tipiche dei moderni WDS intelligenti [5], tra cui: (i) monitoraggio in tempo reale della qualità dell'acqua e rilevamento precoce delle anomalie, attraverso la misurazione di parametri chiave come pH, torbidità, conducibilità, temperatura, carbonio organico totale, vibrazioni e continuità strutturale delle condotte, livello dell'acqua, flusso e pressione; (ii) manutenzione predittiva, basata su algoritmi di intelligenza artificiale per stimare l'insorgenza di guasti e ridurre i costi operativi; (iii) ottimizzazione dell'efficienza della rete, mediante indici di prestazione che valutano l'adattabilità del sistema alle variazioni della domanda e ad altre condizioni critiche; (iv) automazione e gestione remota, che consente interventi in tempo reale come l'attivazione automatica delle valvole e la generazione di notifiche agli operatori attraverso dashboard intelligenti.

In un tratto di condotta della rete (Figura 2) sono installati sensori di temperatura e pressione insieme a una valvola intelligente. La disposizione consente di definire già in fase di progettazione vincoli logici:

- i sensori di temperatura devono fornire valori pressoché identici;
- il sensore di pressione a valle deve registrare un valore pari alla misura a monte meno la caduta di pressione attesa;
- due sensori posti ai lati di una valvola devono restituire valori identici quando la valvola è aperta, mentre il sensore a valle deve registrare zero in caso di chiusura.

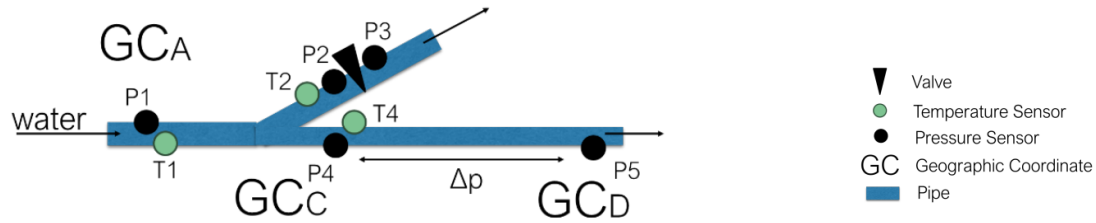


Figura 2 - Dettaglio di una sezione di condotta con sensori di pressione, sensori di temperatura e valvola intelligente

L'applicazione del SEM a uno scenario di questo tipo consente di descrivere in maniera sistematica sia i componenti fisici (PhysicalEnvironment) sia quelli cyber (CyberStatus, proprietà e interazioni funzionali), organizzandoli in un quadro concettuale coerente. Le funzionalità avanzate di monitoraggio, predizione e automazione trovano corrispondenza nelle SmartFunctionality del metamodello, dimostrando come il SEM possa offrire un supporto metodologico alla rappresentazione e alla gestione della complessità di un WDS moderno.

4.2. Il modello SEM per il WDS considerato

La Figura 3 illustra il modello SEM costruito per il WDS analizzato, mostrando la prospettiva funzionale del metamodello. Questa rappresentazione consente di mettere in evidenza le funzionalità intelligenti che il sistema deve garantire e le relazioni che esse instaurano con: (i) i sensori e i dispositivi di controllo distribuiti lungo l'infrastruttura fisica; (ii) entità esterne, come i servizi di sicurezza pubblica; (iii) autorità locali e agenzie governative.

All'interno del modello sono state identificate quattro funzionalità principali: (1) SystemStatus, dedicata al monitoraggio dello stato complessivo della rete; (2) AnomalyDetection, mirata all'individuazione di anomalie e irregolarità operative; (3) PredictiveMaintenance, orientata alla previsione di guasti e alla pianificazione proattiva degli interventi; (4) WaterDistributionManagement, focalizzata sull'ottimizzazione delle prestazioni e sulla gestione equilibrata delle risorse. Tali funzionalità intelligenti, contrassegnate dallo stereotipo Execution, corrispondono a procedure operative complesse che comprendono azioni come il ripristino del sistema in caso di guasti o la notifica automatica ai cittadini riguardo a interruzioni o riprese del servizio.

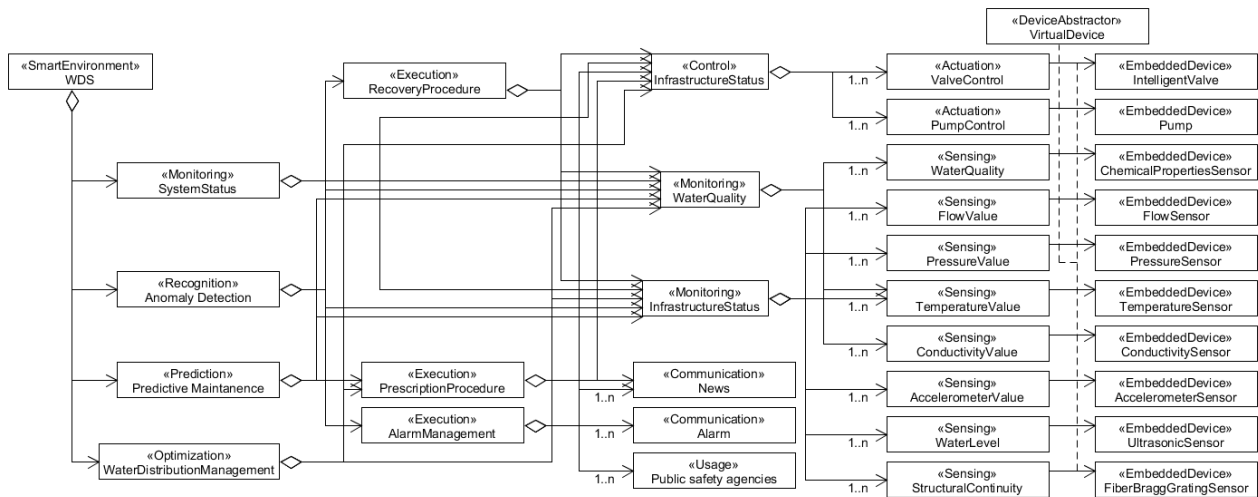


Figura 3 - Il modello SEM realizzato per il WDS considerato

Oltre alla prospettiva funzionale, il SEM consente di rappresentare la prospettiva dei dati (Figura 4), catturando relazioni logiche e collocazione geografica delle misure.

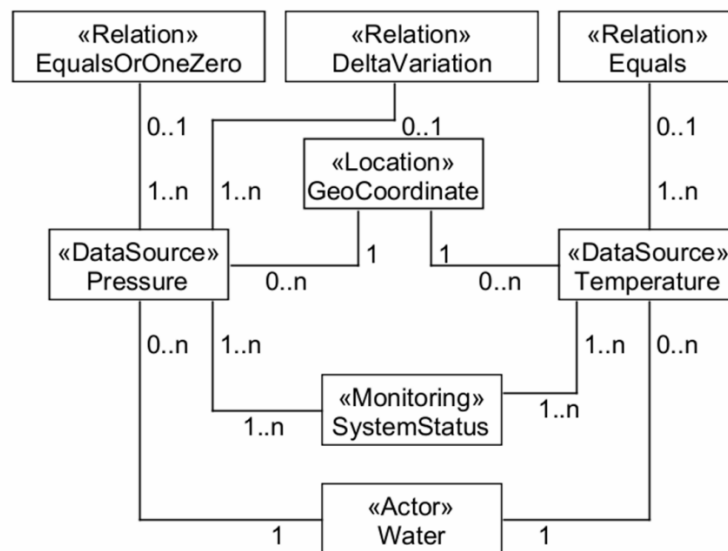


Figura 4 - Prospettiva dei dati del WDS tramite SEM

Infine, un diagramma a oggetti (Figura 5) mostra l'istanza concreta dei sensori e delle relazioni, fornendo una rappresentazione operativa del modello.

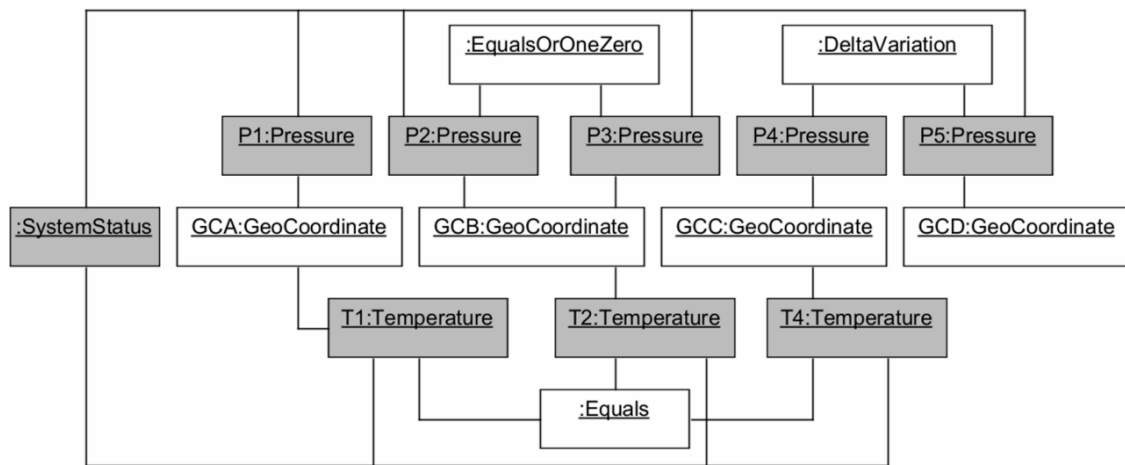


Figura 5 - Diagramma a oggetti del WDS derivato dal metamodel SEM

Nel modello, queste funzionalità composte vengono scomposte in funzioni più elementari, rappresentate dagli stereotipi Sensing, Communication e Actuation. Ad esempio, i sensori installati lungo le condotte e nei serbatoi corrispondono direttamente alle entità Sensing; le valvole intelligenti, in grado di regolare automaticamente il flusso e chiudersi in presenza di anomalie, trovano corrispondenza nell'Actuation; la rete di comunicazione che collega sensori, nodi edge e piattaforme cloud rappresenta la funzionalità Communication. In questo modo, il SEM consente di mappare in maniera sistematica i componenti fisici e cyber del WDS all'interno di un unico quadro concettuale. Infine, il modello evidenzia anche i dispositivi concreti utilizzati per il rilevamento e l'attuazione. Questi vengono gestiti attraverso l'entità VirtualDevice, che astrae l'hardware fisico e consente di sostituire o aggiornare i dispositivi senza alterare la struttura del modello, favorendo così modularità e flessibilità. In un contesto come quello dei WDS, tale astrazione si rivela particolarmente utile per garantire l'adattabilità del sistema alle evoluzioni tecnologiche e alle esigenze di lungo periodo.

4.3. Discussione critica e lezioni apprese

L'applicazione del SEM ai WDS ha offerto spunti significativi per comprendere le potenzialità e i limiti del framework nel supportare la modellazione di infrastrutture idriche complesse. La rappresentazione strutturata di componenti, interazioni e funzionalità intelligenti ha dimostrato di facilitare un approccio più sistematico e modulare alla gestione della complessità. Grazie all'organizzazione gerarchica delle funzionalità di rilevamento, attuazione e comunicazione, è stato possibile descrivere scenari operativi tipici dei WDS con chiarezza concettuale.

Un vantaggio rilevante del SEM consiste nella sua capacità di integrare dimensioni eterogenee della gestione dei WDS, tra cui il monitoraggio della rete, la manutenzione predittiva e il rilevamento precoce delle anomalie. Ad esempio, un episodio di perdita in una condotta può essere rappresentato nel modello come sequenza di funzioni che parte dal sensing dei sensori idroacustici (Sensing), passa attraverso il rilevamento dell'anomalia (AnomalyDetection), e culmina nell'attuazione automatica delle valvole intelligenti (Actuation) per isolare la sezione compromessa. In scenari di contaminazione, invece, il modello consente di descrivere come i sensori chimici rilevino parametri anomali, attivando la funzionalità di SystemStatus e generando automaticamente notifiche

(Communication) alle autorità competenti e ai cittadini. Allo stesso modo, le funzioni di PredictiveMaintenance trovano applicazione pratica nella previsione di guasti imminenti alle pompe di distribuzione, supportando decisioni proattive sugli interventi.

Un altro punto di forza del SEM è la sua funzione di ponte tra esperti di dominio e sviluppatori software. La struttura del metamodello consente agli ingegneri idraulici di esprimere requisiti e vincoli (ad esempio soglie di pressione, parametri di qualità dell'acqua, regole di ridondanza) senza necessità di competenze avanzate di ingegneria del software. Parallelamente, gli sviluppatori dispongono di un modello formalizzato che può essere tradotto più agevolmente in architetture software e implementazioni operative, riducendo il rischio di incomprensioni e aumentando l'allineamento tra progettazione concettuale e realizzazione tecnica.

Tuttavia, l'esperienza maturata ha evidenziato anche alcune limitazioni e margini di miglioramento. In primo luogo, sebbene il SEM offra un'astrazione ad alto livello, non integra metodologie specifiche di dominio, come i modelli idraulici e le tecniche di ottimizzazione dei flussi, che restano fondamentali per una progettazione ingegneristica accurata. In secondo luogo, il framework non prevede astrazioni native per la modellazione di politiche di coordinamento distribuito tra entità, aspetto cruciale nei WDS per garantire la coerenza tra nodi edge, centrali di pompaggio e sistemi di controllo. In terzo luogo, considerata la complessità intrinseca dei sistemi che il SEM mira a rappresentare, risulterebbe utile arricchire il framework con una libreria di design pattern specifici per infrastrutture critiche. Tali pattern, ad esempio dedicati alla gestione delle emergenze o all'ottimizzazione della distribuzione in scenari di domanda variabile, favorirebbero la riusabilità e la rapidità di modellazione, garantendo al contempo maggiore coerenza tra applicazioni in diversi domini.

In sintesi, l'esperienza mostra che il SEM costituisce uno strumento potente per strutturare la modellazione dei WDS e per avvicinare prospettive ingegneristiche e informatiche. Tuttavia, per massimizzarne l'efficacia pratica, sarà necessario integrare metodologie di dominio, potenziare i meccanismi di coordinamento distribuito e sviluppare un repertorio di pattern di modellazione capaci di supportare scenari ricorrenti nelle infrastrutture idriche intelligenti.

Conclusioni

La complessità dei Sistemi di Distribuzione Idrica (WDS) è in costante crescita, spinta da fattori quali l'urbanizzazione accelerata, l'invecchiamento delle infrastrutture esistenti e gli effetti sempre più marcati dei cambiamenti climatici. Queste sfide richiedono l'adozione di approcci di modellazione avanzati, in grado di supportare non solo la progettazione, ma anche la gestione operativa e la manutenzione predittiva di infrastrutture critiche, sfruttando appieno le potenzialità offerte dall'intelligenza artificiale e dai moderni paradigmi computazionali distribuiti.

In questo studio è stata esplorata l'applicazione del framework **Smart Environment Metamodel (SEM)** al dominio dei WDS. L'analisi ha mostrato che il SEM rappresenta uno strumento metodologico efficace per organizzare e descrivere la complessità dei sistemi idrici intelligenti, consentendo di integrare componenti fisici e cyber in un unico modello concettuale e favorendo un dialogo più fluido tra ingegneri di dominio e sviluppatori software. Il SEM si è rivelato utile nel mappare funzionalità avanzate come monitoraggio, rilevamento delle anomalie, manutenzione

predittiva e gestione ottimizzata delle risorse, dimostrando la sua capacità di adattarsi a scenari reali e di fornire un linguaggio strutturato per rappresentare i processi critici.

Tuttavia, l'esperienza ha anche evidenziato margini significativi di miglioramento. In particolare, emergono tre direzioni di sviluppo prioritarie: (i) la definizione di **metodologie specifiche di dominio** che incorporino conoscenze idrauliche e modelli di ottimizzazione dei flussi, così da estendere il livello di dettaglio tecnico oltre l'attuale astrazione del SEM; (ii) la progettazione di una **libreria di design pattern riusabili**, capace di offrire soluzioni scalabili e standardizzate a problemi ricorrenti, ad esempio nella gestione delle emergenze o nell'adattamento a variazioni improvvise della domanda; (iii) l'arricchimento del SEM con astrazioni dedicate al **coordinamento distribuito** tra entità e nodi, indispensabile per affrontare la crescente decentralizzazione dei WDS moderni.

In prospettiva, l'integrazione di questi miglioramenti renderebbe il SEM uno strumento ancora più potente e versatile, capace non solo di supportare i WDS ma anche di rafforzare la sua applicabilità ad altri domini di infrastrutture critiche. L'evoluzione proposta aprirebbe la strada a infrastrutture idriche più resilienti, intelligenti e adattive, in grado di rispondere con maggiore prontezza alle sfide future e di garantire un servizio essenziale per la società in modo sostenibile ed efficiente.

In definitiva, l'adozione del SEM non rappresenta soltanto un contributo teorico alla modellazione dei WDS, ma costituisce anche un passo concreto verso la costruzione di infrastrutture idriche resilienti e digitalmente avanzate, capaci di sostenere in modo efficace le sfide del futuro.

Bibliografia

- [1] A. Abebe, "Internet of things (iot) enabled water distribution system for smart water management," *International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 11, no. 1, pp. 1–10, 2024.
- [2] M. A. Bonora, F. Caldarola, and M. Maiolo, "A new set of local indices applied to a water network through demand and pressure driven analysis (dda and pda)," *Water*, vol. 12, no. 8, 2020.
- [3] U. Sharanya, K. M. Birabbi, B. Sahana, D. M. Kumar, N. Sharmila, and S. Mallikarjunaswamy, "Design and implementation of iot-based water quality and leakage monitoring system for urban water systems using machine learning algorithms," in *International Conference on Networks, Multimedia and Information Technology*. IEEE, 2024, pp. 1–5.
- [4] Y. Rebahi, B. Hilliger, P. Lowin, B. Zheng, G. Da Bormida, and K. Ladjeri, "Towards ai-based condition monitoring and predictive maintenance for water smart pipes: The sandman approach," in *Artificial Intelligence and Applications*, vol. 2, no. 2, 2024, pp. 86–96.
- [5] S. A. Palermo, M. Maiolo, A. C. Brusco, M. Turco, B. Pirouz, E. Greco, G. Spezzano, and P. Piro, "Smart technologies for water resource management: An overview," *Sensors*, vol. 22, no. 16, 2022.
- [6] E. Q. Shahra, W. Wu, S. Basurra, and A. Aneiba, "Intelligent edge-cloud framework for water quality monitoring in water distribution system," *Water*, vol. 16, no. 2, p. 196, 2024.
- [7] A. Pagano, D. Garlisi, I. Tinnirello, F. Giuliano, G. Garbo, M. Falco, and F. Cuomo, "A survey on massive iot for water distribution systems: Challenges, simulation tools, and guidelines for large-scale deployment," *Ad Hoc Networks*, vol. 168, p. 103714, 2025.
- [8] A. Gargantini, E. Riccobene, and P. Scandurra, "A semantic framework for metamodel-based languages," *Automated Software Engineering*, vol. 16, no. 3-4, pp. 415–454, 2009.
- [9] F. Cicirelli, G. Fortino, A. Guerrieri, G. Spezzano, and A. Vinci, "Metamodeling of smart environments: from design to implementation," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 30, no. 3, pp. 322–339, 2016.

- [10] F. Cicirelli, G. Fortino, A. Guerrieri, A. Mercuri, G. Spezzano, and A. Vinci, "A metamodel framework for edge-based smart environments," in *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*. IEEE, 2018, pp. 165–172.
- [11] A. Ben Cheikh, A. Front, J.-P. Giraudin, and S. Coulondre, "Context modeling and metamodeling: A state of the art," in *Proceedings of the Mediterranean Conference on Information & Communication Technologies 2015*. Springer, 2016, pp. 287–295.
- [12] A. Omar, A. Delnaz, and M. Nik-Bakht, "Comparative analysis of machine learning techniques for predicting water main failures in the city of kitchener," *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, vol. 2, no. 3, p. 100044, 2023.
- [13] A. Garc'la Baigorri, R. Parada, V. Monzon Baeza, and C. Monzo, "Leveraging urban water distribution systems with smart sensors for sustainable cities," *Sensors*, vol. 24, no. 22, 2024.
- [14] C. Hu, Q. Wang, W. Gong, and X. Yan, "Multi-objective deep reinforcement learning for emergency scheduling in a water distribution network," *Memetic Comput.*, vol. 14, no. 2, pp. 211–223, 2022.
- [15] R. A. Cody, B. A. Tolson, and J. Orchard, "Detecting leaks in water distribution pipes using a deep autoencoder and hydroacoustic spectrograms," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 34, no. 2, 2020.
- [16] N. K. Velayudhan, P. Pradeep, S. N. Rao, A. R. Devidas, and M. V. Ramesh, "Iot-enabled water distribution systems—a comparative technological review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 101 042–101 070, 2022.