



Università degli Studi
di Messina



Università degli Studi Mediterranea
di Reggio Calabria

Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Messina
Corso di Dottorato di ricerca in

“INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E DELLA SICUREZZA “
– XXXV CICLO -

**Curriculum “Ingegneria Idraulica, Costruzioni Idrauliche e Marittime, Idrologia
e Energia delle acque” (SSD: ICAR/02)**

***NUOVA METODOLOGIA INNOVATIVA A SUPPORTO DELLA GESTIONE DEGLI
ACQUEDOTTI URBANI IN CALABRIA – MODELLAZIONE IDRAULICA E TRASFORMAZIONE
DIGITALE PER IL CONTROLLO E LA RIDUZIONE DELLE PERDITE IDRICHE
- CASO STUDIO: RETE DI DISTRIBUZIONE DI REGGIO CALABRIA CENTRO -***

Dottorando:

Ing. Giuseppe MAURO

Coordinatore del Corso di Dottorato:

Prof. Ing. Gaetano BOSURGI

Tutor Attività di Ricerca:

Prof. Ing. Giuseppe BARBARO

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1.....	5
LE PERDITE IDRICHE NELLE RETI ACQUEDOTTO	5
1.1. Acqua: bene primario collettivo e bene economico – uso sostenibile della risorsa idrica	5
1.2. Gestione della risorsa idrica in italia – la normativa.....	9
1.3. Le reti acquedotto in italia - aspetti infrastrutturali del servizio, qualità tecnica ed investimenti.....	12
1.4. Le perdite idriche nelle reti acquedotto - classificazione	16
1.5. Le perdite idriche nelle reti – standard generali di acquedotto	22
CAPITOLO 2.....	25
MODELLIZZAZIONE IDRAULICA AVANZATA A SUPPORTO DELLA GESTIONE DEGLI ACQUEDOTTI.....	25
2.1. Modelli idraulici “Pressure Driven”	25
2.2. Modellizzazione idraulica avanzata	27
2.3. Le perdite idriche reali	30
2.4. Calibrazione del modello basata sul concetto di massa	37
2.5. Analisi del dominio topologico della rete	42
2.6. Distrettualizzazione: District Metered Areas (DMA) e Pressure Management Zones	43
2.6.1. Segmentazione	45
2.6.2. Distrettualizzazione Idraulica.....	48
2.7. Monitoraggio di portate e pressione.....	49
2.8. Adozione di sistemi di regolazione della pressione in rete: Valvole PRV automatiche	51
2.9. Sostituzione dei tronchi vetusti e ammalorati: pianificazione della riabilitazione.....	52
2.10. Supporto alla pianificazione del monitoraggio per pre-localizzare le perdite idriche	55
CAPITOLO 3.....	56
ANALISI PRESSURE DRIVEN IN WNetXL - SIMULATORE IDRAULICO	56
3.1. Analisi in wdnexl-wdnetgis - Premessa	56
3.2. Verifiche di connettività della rete	57
3.3. Definizione della resistenza idraulica delle condotte	58
3.4. Domanda con connessione diretta delle utenze (presa diretta dalla rete).....	60
3.5. Domanda delle utenze con connessione con serbatoi privati (impianti autoclave).....	61
3.6. Definizione e simulazione della domanda alle singole utenze.....	62
3.7. Rappresentazione dei dispositivi idraulici e delle valvole come proprietà dell’oggetto link.....	65
3.8. Modellazione del funzionamento delle valvole	67
3.9. Modellazione di serbatoi a livello variabile (tanks)	71
3.10. Impianti di pompaggio	74
3.11. Inserimento dati relativi a pozzi	77
3.12. Valutazione dell’importanza idraulica delle singole tubazioni.....	78
3.13. Analisi dei distretti di monitoraggio (DMA).....	79
3.14. Analisi di scenari di funzionamento anomali	81

CAPITOLO 4.....	85
APPROCCIO METODOLOGICO PER L'ASSET MANAGEMENT A SUPPORTO DELLA GESTIONE DEGLI ACQUEDOTTI.....	85
4.1. Strategia di asset management - premessa	85
4.2. Nuovo approccio ed iter metodologico per l'asset management a supporto della gestione dell'acquedotto.....	90
4.3. Calibrazione basata sul concetto di massa ed analisi idraulica dei risultati sul modello idraulico calibrato.....	96
4.4. Analisi del dominio topologico del sistema	101
4.5. Metodologia di Distrettualizzazione: Segmentazione Topologica e Distretti Virtuali	103
4.5.1. Segmentazione Topologica – Distretti Virtuali.....	105
4.5.2. Distrettualizzazione Idraulica - Distretti di Misura (DMA).....	107
4.5.3. Progettazione integrata della distrettualizzazione e valvole di controllo della pressione .	109
4.5.4. Monitoraggio delle grandezze idrauliche e tipologie di postazioni di misura.....	111
4.6. Miglioramento funzionale della rete	112
4.7. Piani di riabilitazione - Supporto alla scelta.....	113
CAPITOLO 5.....	117
CASO STUDIO – RETE ACQUEDOTTO CITTÀ DI REGGIO CALABRIA	117
5.1. Iter Metodologico Strutturato di “Asset Management” applicato alla rete di Reggio Calabria – Premesse.....	117
5.2. Acquisizione topologia e portate immesse nella rete distributrice - Valorizzazione dei dati ...	122
5.2.1. Semplificazione Topologica con riferimento a tronchi piccoli	126
5.3. Acquisizione ed importazione dei dati di consumo alle singole utenze.....	127
5.4. Calibrazione del modello idraulico in WNetXL e verifica funzionamento acquedotto Città di Reggio Calabria.....	129
5.5. Analisi del dominio topologico della rete acquedotto della Città di Reggio Calabria	143
5.6. Segmentazione Topologica – Distretti Virtuali.....	145
5.7. Distrettualizzazione Idraulica e Controllo della Pressione	148
5.8. Piani di Riabilitazione di progetto della rete acquedotto	162
5.8.1. Piano di riabilitazione n.1	164
5.8.2. Piano di riabilitazione n.2	170
5.8.3. Piano di riabilitazione n.3	176
5.8.4. Piano di riabilitazione n.4	182
5.8.5. Piano di riabilitazione n.5	188
5.8.6. Piano di riabilitazione n.6	194
5.8.7. Piano di riabilitazione n.7	200
5.8.8. Piano di riabilitazione n.8	206
5.8.9. Piano di riabilitazione n.9	212
5.8.10. Piano di riabilitazione n.10	218
5.9. Sintesi dei risultati ottenuti dalla simulazione idraulica sviluppata nelle diverse configurazioni della rete acquedotto.....	224
5.10. Conclusioni e possibili futuri sviluppi.....	226
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	229

INTRODUZIONE

Scopo del presente lavoro di dottorato è illustrare una metodologia innovativa capace di integrare gli ultimi risultati della ricerca tecnico-scientifica nel campo della *modellazione idraulica avanzata* delle reti, agli strumenti tecnologici offerti dalla trasformazione digitale in campo acquedottistico, denominati *Digital Water Services* (DWSs), il tutto studiato per essere di supporto all'attività di gestione degli acquedotti urbani e facendo esplicito riferimento alla peculiarità delle reti calabresi.

L'obiettivo di "*asset management*" proposto nella tesi verrà realizzato attraverso una ingegnerizzazione della rappresentazione del "sistema acquedotto" e delle attività di distrettualizzazione, controllo delle pressioni e monitoraggio delle grandezze idrauliche principali nelle reti di distribuzione idrica.

Le attività trattate all'interno della tesi sono finalizzate, pertanto, ad implementare una strategia di "*asset management*" mirata ad un'ottimizzazione delle attività di gestione degli acquedotti urbani ed alla riduzione delle perdite idriche reali (*perdite volumetriche*), quale componente rilevante del consumo idrico, che è parte integrante della più generale attività di *efficientamento ed ottimizzazione* delle reti idriche di distribuzione.

Per raggiungere l'obiettivo di "*asset management*" attraverso la riduzione delle perdite volumetriche, è stata sviluppata una strategia basata su presupposti metodologici innovativi per il supporto alla progettazione della distrettualizzazione, controllo delle pressioni, monitoraggio idraulico e riabilitazione. Tale obiettivo viene raggiunto attraverso la *modellizzazione avanzata* del comportamento idraulico dei singoli acquedotti ovvero attraverso la calibrazione di un modello di progetto con un paradigma innovativo basato sui bilanci idrici, integrando nelle analisi idrauliche le *perdite volumetriche in funzione delle pressioni*.

La strategia che si andrà ad esporre puntualmente nei prossimi capitoli è stata applicata al *caso studio* della rete acquedotto di distribuzione che si sviluppa nella zona centro della **Città di Reggio Calabria**.

In Italia, le regioni meridionali e le isole hanno un tasso medio di perdite idriche pari rispettivamente al 48% ed al 55%, a fronte di una media nazionale stimata al 41%. In Calabria

il *Piano di Ambito dell'Autorità Idrica Calabria (ATO Unico Calabria, dic.2020)* ha registrato una situazione ancora peggiore con perdite di rete a livello regionale pari a circa il 60% e con punta massima registrata nella provincia di Reggio Calabria dove vengono stimate perdite di rete pari a circa il 69% (*Bilancio Idrico Regionale*).

In questo contesto infrastrutturale solo il 9% degli acquedotti urbani italiani utilizza i *distretti a fini di monitoraggio e controllo* e, in alcune regioni, l'approvvigionamento intermittente è ancora frequente.

Il problema delle perdite, oggi, affligge in maniera rilevante i sistemi idrici che risultano poco efficienti ed affidabili. Analizzando infatti il settore delle infrastrutture idrauliche e, in particolare, quello dei servizi idrici emerge che, pur essendo il nostro Paese complessivamente ricco d'acqua, la domanda idropotabile non è del tutto soddisfatta almeno in alcune aree.

Tale incongruenza è dovuta in parte al continuo incremento della richiesta idrica, connesso allo sviluppo economico ed all'innalzamento della qualità della vita, in parte ad una serie di carenze strutturali, gestionali e di manutenzione (ordinaria e straordinaria) dei sistemi idrici che danno luogo a perdite significative.

Queste ultime costituiscono una risorsa preziosa, in quanto si tratta di acqua perduta dalle reti di adduzione e di distribuzione e, di conseguenza, già dotata dei requisiti igienici ed organolettici atti al consumo umano. Il recupero di un'aliquota dei rilevanti volumi idrici dispersi permetterebbe sia di alleviare il problema dell'affannosa ricerca di nuove fonti di alimentazione avviata dagli enti gestori, sia il risparmio dei costi derivanti dall'adduzione e dal trattamento.

Tale constatazione, unita alle indicazioni della normativa riguardante il settore delle risorse idriche, ha sensibilizzato gli operatori nei confronti della tematica delle perdite, con conseguente sviluppo di studi finalizzati alla *stima*, al *controllo* e, quindi, alla *riduzione* delle stesse. In tale contesto si inseriscono i moderni criteri di gestione delle reti acquedottistiche, trattate nella presente tesi, tramite i quali è possibile attuare un *controllo attivo del sistema distributivo*. Le perdite dalle reti di acquedotto dipendono dall'*effetto congiunto del deterioramento e della pressione*; pertanto, il controllo della pressione in rete e la riabilitazione delle tubazioni sono *azioni chiave* per migliorare l'efficienza di tali sistemi.

In questo contesto ARERA, l'Autorità italiana per la regolazione dell'energia, delle reti e dell'ambiente (ARERA¹, 2017), ha introdotto un nuovo quadro di regolamentazione del servizio di approvvigionamento idrico-potabile, basato su tre macro-indicatori, *M1 per le perdite idriche*, *M2 per l'affidabilità dell'approvvigionamento idrico* e *M3 per la qualità dell'acqua*, e sanzioni aventi un impatto diretto sulla tariffa idrica.

L'obiettivo di ARERA è incentivare il percorso virtuoso di ristrutturazione delle reti ed efficientamento del servizio. Tali cambiamenti normativi, insieme alla mutata percezione pubblica della gestione delle reti acquedottistiche, richiedono lo sviluppo e l'implementazione di metodologie innovative per poter realizzare piani industriali di gestione sostenibili dal punto di vista economico ed ambientale.

Peraltro, la RQTI di ARERA (*Raccolta Dati Qualità Tecnica*), nonché la strategia complessiva del PNRR, fanno esplicito riferimento alla necessità di operare in tale direzione sfruttando le potenzialità della *digitalizzazione*, ovvero l'implementazione di strumenti digitali che mettano al servizio della progettazione, pianificazione e gestione delle reti acquedottistiche paradigmi, metodi e strumenti della *transizione digitale*.

Il processo di trasformazione digitale sta rivestendo negli ultimi anni un ruolo importante nei processi gestionali e produttivi dei settori privati e professionali. In generale, la trasformazione digitale consente la risoluzione di problemi di molteplice natura tramite l'integrazione di strumenti di acquisizione dati "*real-time*" e tecniche di analisi dei dati basate sul Machine Learning e l'Intelligenza Artificiale.

In questo scenario si sviluppa la presente tesi all'interno della quale, con il supporto della società IDEA-RT s.r.l., spin-off accademico del Politecnico di Bari, quale provider di innovazione tecnico-scientifica accreditata a livello internazionale, verrà proposta una nuova metodologia finalizzata all'applicazione di processi efficaci e flessibili per la gestione specifica delle *reti idriche calabresi* a livello operativo, tattico e strategico, ovvero da orizzonti di breve termine fino a quelli di lungo periodo.

Verrà pertanto sviluppata ed implementata una *metodologia razionale, integrabile, replicabile, scalabile e flessibile* per l'ingegnerizzazione dei sistemi acquedottistici con il fine di poter

¹ ARERA (2017) Deliberazione 27 Dicembre 2017 917/2017/R/IDR "Regolazione della Qualità Tecnica del Servizio Idrico Integrato ovvero di ciascuno dei singoli servizi che lo compongono (RQTI).

realizzare piani industriali di gestione che, dall'orizzonte operativo a quello strategico, consentano di ottenere *efficienza ed efficacia gestionale*.

La metodologia descritta nella presente tesi è stata definita e sviluppata per rispondere alle specificità delle *reti calabresi* utilizzando i dati disponibili e sulla base di assunzioni tecnicamente coerenti con il contesto reale. Questa necessità è pienamente integrata nelle caratteristiche degli strumenti software utilizzati, che integrano i più recenti sviluppi della ricerca internazionale nel settore dell'analisi, supporto alla pianificazione e gestione degli acquedotti urbani. Nello specifico, come già accennato, è stato realizzato uno studio dimostrativo sviluppato sulla rete reale della **Città di Reggio Calabria**.

I risultati dell'applicazione hanno permesso di evidenziare le opportunità offerte dalla transizione digitale per la gestione delle reti idriche, quale infrastruttura strategica per la crescita socio-economica e sostenibile del territorio.

La Figura n.1 di seguito schematizza il *flow-chart* dell'iter metodologico utilizzato e proposto nei capitoli a seguire della presente tesi:

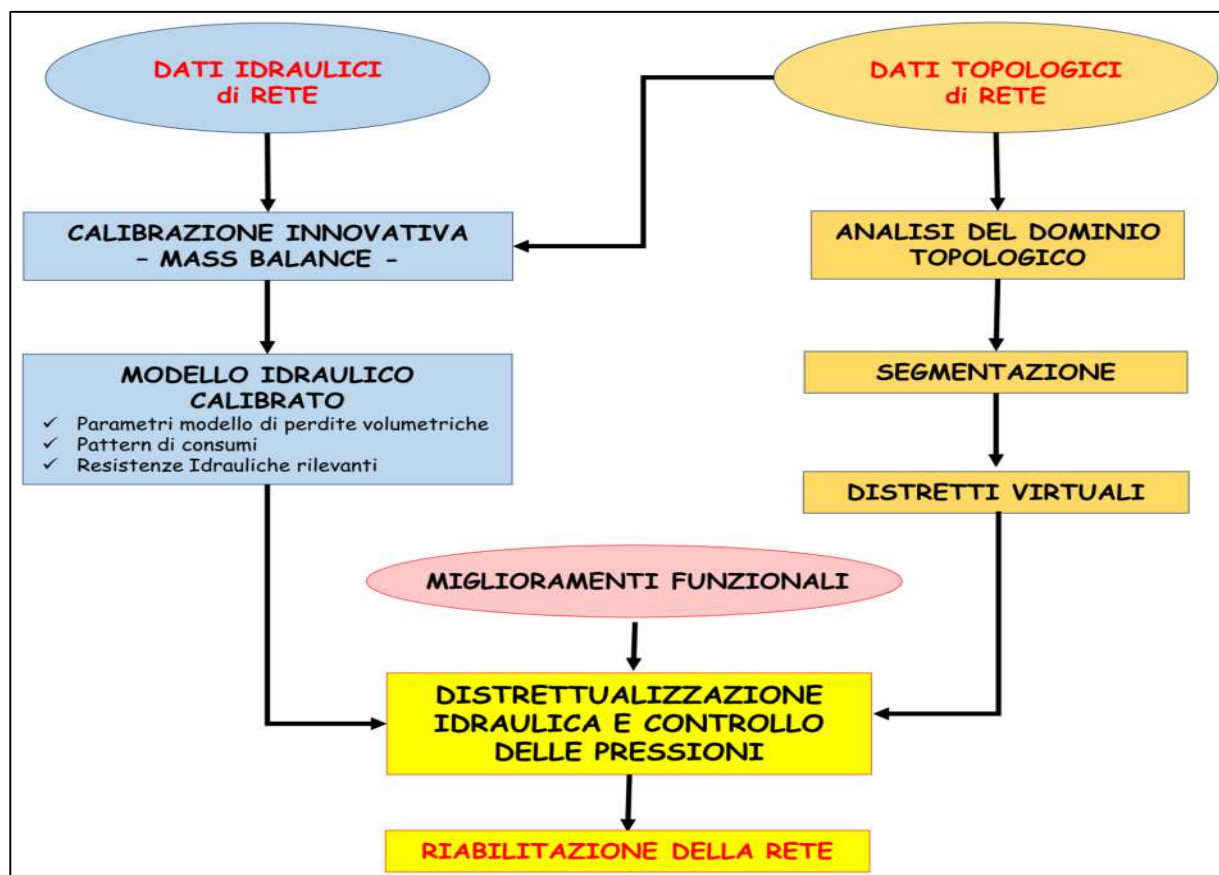


Fig.1. Flow-Chart dell'iter metodologico innovativo proposto per la gestione degli acquedotti urbani in Calabria.

CAPITOLO 1

LE PERDITE IDRICHE NELLE RETI ACQUEDOTTO

1.1. ACQUA: BENE PRIMARIO COLLETTIVO E BENE ECONOMICO – USO SOSTENIBILE DELLA RISORSA IDRICA

L'acqua rappresenta la risorsa primaria per la vita sulla Terra e dalla sua disponibilità qualitativa e quantitativa dipendono il benessere e lo sviluppo della società umana e di tutti gli ecosistemi viventi.

Un **futuro sostenibile della risorsa idrica** dovrebbe rappresentare pertanto il fondamento stesso dell'attività pubblica ed industriale, in particolare in questo momento storico in cui i cambiamenti climatici, la crescita demografica e la concentrazione della popolazione nei centri urbani stanno aumentando la pressione sulla risorsa, peggiorandone la qualità e diminuendone la quantità disponibile.

L'Italia, pur essendo un territorio ricco di acqua per caratteristiche morfologiche e geografiche, viene considerato dall'OCSE uno tra i paesi europei soggetto a maggiore *stress idrico* e con un grado di criticità *elevato*: viene infatti stimato un prelievo pari a circa il 30% delle sue risorse idriche rinnovabili.

Negli ultimi anni, in particolare, la crisi climatica e la diminuzione delle precipitazioni hanno portato ad un costante aumento degli stati di emergenza idrica dichiarati da parte della Regioni; basti pensare che nel 2017 i principali bacini italiani (Po, Adige, Tevere e Arno) hanno ridotto le portate medie del 40% rispetto al trentennio precedente (fonte Istat).

La situazione del sistema idrico viene ulteriormente aggravata dalla sempre maggiore impermeabilizzazione dei terreni, dovuta al consumo di suolo, che ostacola la ricarica delle falde e dalla vulnerabilità complessiva del territorio generata da un sempre più preoccupante dissesto idrogeologico (fonte Ispra).

A fronte di questo scenario particolarmente critico, è stata messa in atto negli ultimi anni una politica nazionale che privilegia la **conservazione delle risorse idriche** favorendo investimenti nella ristrutturazione delle infrastrutture e delle reti, condizione fondamentale per potenziare la *resilienza* del sistema al cambiamento climatico ed ambientale.

In questo panorama va evidenziato il ruolo decisivo ricoperto dal **quadro normativo e legislativo nazionale** che, a tal riguardo, impone un più appropriato modello di gestione dei servizi di pubblica utilità improntato al raggiungimento di obiettivi precisi, misurabili e confrontabili nel tempo e nello spazio.

Con l'introduzione del **Servizio Idrico Integrato** l'acqua viene ormai considerata a tutti gli effetti come un *bene economico* ed esiste un vero e proprio "mercato dell'acqua" che interessa operatori pubblici e privati. Di conseguenza la gestione delle risorse idriche, anche se riveste da sempre un ruolo culturale e sociale deve assicurare, attraverso un'opportuna tariffa, un'adeguata remunerazione per la quale è essenziale definire dei criteri di produttività.

Il tema della **sostenibilità nella gestione integrata della risorsa idrica** può essere pertanto esaminato da diversi punti di vista:

- a) **ambientale:** *obiettivo prioritario dello sviluppo sostenibile è la conservazione o il ripristino di un regime idrico compatibile con la tutela degli ecosistemi, con gli usi ricreativi e con l'assetto del territorio.*
- b) **economico-finanziario:** *l'utilizzo della risorsa idrica implica la realizzazione di infrastrutture. Un indicatore fondamentale per la sostenibilità è costituito dalle modalità di copertura del costo operativo e di capitale, che dovrebbe essere interamente a carico della generazione che fruisce dei relativi benefici. Un ulteriore indicatore è rappresentato dalla capacità delle tariffe di sostenere i costi.*
- c) **etico-sociale:** *l'acqua è un bene essenziale per la vita e per tutti i processi produttivi, oltre che per l'ecosistema. La soddisfazione della richiesta idrica, almeno entro certi limiti, dovrebbe essere garantita a tutti, a condizioni economiche che non rendano l'acqua un bene di lusso.*

L'analisi dei problemi di **gestione e pianificazione delle risorse idriche** deve pertanto, necessariamente, considerare una serie di condizioni al contorno:

- **incremento dei fabbisogni idrici**, in particolare per gli usi civili;
- **esistenza di un deficit tra fabbisogni e disponibilità di risorsa**;
- **necessità di manutenzione ed ammodernamento degli impianti**, al fine di aumentarne l'efficienza e di ridurre le perdite, oggi di notevole entità;

- *necessità di controllo dei parametri di qualità della risorsa idrica in rapporto alla destinazione d'uso;*
- *necessità di una gestione integrata della risorsa idrica, mirata ad un uso sostenibile di essa.*

L'obiettivo deve essere quello di realizzare un **sistema idrico più resiliente** per quanto riguarda la sicurezza e la continuità di approvvigionamento, modificando i criteri attuali di progettazione e di gestione dei sistemi idrici, in quanto basati su dati storici che non sono più sufficienti per la modellazione ingegneristica dei cambiamenti in atto.

È da evidenziare infatti che se la carenza di precipitazioni va attribuita in massima parte al “*cambiamento climatico*” in atto, la *crisi idrica* che ne consegue dipende anche dai modelli di consumo e di gestione della risorsa, nonché dalle esistenti vetuste infrastrutture; in sostanza, è legata all'azione (o all'inazione) dell'uomo.

Si riportano di seguito alcuni dati caratteristici inerenti le principali grandezze tecniche su scala nazionale, desunte dalla Relazione annuale ARERA sullo stato dei servizi (2019), la cui analisi fotografa un ritardo infrastrutturale che, se non affrontato rapidamente ed in modo sistemico e multidisciplinare, andrà progressivamente assumendo una dimensione di particolare criticità:

- ✓ *la popolazione residente coperta dal servizio di acquedotto è pari a circa l'83%;*
- ✓ *il volume immesso nella rete di distribuzione è stimato complessivamente pari a 7,8 miliardi di mc per anno (circa 130 mc/anno-abitante);*
- ✓ *il volume consegnato all'utenza ammonta a quasi 5,2 miliardi di mc (valore medio annuo pari a 87 mc/ab. serv.);*
- ✓ *le perdite fisiche sono stimate mediamente pari al 41% dell'acqua complessivamente immessa in rete;*
- ✓ *la quota principale dei volumi prelevati dall'ambiente per uso idropotabile proviene da fonti sotterranee (49%), mentre la percentuale di volumi attinta da sorgenti e da corpi idrici superficiali è pari, rispettivamente, al 34% e al 17%;*
- ✓ *la lunghezza complessiva della rete di acquedotto è stimata in circa 425.000 km (al netto degli allacciamenti);*

- ✓ *i materiali maggiormente impiegati per la realizzazione delle reti acquedotto sono l'acciaio/ferro (34%), materiale sintetico (30%) e la ghisa (18%). Permane inoltre, come elemento di potenziale criticità, un 9% circa di condotte in cemento e amianto;*
- ✓ *il dato relativo all'età di posa delle condotte di adduzione e distribuzione mostra una rete acquedottistica particolarmente vetusta: il 36% delle condotte risulta avere un'età compresa tra i 31 e i 50 anni, mentre il 22% è caratterizzato da un'età maggiore ai 50 anni, a fronte di una vita utile considerata ai fini regolatori pari a 40 anni.*

Questo scenario infrastrutturale certifica una corresponsabilità dell'uomo nella **crisi idrica** in atto nel nostro Paese dovuta, pertanto, in massima parte ad un notevole ritardo infrastrutturale e da modelli di consumo e di gestione della risorsa idrica non più sostenibili a breve-medio termine.

Da queste considerazioni e dall'analisi dei problemi di gestione delle risorse idriche nasce la necessità di pianificare importanti investimenti per raggiungere gli **obiettivi nazionali di qualità, economicità ed efficienza del servizio**, tutela della salute pubblica, salvaguardia dell'ambiente, e che riguardano molti aspetti fondamentali dei servizi idrici ed in particolare:

- ✓ **garanzia di continuità nell'approvvigionamento idrico**, in particolare nel Sud Italia;
- ✓ **conseguimento degli standard di qualità dell'acqua distribuita** per la risoluzione delle deroghe, ormai scadute, sui limiti di potabilità;
- ✓ **riduzione delle perdite idriche**, stimate in oltre il 40% dell'immesso in rete, con conseguente contenimento dei costi gestionali e recupero della risorsa acqua;
- ✓ **rinnovo e completamento dei sistemi di misura**, per consentire una gestione tecnica ed amministrativa del servizio efficace, equa e trasparente;
- ✓ **efficiente monitoraggio e controllo costante dei consumi idrici** attraverso dati precisi e georeferenziati;
- ✓ **sviluppo degli investimenti** nei settori della sperimentazione e dell'innovazione tecnologica.

In questo contesto le **perdite idriche** rappresentano oggi il principale problema da affrontare per una corretta gestione delle reti di acquedotto. Ingenti perdite provocano infatti, nei sistemi acquedottistici, forti squilibri in termini economici, sociali ed ambientali.

1.2. GESTIONE DELLA RISORSA IDRICA IN ITALIA – LA NORMATIVA

La normativa di riferimento sull'utilizzo delle Risorse Idriche in Italia è la Legge Quadro n.36 del 05.01.1994 (*c.d. "Legge Galli"*), recante "Disposizioni in materia di risorse idriche", seguita dal D.P.C.M. 4 marzo 1996 e dal D.L. 152/1999 di recepimento delle direttive europee. Tale normativa ha imposto una svolta alla *gestione dei sistemi acquedottistici*, con l'introduzione del **Servizio Idrico Integrato** che può essere definito come "*l'insieme dei servizi pubblici di captazione, trasporto e distribuzione di acqua ad usi civili, di fognatura e di depurazione delle acque reflue*".

Non è difficile comprendere la portata innovativa contenuta già nella definizione di **Servizio Idrico Integrato**; prima della riforma in Italia ogni Comune gestiva, direttamente o tramite una propria municipalizzata, il servizio di acquedotto, di fognatura e di depurazione. Tale situazione ha determinato una frammentazione delle gestioni che, alla data di entrata in vigore della "*legge Galli*", avevano raggiunto un numero superiore ad 8.000. La tariffa veniva considerata più un *canone* che un *corrispettivo del servizio erogato* e pertanto, questa visione, aveva determinato l'imposizione di criteri tariffari estremamente bassi che, nel tempo, hanno portato forti perdite economiche a carico dei Bilanci comunali, andando ad incidere direttamente sulla qualità del servizio erogato.

La riforma introdotta dalla "Legge Galli", necessaria per ovviare ai problemi sopra descritti, ha previsto una riorganizzazione del servizio idrico sia di tipo territoriale che di tipo funzionale.

L'articolo 1 la Legge recita: "*Tutte le acque superficiali e sotterranee, ancorchè non estratte dal sottosuolo, sono pubbliche e costituiscono una risorsa che è salvaguardata ed utilizzata secondo criteri di solidarietà*".

I punti fondamentali della norma sono, pertanto, i seguenti:

- ✓ **Istituzione del "Servizio Idrico Integrato"**, comprendente l'intero ciclo tecnologico dell'acqua in ambito urbano in tutte le sue fasi:
 - a) produzione della risorsa e l'eventuale adeguamento ad idonei *standards di qualità*;
 - b) trasporto e la distribuzione all'utenza;
 - c) collettamento dei reflui mediante il sistema di drenaggio urbano;

- d) la depurazione e lo smaltimento nel recapito finale,
- e) eventuale affinamento dei reflui depurati per consentirne il riutilizzo nell'agricoltura, nell'industria o per altri usi;
- ✓ **Riorganizzazione dei servizi idrici** mediante la suddivisione del territorio in “**Ambiti Territoriali Ottimali**” (A.T.O.) definiti, sotto l'aspetto tecnico e della gestione, con l'obiettivo prioritario di un utilizzo razionale della risorsa idrica in modo da rispettare le caratteristiche fisico-idrografiche dei bacini e delle falde acquifere disponibili. In pratica la Legge si propone una suddivisione del territorio non più basata su principi puramente amministrativi, bensì su criteri geografico-naturalistici;
- ✓ **Determinazione del bilancio idrico** al fine di individuare gli squilibri quantitativi e qualitativi esistenti fra la disponibilità e l'uso della risorsa. Il bilancio idrico è un aspetto indispensabile al fine della corretta definizione degli interventi strutturali e non, miranti a riassicurare l'equilibrio fra disponibilità e fabbisogni;
- ✓ **Introduzione di criteri industriali di gestione**, mediante la separazione, tramite affidamento in concessione, tra il soggetto titolare dei servizi (ovvero l'insieme dei comuni associati nell'ATO) e il soggetto Gestore, al fine di superare la frammentazione gestionale esistente sulla massima parte del territorio nazionale prevedendo, altresì, il conseguimento di un equilibrio economico-finanziario di gestione;
- ✓ **Introduzione di un criterio per stabilire la tariffa per l'utente**, necessaria per coprire i costi di servizio, di gestione e di investimento. Essa deve infatti essere determinata dagli enti locali che formano il consorzio, sulla base dei criteri indicati dal Ministero dei Lavori Pubblici;
- ✓ **Determinazione dei “Livelli minimi dei servizi che bisogna garantire in ciascun Ambito Territoriale Ottimale”**. In particolare, alle utenze domestiche bisogna assicurare una fornitura idrica che sia continua 24 ore su 24 (salvo casi eccezionali o interventi programmati di manutenzione), che possieda le seguenti caratteristiche:
 - a) dotazione pro-capite giornaliera non inferiore a 150 l/ab*g da intendersi come volume attingibile dall'utente nell'arco delle 24 ore;
 - b) portata minima erogata al punto di consegna non inferiore a 0,10 l/s per ogni unità abitativa;

- c) carico idraulico minimo di 5,00 mt, misurato al punto di consegna, relativo al solaio di copertura del fabbricato con quota topografica maggiore;
- d) carico massimo non superiore a 70,00 mt, riferito al punto di consegna rapportato al piano stradale

La Legge Quadro si pone pertanto quale obiettivo la necessità di garantire l'integrità ambientale dei corpi idrici ed un "***approccio sistemico alla gestione delle acque***", attraverso un idoneo processo di pianificazione.

La riforma ha pertanto determinato due effetti molto importanti realizzando una riduzione considerevole del numero delle gestioni e determinando un cambiamento sostanziale nella definizione della *tariffa*, che deve essere calcolata in modo tale da assicurare la copertura integrale, oltre che del costo per il servizio, anche dei costi d'investimento e di esercizio sostenuti dal gestore, che riscuote i proventi direttamente dagli utenti.

Il metodo di calcolo della tariffa è lo stesso in tutto il territorio nazionale ed è contenuto nel Decreto Ministeriale del 1° agosto 1996 proposto dal Co.Vi.R.I. ed elaborato, all'epoca, dal Ministro dei Lavori Pubblici.

La variazione riscontrabile in Italia nelle bollette recapitate in diverse zone del Paese dipende dalla mole di investimenti realizzati nel territorio; così, ad esempio, l'A.T.O. in cui l'acquedotto sia *funzionante ed efficiente* avrà bisogno di investimenti minori rispetto all'A.T.O. in cui le strutture obsolete necessitano di migliorie per garantire livelli minimi di efficienza del servizio. Questi costi da sostenersi per ammodernare le strutture, dopo la riforma, sono coperti dalla tariffa e, dunque, sono inseriti all'interno della bolletta.

Il ***servizio idrico integrato*** deve pertanto essere gestito, nel rispetto delle norme nazionali e comunitarie, secondo principi di *efficienza, efficacia ed economicità*.

In Calabria il servizio di *captazione ed adduzione* fino ai serbatoi, in testa alle reti idriche di distribuzione comunali, è svolto dalla **Sorical** (*Società Risorse Idriche Calabresi*) che garantisce l'erogazione di circa 274 milioni di metri cubi di acqua all'anno a 385 comuni, attraverso un complesso sistema infrastrutturale composto a 160 schemi acquedottistici funzionalmente separati, 6000 km di condotte, 14 impianti di potabilizzazione, 2600 nodi di erogazione. Il 30 % dei volumi idrici viene trasportato per gravità (*107 milioni di metri cubici*) attraverso 300 impianti di sollevamento. L'acqua, prima di essere consegnata ai

Comuni, viene trattata nei 13 impianti di potabilizzazione. Tra le voci di spesa della società, l'energia elettrica per il funzionamento degli impianti di sollevamento, è la voce di bilancio più importante.

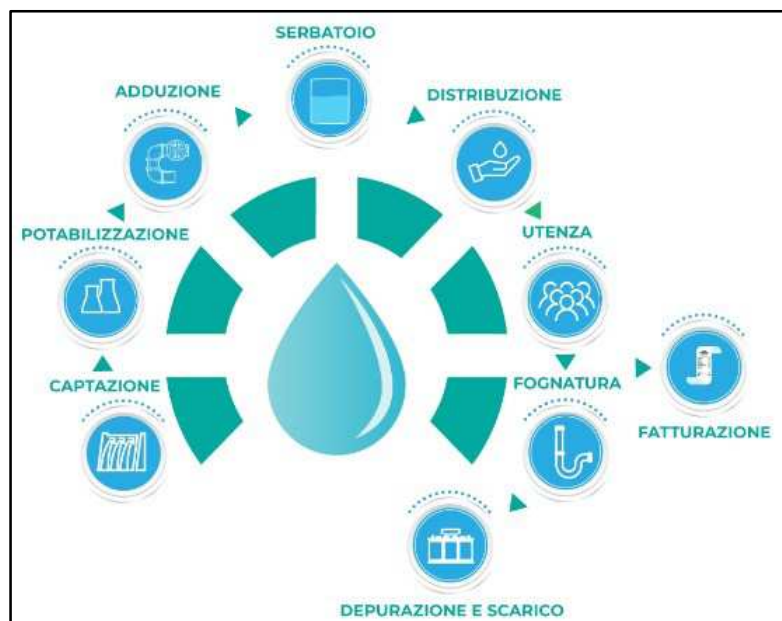


Fig.2. Schema funzionale del Servizio Idrico Integrato

1.3. LE RETI ACQUEDOTTO IN ITALIA - ASPETTI INFRASTRUTTURALI DEL SERVIZIO, QUALITÀ TECNICA ED INVESTIMENTI

L'**acquedotto** è definito come l'insieme delle infrastrutture di *captazione*, *adduzione*, *potabilizzazione* e *distribuzione* della risorsa idrica, cui afferiscono le attività di *approvvigionamento*, *trasporto* e *trattamento dell'acqua*, nonché le attività di *erogazione* all'utente finale.

Tradizionalmente, nei sistemi acquedottistici le reti vengono distinte in due diverse tipologie sulla base della funzione svolta:

- ✓ **Reti di Adduzione** definite dall'insieme delle condotte utilizzate per il trasporto della risorsa idrica dai punti di prelievo verso i centri di utilizzo
- ✓ **Reti di distribuzione** definite dall'insieme delle condotte che dai punti di interconnessione con le *adduttrici* distribuiscono l'acqua fino ai punti di consegna alle utenze finali.

Sulla base dei dati raccolti da ARERA nel monitoraggio RQTI 2020 si evidenzia (Fig.3) che in Italia le *reti adduttrici* costituiscono circa il 17% della rete principale di acquedotto, mentre le *reti di distribuzione* costituiscono il restante 83%.

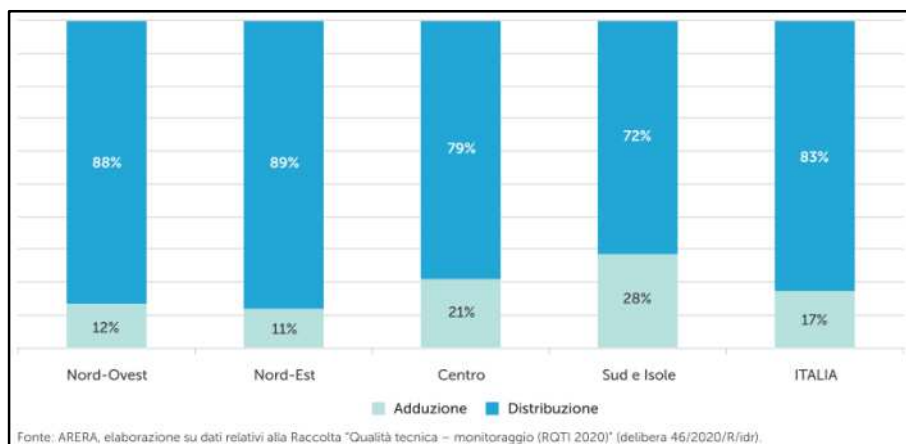


Fig.3. Incidenza delle reti di adduzione e distribuzione sul totale delle reti acquedotto per area geografica

È da evidenziare inoltre che a livello nazionale poco meno dell'80% della lunghezza delle *reti di adduzione* e di *distribuzione* risulta **georeferenziata**, ovvero per tali reti risultano note ed archiviate, in formato digitale, le coordinate di posa e le principali caratteristiche tecniche e topologiche come ad esempio i diametri e la tipologia di materiale.

Il dato nazionale presenta delle forti differenze territoriali per come evidenziato nella seguente figura (Fig.4).

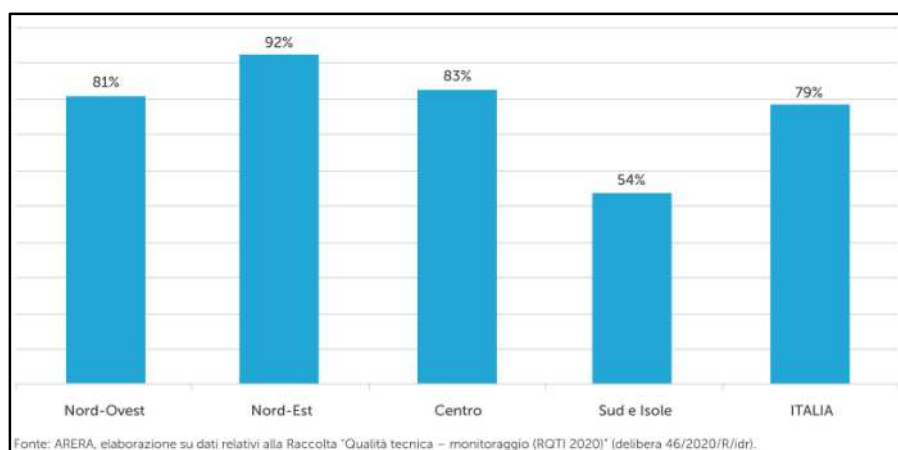


Fig.4. Percentuale di reti di adduzione e distribuzione georeferenziate

Sempre in materia di *digitalizzazione* delle reti, si riscontra negli ultimi anni un significativo incremento per quanto riguarda la messa in esercizio di **sistemi di telecontrollo** o *regolazione automatica della portata* o della *pressione* sulle *reti di distribuzione* (estensione delle *reti di distribuzione distrettualizzate telecontrollate*), che dal 21,8% registrato per il

2016 è salito al 32,8% nel 2020, in un percorso di crescita digitale coerente, peraltro, con gli stimoli al rafforzamento della digitalizzazione del Piano nazionale di ripresa e resilienza (PNRR).

Dal 1° gennaio 2018 è vigente inoltre una specifica regolazione in materia di qualità tecnica del servizio idrico integrato (RQTI) che persegue il raggiungimento di livelli minimi di servizio attraverso:

- 1) la previsione di erogazione di indennizzi automatici agli utenti finali che subiscono un disservizio in termini di continuità del servizio di acquedotto, misurato sulla base di tre indicatori ai quali sono associati standard specifici;
- 2) l'introduzione di un meccanismo di premi-penalità nel caso di mancato conseguimento degli obiettivi fissati per alcuni indicatori ai quali sono associati standard generali di qualità, denominati "macro-indicatori".

Vengono di seguito riportati i n.6 macro-indicatori definiti dalla RQTI di ARERA:

I MACRO-INDICATORI DEFINITI DALLA RQTI	
M1	Contenimento delle perdite idriche nelle reti e impianti di acquedotto
M2	Mantenimento della continuità del servizio idropotabile, sulla base della misura della frequenza delle Interruzioni del servizio
M3	Adeguatezza della qualità dell'acqua erogata
M4	Minimizzazione dell'impatto ambientale derivante dal convogliamento delle acque reflue, misurata sulla base del grado di adeguatezza del sistema fognario
M5	Minimizzazione dell'impatto ambientale collegato allo smaltimento dei fanghi derivanti dalla depurazione delle acque reflue
M6	Minimizzazione dell'impatto ambientale associato allo smaltimento dei reflui in uscita dai trattamenti depurativi

Dalla ricognizione dello stato delle infrastrutture sulla base degli ultimi dati tecnici disponibili (*referiti al 2019*), si conferma l'esistenza in Italia di un *water service divide*, con valori dei parametri tecnici che tendono generalmente a rappresentare situazioni di maggiore criticità in corrispondenza dell'area Sud e Isole.

Le regioni meridionali e le isole hanno, infatti, un tasso medio di **perdite idriche** pari rispettivamente al 48% ed al 55%, a fronte di una media nazionale stimata al 41%. In Calabria il *Piano di Ambito dell'Autorità Idrica Calabria (ATO Unico Calabria, dic.2020)* ha registrato una situazione ancora peggiore con perdite di rete a livello regionale pari a circa il 60% e con punta massima registrata nella provincia di Reggio Calabria dove vengono stimate perdite di rete pari a circa il 69% (*Bilancio Idrico Regionale*).

L'analisi del fabbisogno di investimenti (al lordo dei contributi) per il periodo 2020-2023, condotta nell'ambito delle attività di verifica del Programma degli Investimenti (Pdi) elaborato per ciascuna gestione, conferma a livello nazionale una concentrazione degli sforzi dei gestori al **contenimento del livello di perdite idriche (M1)** a cui sono destinate oltre il 20% delle risorse programmate.

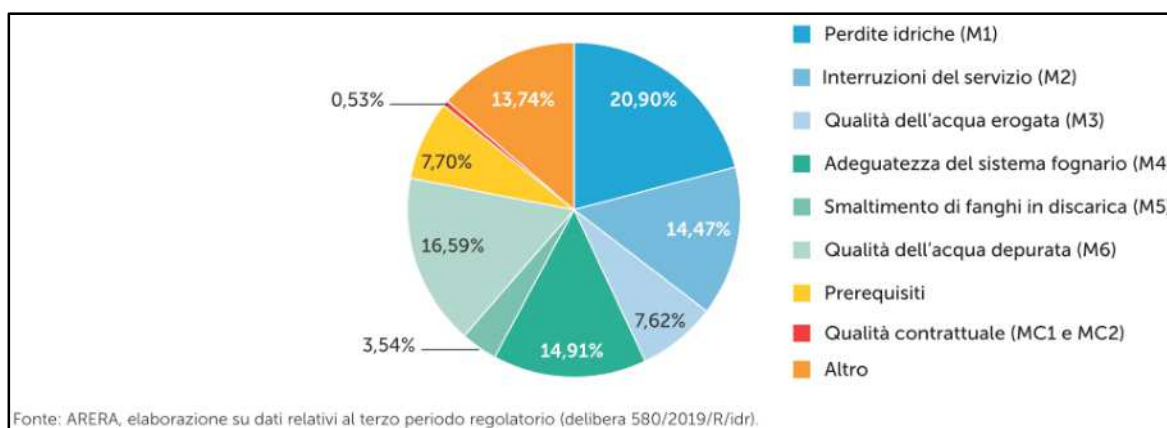


Fig.5. Distribuzione degli investimenti programmati per gli anni 2020-2023

Nella predisposizione tariffarie per il periodo 2020-2023, gli Enti di governo d'ambito hanno qualificato come “*strategiche*” (all'interno del Piano delle Opere Strategiche – POS) nei rispettivi atti di pianificazione una serie di opere finalizzate principalmente alla *riabilitazione di acquedotti esistenti*, alla costruzione di nuovi potabilizzatori, alla realizzazione di nuovi tratti di adduzione e di distribuzione dell'acqua “sovrambito”, alla sostituzione di impianti vetusti etc.. Nel grafico a seguire è evidente il fabbisogno di risorse economiche ed investimenti nel settore strategico del “*servizio Acquedotto*”.

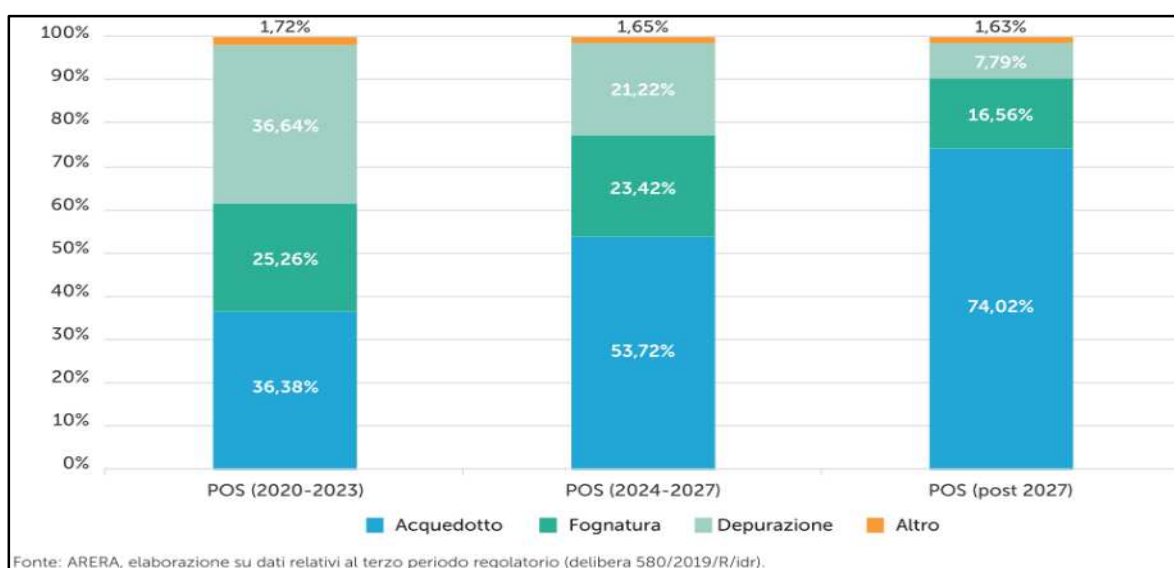


Fig.6. Fabbisogno di investimenti espresso nel Piano delle Opere Strategiche per Servizio (in percentuale)

1.4. LE PERDITE IDRICHE NELLE RETI ACQUEDOTTO - CLASSIFICAZIONE

Le **perdite idriche** costituiscono una risorsa preziosa, in quanto si tratta di acqua perduta dalle reti di adduzione e di distribuzione e, di conseguenza, già dotata dei requisiti igienici ed organolettici atti al consumo umano. Il recupero di un'aliquota dei rilevanti volumi idrici dispersi permetterebbe, pertanto, sia di alleviare il problema dell'affannosa ricerca di nuove fonti di alimentazione avviata dagli enti gestori, sia il risparmio dei costi derivanti dall'adduzione e dal trattamento.

Tale constatazione, unita alle indicazioni della normativa riguardante gli **obiettivi nazionali di qualità, economicità ed efficienza del servizio**, sta sempre più sensibilizzando gli operatori nei confronti della tematica delle perdite, con conseguente sviluppo di studi finalizzati alla stima, al controllo e, quindi, alla riduzione delle stesse.

La definizione di "**perdita**" non è univoca e condivisa, a causa delle differenti interpretazioni delle diverse componenti delle *perdite* e, quindi, del *bilancio idrico*. È utile, preliminarmente, operare una prima distinzione tra le perdite propriamente dette e gli sprechi. Questi possono essere distinti in:

- ✓ *sprechi volontari*, ad esempio rubinetti lasciati "aperti" permanentemente;
- ✓ *sprechi domestici*, causati da incuria o da un cattivo stato dell'impianto idraulico interno: tali sprechi possono essere ridotti da un'efficiente politica di monitoraggio domestico (uno studio in Gran Bretagna ha mostrato una riduzione del 10% in seguito ad una domanda monitorata).

Per quanto concerne le *perdite* è, invece, possibile operare una fondamentale differenziazione tra *perdite amministrative* (o apparenti) e *perdite fisiche* (o reali). Le ***perdite amministrative*** o ***apparenti*** costituiscono i volumi idrici consumati e non contabilizzati, dati dalla somma delle seguenti aliquote:

- ✓ *Volumi autorizzati* ma non misurati quali, ad esempio, quelli utilizzati per idranti, bocche antincendio, lavaggi strade, innaffiamento di giardini, fontane, etc.;
- ✓ *Volumi di servizio*, utilizzati per il corretto funzionamento del sistema idrico quali lavaggi della rete, pulizia dei serbatoi, etc.;
- ✓ *Volumi perduti per sfiori dei serbatoi*, errate aperture di scarichi, ecc.;
- ✓ *Volumi dovuti a errori di misura*;
- ✓ *Volumi prelevati illegalmente*.

Le *perdite amministrative* rivestono un'ovvia importanza di carattere *economico*. Di tali perdite possono essere ridotte o eliminate esclusivamente le aliquote dovute ai volumi idrici utilizzati illegalmente (prese e allacci abusivi, manomissioni dei contatori ecc.), ai volumi contabilizzati per difetto (cattivo funzionamento dei contatori) ed a quelli sprecati per una non corretta gestione dell'acquedotto (sfiori dai serbatoi, aperture errate degli organi di scarico).

Le *perdite reali* o *fisiche* sono, invece, riconducibili alla non integrità e/o alla mancanza di tenuta degli elementi che costituiscono la rete idrica, quali le *condotte*, i *giunti*, le *derivazioni di utenza*, gli *organi idraulici*, le *pareti dei serbatoi*, etc..

Tali perdite, in molti casi, possono rimanere non individuate per mesi o addirittura per anni. Quelle maggiori, di solito, si verificano in seguito a rotture improvvise di tubi o giunzioni; quelle minori, invece, provengono dalle giunzioni, dalle tubazioni e dagli impianti (fig.7).



Fig.7. Perdite reali o fisiche in un acquedotto

I fattori che maggiormente influenzano le perdite reali sono:

- *Tipo di terreno e condizioni di posa*, che possono influenzare sia la frequenza che il numero delle rotture (che si rendono visibili per l'affiorare di acqua in superficie);
- *Difetti di costruzione e scelta dei materiali* utilizzati per le condotte;
- *Presenza di un numero molto elevato di pezzi speciali e di apparecchiature di regolazione*;
- *Numero delle prese di allaccio delle utenze*;
- *Lunghezza delle condotte*;
- *Vetustà delle condotte* (l'età media in Italia si aggira sui 32 anni);
- *Tipologia e qualità delle giunzioni*;
- *Pressioni elevate* e periodo durante il quale la rete è soggetta a tali valori di pressione;

- *Sollecitazioni sui tubi* per effetto delle azioni esterne dovute al traffico;
- *Difficoltà e costi elevati per interventi di riparazione* (non di rado per motivi di budget del Gestore vengono mantenuti in esercizio tratti della rete che sarebbe, invece, opportuno riparare o sostituire).

In generale si ritiene che le **perdite reali** rappresentino mediamente il **70% delle perdite globali** e su di esse vengono in prevalenza concentrati gli sforzi di riduzione.

Da un punto di vista esclusivamente economico, non risulta però conveniente spingere la ricerca della riduzione delle perdite reali al di sotto di un dato limite “fisiologico” che, in base all’esperienza, è possibile assumere tra il 5 e il 10% del volume d’acqua captato.

Le **perdite idriche reali**, secondo la letteratura anglosassone, possono a loro volta essere classificate secondo tre diverse tipologie:

- **Perdite di sottofondo** (*background losses*), costituite da infiltrazioni dovute a una non perfetta tenuta delle giunzioni e alle fenditure di piccole dimensioni. Tali perdite non sono generalmente rintracciabili con le ordinarie attività di ricerca perdite, se non per i tratti muniti di pozzetti di ispezione. Va detto che la perdita idrica viene considerata perdita di sottofondo se la portata persa non supera il valore convenzionale di 500 l/h con una pressione di 50 m. Per valori maggiori la perdita viene considerata di rottura (Lambert, 1995).
- **Perdite da rotture segnalate** (*reported burst*), ovvero perdite idriche visibili in seguito all’affioramento in superficie e/o in seguito a interruzione di servizio, che con un controllo manutentivo più accurato potrebbero essere facilmente eliminabili;
- **perdite da rotture non segnalate** (*unreported burst*), dovute a fessure individuabili solo mediante specifiche attività di ricerca.

I metodi praticati per il contenimento diretto delle perdite idriche sono i seguenti:

- a) *controllo del “cielo piezometrico” nella rete di distribuzione;*
- b) *ispezione periodica dei pozzetti in cui sono installate le apparecchiature;*
- c) *ricerca dei punti in cui si verificano le perdite;*
- d) *periodica riabilitazione e rifacimento dei tratti di tubazione deteriorati.*

Le perdite reali presentano una dipendenza dalla pressione di esercizio della rete, come verrà discusso in seguito. La pressione influenza anche la frequenza di formazione di nuove perdite e di rottura delle condotte stesse.

Il tema di ricerca affrontato nella presente tesi di dottorato riguarda proprio lo studio di innovativi criteri di gestione, controllo e minimizzazione delle *perdite reali* o fisiche esistenti nei sistemi acquedottistici complessi con il duplice obiettivo di riuscire ad ottenere:

- ✓ *un efficiente controllo del cielo piezometrico delle reti di distribuzione al fine di ottenere un più efficace controllo sulle perdite reali e sulla frequenza delle rotture;*
- ✓ *una concreta e misurabile riduzione delle perdite idriche all'interno del sistema.*

La rete di distribuzione è progettata al fine di assicurare i valori minimi di pressione durante tutto l'arco della giornata; tali minimi sono, però, raggiunti solo per brevi periodi di tempo, in corrispondenza dei momenti di maggior consumo, in funzione della variabilità della domanda idropotabile. Di conseguenza durante gran parte della giornata la rete risulta sottoposta ad un eccesso di pressione rispetto a quanto necessario.

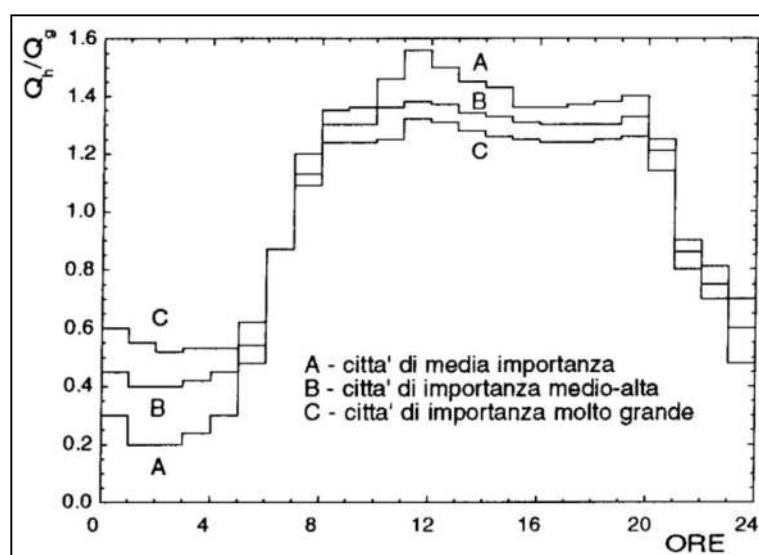


Fig.8. Diagramma andamento dei consumi orari: consumo giornaliero per tre diverse tipologie di centri urbani

È prevedibile, dalla relazione tra perdite idriche reali e pressione, che riducendo gli eccessi di pressione nell'arco della giornata si possano ridurre i volumi d'acqua persi.

Il fenomeno delle perdite è regolato, quindi, dalla relazione intercorrente tra esse e la pressione di esercizio locale in rete e tra questa ultima e la frequenza del verificarsi di nuovi eventi di rottura, quindi di nuove perdite associate.

La prima relazione descrive l'aspetto quantitativo del fenomeno, mentre la seconda ne descrive l'aspetto di formazione.

L'entità notevole delle perdite idriche comporta infatti diverse implicazioni, che possono essere così sintetizzate:

- ✓ **implicazioni sociali**, da ricercare principalmente nei disagi, spesso insostenibili, dovuti alle carenze di erogazione che perdite cospicue di volumi d'acqua, congiuntamente all'espansione delle reti dovute all'aumento demografico;
- ✓ **implicazioni economiche**, che si concretizzano nel danno prodotto dalla perdita di ingenti volumi idrici spesso di costo elevato (acque pompate e/o trattate), al quale si aggiungono gli oneri per la ricerca di fonti di approvvigionamento alternative e l'accelerazione del deterioramento dell'infrastruttura, con conseguente riduzione della vita tecnico-economica e la relativa necessità di investimenti in risanamento;
- ✓ **danni ambientali**, dovuti allo spreco della risorsa idrica che viene sottratta al suo ciclo naturale per non essere poi utilizzata e l'impatto determinato dall'interazione del volume di acqua perduto con il regime idrico di circolazione sotterranea.

Di interesse risulta il confronto tra volumi medi giornalieri pro capite prelevati a uso potabile nelle diverse aree geografiche e la quota parte di volumi fatturati all'utente finale (Fig.9). Dall'analisi di tale grafico emerge un dato medio nazionale di volume prelevato superiore a 400litri/(ab_xgg), a fronte di un volume medio fatturato alle utenze di circa 200litri/(ab_xgg), con un gap via via crescente passando dai gestori del Nord, ai gestori del Centro, ai gestori del Sud e delle Isole. Occorre comunque specificare che la quota di consumo "non fatturato" non corrisponde per intero alle *perdite idriche*, dal momento che comprende anche i consumi autorizzati non fatturati.

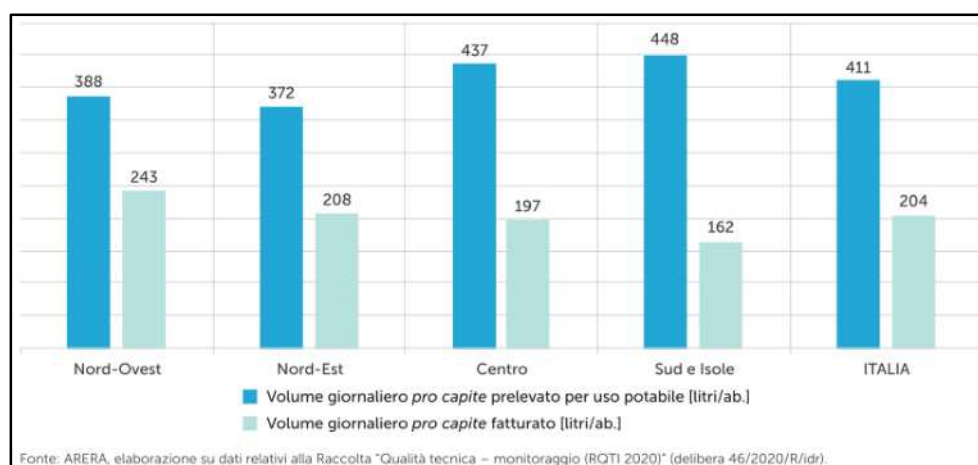


Fig.9. Volumi medi giornalieri "pro capite" prelevati e fatturati per area geografica

In sede internazionale la International Water Association (IWA) propone un sistema pratico di valutazione del **bilancio idrico per le reti di acquedotto** che tiene conto delle molteplici componenti d'utilizzo dell'acqua per determinare in modo corretto le *perdite idriche* e finalizzare la ricerca perdite. Infatti, come accennato nei paragrafi precedenti, non risulta esatto

definire le perdite di rete attraverso la semplice differenza tra volume idrico immesso nel sistema e volume idrico fatturato agli utenti.

VOLUME IMMESSO IN RETE	CONSUMI AUTORIZZATI	CONSUMI AUTORIZZATI FATTURATI	CONSUMO FATTURATO MISURATO	ACQUA FATTURATA
			CONSUMO FATTURATO NON MISURATO	
		CONSUMI AUTORIZZATI NON FATTURATI	CONSUMO NON FATTURATO MISURATO	ACQUA NON FATTURATA
			CONSUMO NON FATTURATO NON MISURATO	
	PERDITE IDRICHE	PERDITE APPARENTI	CONSUMO NON FATTURATO NON MISURATO	
			VOLUME NON MISURATO PER ERRORI DI MISURAZIONE	
		PERDITE REALI O FISICHE	PERDITE DA ROTTURE SEGNALATE	
			PERDITE DA ROTTURE NON SEGNALATE	
			PERDITE DI SOTTOFONDO	

Fig.10. Le componenti del Bilancio Idrico IWA

Grazie alla conoscenza delle componenti del bilancio il Gestore possiede gli elementi per pianificare l'attività di *ricerca perdite* partendo dalla prelocalizzazione per arrivare all'individuazione ed alla riparazione come risultato finale del processo.

La pianificazione della ricerca perdite è sempre soggetta a valutazione economica della convenienza dell'attività stessa. Si tratta cioè di identificare l'entità di perdite per la quale è economicamente vantaggioso effettuare la ricerca.

I concetti di **gestione delle perdite** reali consistono in un semplice e pratico approccio alle complesse problematiche di quantificazione e controllo delle perdite idriche.

In generale le strategie di gestione delle perdite idriche possono essere di due tipi:

- *Controllo Passivo o Reattivo* delle perdite è una procedura attraverso la quale la perdita d'acqua viene affrontata solo dopo che la stessa è diventata evidente ed è generalmente una perdita segnalata dall'utenza a causa dei disservizi creati;
- *Controllo Attivo* si riferisce ad un insieme di procedure e misure adottate come regolare attività dal personale dedicato alla gestione tecnica dell'infrastruttura per monitorare, riparare e mantenere un livello di perdite prestabilito. In questo modo, la perdita viene affrontata prima che venga alla luce

1.5. LE PERDITE IDRICHE NELLE RETI – STANDARD GENERALI DI ACQUEDOTTO

Le **perdite idriche** sono direttamente connesse con lo stato di efficienza delle infrastrutture (reti acquedottistiche e misuratori), ovvero con il tasso di manutenzione e rinnovo della rete e costituiscono, pertanto, la principale problematica legata al servizio di acquedotto.

Per tale motivazione il primo *macro-indicatore MI*, relativo alla conservazione della risorsa idrica nel servizio di acquedotto, è stato introdotto dalla RQTI di ARERA al fine di definire la *classe di appartenenza* ed il relativo obiettivo di *miglioramento/mantenimento*, per ciascun Gestore e con riferimento al singolo *anno di gestione*, come la combinazione dei seguenti indicatori:

- **M1a “perdite idriche lineari”** definite come rapporto tra volume delle perdite idriche totali e lunghezza complessiva della rete di acquedotto nell’anno considerato.

$$M1a [mc/km/gg] = \frac{\text{Perdite Idriche Totali}}{\text{Lunghezza Tot.Rete}} = \frac{(\text{Volumi in Ingresso} - \text{Volumi in Uscita})}{\text{Lunghezza Tot.Rete}} \quad \text{o anche:}$$

$$M1a^a = \frac{WL_{TOT}^a}{365 \times Lp^a} [mc/km/gg]$$

Dove:

- $WL_{TOT}^a = \sum W_{IN}^a - \sum W_{OUT}^a$ rappresenta il *volume perso complessivamente nell’anno “a”* durante le fasi del servizio di acquedotto gestite, esso è definito come differenza tra la somma dei volumi in ingresso nel sistema di acquedotto (dall’ambiente o importata da altri sistemi) e la somma dei volumi in uscita dal medesimo sistema (consumi autorizzati, fatturati o non fatturati,;
- Lp^a rappresenta lo *sviluppo lineare totale* delle condotte di adduzione e distribuzione, escluse le derivazioni d’utenza (o condotte di allaccio), gestite alla data del 31 dicembre dell’anno a (km).

- **M1b “perdite idriche percentuali”** definite come rapporto tra volume delle perdite idriche totali e volume complessivo in ingresso nel sistema di acquedotto nell’anno considerato.

$$M1b [\%] = \frac{\text{Perdite Idriche Totali}}{\text{Volumi in Ingresso Rete}} = \frac{(\text{Volumi in Ingresso} - \text{Volumi in Uscita})}{\text{Volumi in Ingresso Rete}} \quad \text{o anche:}$$

$$M1b^a = \frac{WL_{TOT}^a}{\sum W_{IN}^a} [\%]$$

Dove:

- WL_{TOT}^a rappresenta il volume perso complessivamente nell'anno "a" nelle fasi del servizio di acquedotto gestite;
- $\sum W_{IN}^a$ rappresenta la somma dei volumi in ingresso nel sistema di acquedotto (dall'ambiente o importata da altri sistemi) nell'anno a (mc)

Per tale macro-indicatore sono fissate cinque classi che identificano livelli di perdita via via crescenti passando dalla classe A alla classe E, definite in funzione dei valori assunti dai due indicatori M1a ed M1b:

		Perdite idriche lineari (mc/km/gg)				
		M1a <15	15 ≤ M1a <25	25 ≤ M1a <40	40 ≤ M1a <60	M1a ≥60
Perdite idriche percentuali	M1b <25%	A				
	25% ≤ M1b <35%		B			
	35% ≤ M1b <45%			C		
	45% ≤ M1b <55%				D	
	M1b ≥55%					E

Fig.11. Classi di appartenenza per il macro-indicatore M1

Gli obiettivi di miglioramento stabiliti per il macro-indicatore M1, per ciascuna classe di appartenenza, sono indicati nella figura seguente:

ID	Indicatore	Categoria tariffaria	ID Classe	Obiettivi
M1	M1a - Perdite idriche lineari [mc/km/gg] M1b – Perdite idriche percentuali [%]	RES	A	Mantenimento
			B	-2% di M1a annuo
			C	-4% di M1a annuo
			D	-5% di M1a annuo
			E	-6% di M1a annuo

Fig.12. Classi di appartenenza per il macro-indicatore M1

A livello nazionale, per il campione analizzato da ARERA, le perdite idriche lineari sono risultate mediamente pari a 22 mc/(km.gg) e le perdite percentuali mediamente pari al 41,2%; si rilevano inoltre marcate differenze tra le diverse zone geografiche (Fig.13).

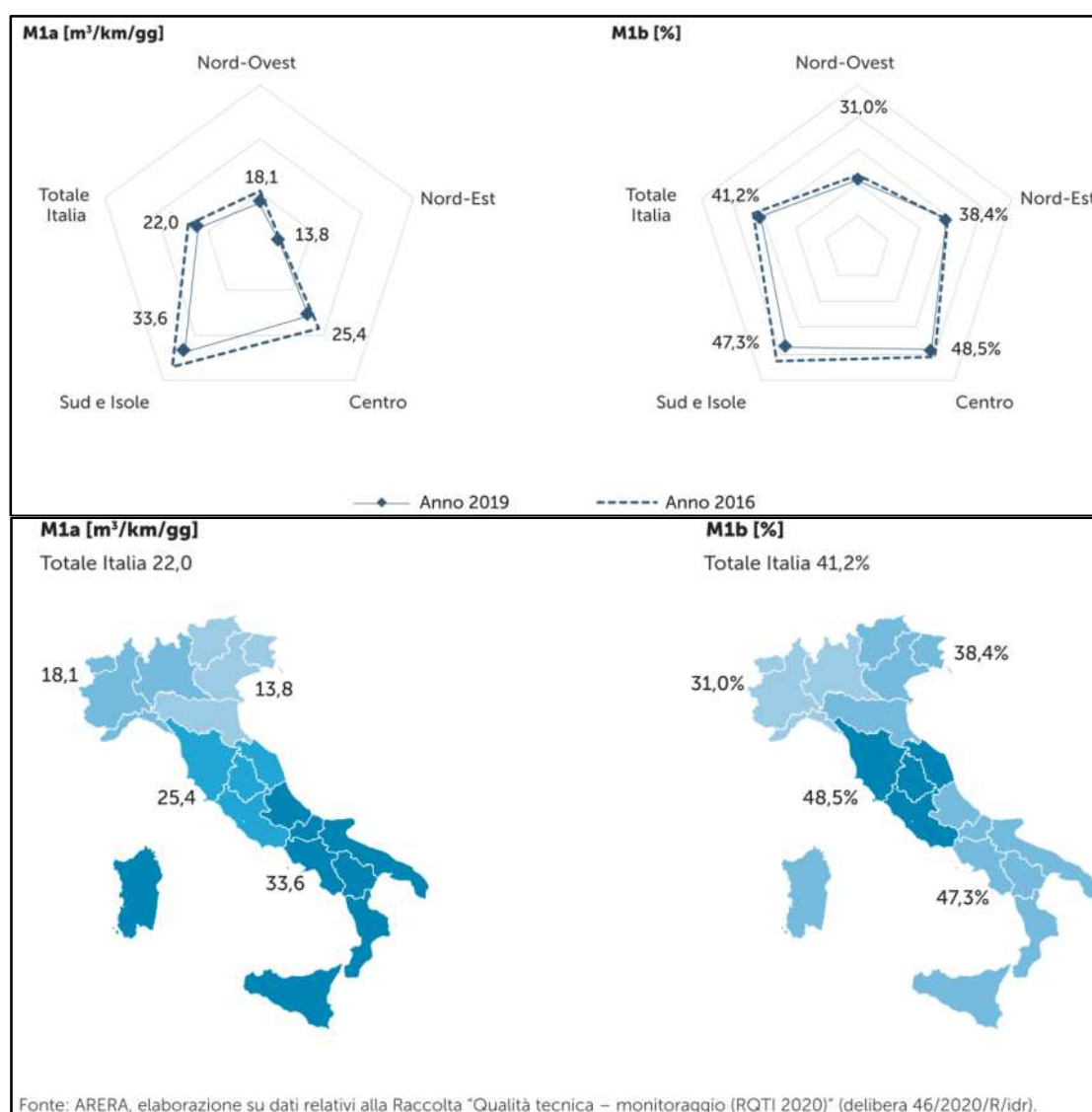


Fig.13 Valori medi di M1a “Perdite Idriche Lineari” ed M1b “Perdite Idriche Percentuali” per area geografica

L’attendibilità dei dati riferiti al macro-indicatore M1 è valutata sulla base di un prerequisito relativo alla disponibilità ed all’affidabilità dei dati di misura.

In particolare, tale prerequisito prevede che almeno il 70% dei volumi di processo totali sia oggetto di misurazione e che almeno il 90% dei volumi di utenza totali derivi dalla lettura di un misuratore installato presso l’utenza²

² I volumi di processo sono costituiti da tutti i volumi circolanti nelle reti e negli impianti, inclusi i volumi scambiati con altri gestori; i volumi di utenza si riferiscono ai volumi consegnati alle utenze finali.

CAPITOLO 2

MODELLIZZAZIONE IDRAULICA AVANZATA A SUPPORTO DELLA GESTIONE DEGLI ACQUEDOTTI

2.1. MODELLI IDRAULICI “PRESSURE DRIVEN”

Storicamente, dai primi del Novecento dello scorso secolo, la costruzione degli acquedotti era funzionale alla salute ed al benessere umano, a supportare lo sviluppo economico delle attività industriali ed a fornire la necessaria protezione antincendio. Alla base degli studi modellistici “classici” vi era pertanto l’esigenza di sviluppare criteri di verifica idraulica dei progetti di realizzazione dei nuovi acquedotti capaci di soddisfare le richieste idriche (*domande*), *statistiche*, delle varie tipologie di utenza (civile, commerciale e industriale) e, specialmente nella cultura anglosassone, di ottemperare alle esigenze di protezione antincendio.

Di conseguenza, l’analisi idraulica degli acquedotti è stata sviluppata nel tempo al fine di calcolare le pressioni di esercizio ai nodi della rete idraulica, per fissate domande e scabrezze delle tubazioni. La verifica idraulica del sistema era, in definitiva, una valutazione delle pressioni ai nodi della rete acquedottistica rispetto alle pressioni minime necessarie per un corretto servizio all’utenza ed una valutazione delle portate e pressioni residue minime per una corretta prestazione idraulica degli idranti.

Con l’avvento del calcolo automatico, nel 1988, Todini³ inventò il Global Gradient Algorithm (GGA) che, pochi anni dopo, divenne il “motore idraulico” di EPANET, sviluppato da Rossman dell’agenzia U.S. E.P.A. I software package attuali si basano generalmente su tale “motore idraulico” o su strategie ad esso assimilabili. È bene pertanto evidenziare che tutti i simulatori idraulici classici sono stati progettati e concepiti per la verifica idraulica delle reti e non ai fini gestionali delle stesse. Tali modelli si fondano quindi sull’assunzione di domande fisse ai nodi della rete acquedotto e sono per questo motivo denominati “**demand-driven**”, ovvero le pressioni calcolate ai nodi sono “guidate dalle domande fissate apriori ai nodi stessi”.

³ Todini, E. and Pilati, S. (1988). A gradient method for the solution of looped pipe networks. Computer Applications in Water Supply, John Wiley & Sons, Vol.1, 1-20.

Il progressivo sviluppo urbano ha prodotto nel tempo reti acquedottistiche sempre più grandi, complesse e vetuste implicando l'esigenza di un'ottimizzazione gestionale del sistema rispetto alle perdite idriche, all'affidabilità, alla qualità dell'acqua, all'ottimizzazione energetica, alla riabilitazione, etc.

Todini, nel 2003⁴ ha introdotto la necessità di effettuare una modellizzazione per la simulazione idraulica delle reti acquedotto in grado di valutare l'“*effettiva*” *domanda* che si riesce a fornire alle utenze in condizione di pressioni inferiori alle pressioni minime necessarie per un corretto servizio. Tali simulazioni idrauliche sono oggi denominate analisi “*pressure-driven*”.

In seguito Giustolisi nel 2008⁵ ha sviluppato la rappresentazione della componente delle *perdite idriche volumetriche, in funzione delle pressioni*, a livello di ogni singola tubazione. Tale rappresentazione risulta fondamentale per lo studio delle reti acquedotto in quanto in questo modo viene preservata l'accuratezza del calcolo idraulico senza perdere l'informazione a livello di singole tubazioni, poiché utile in diverse attività gestionali come, per esempio, la pianificazione della riabilitazione del sistema.

Per quanto sopra sinteticamente riportato si può pertanto affermare che i simulatori idraulici classici *demand-driven* (es. EPANET), non sono strumenti idonei alla ***simulazione idraulica ai fini gestionali***.

Nello specifico del tema della gestione delle perdite idriche, l'intento dei ricercatori negli ultimi anni è stato quello di rendere la simulazione idraulica consistente con le necessità di “*supporto alle decisioni gestionali*”, considerandone gli effetti volumetrici, ovvero quelle dovute alle perdite diffuse e non riparabili singolarmente che producono rilevanti volumi di perdita d'acqua nel tempo, seppur singolarmente caratterizzate da piccole portate al limite di “gocciolamenti”. Tali perdite idriche, di natura reale e non amministrativa, possono essere denominate “*volumetriche*” e sono relazionate alle pressioni medie nelle tubazioni come indicatore fisico globale dell'effetto complessivo torricelliano.

⁴ Todini, E. (2003). A more realistic approach to the “extended period simulation” of water distribution networks. *Advances in Water Supply Management*, 173-184

⁵ Giustolisi, O., Savic, D.A., Kapelan, Z. (2008). Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. *J. Hydr. Eng.*, 134 (5)

2.2. MODELLIZZAZIONE IDRAULICA AVANZATA

Il sistema che è stato utilizzato nella presente tesi di dottorato per l'elaborazione del modello e per le diverse attività di supporto alla progettazione è WDNNetXL, frutto della ricerca-tecnico-scientifica italiana ed in particolare del Politecnico di Bari.

Esso si basa sulla *modellizzazione idraulica avanzata* delle reti e consente di poter effettuare l'analisi del funzionamento idraulico realistico del sistema acquedotto configurato per le diverse attività di pianificazione, progettazione e gestione delle reti come, ad esempio:

- ✓ *la valutazione delle perdite volumetriche a livello di singole condotte in funzione dello stato pressorio;*
- ✓ *la valutazione delle condizioni di pressione insufficiente per il corretto servizio all'utenza;*
- ✓ *la simulazione dei sistemi di autoclavi; ecc.*

È da evidenziare che la possibilità di indicare le “*utenze attive*” risulta di particolare rilevanza nel caso di “*reti stagionali*” in cui esistono utenze domestiche di tipo “*non residenziale*” che concorrono al consumo idrico solo durante il periodo estivo ed utenze domestiche “*residenziali*” che variano la domanda in funzione della stagione.

Tali informazioni, quindi, permettono di modificare agevolmente lo scenario dei consumi nel modello e sono di fondamentale importanza per un ottimale gestione delle reti acquedotto.

L'idraulica avanzata della piattaforma WDNNetXL (che consente anche di generare i Digital Twin di sistema per i diversi servizi Digital Water) è anche “elemento” di base per l'utilizzo di una serie di funzioni di ottimizzazione per diversi obiettivi pianificatori necessari a supportare la gestione delle reti acquedotto con riferimento specifico ai tre macro-indicatori ARERA: *perdite idriche (M1); interruzione del servizio (M2) e qualità dell'acqua (M3)*.

La ricerca scientifica finalizzata allo studio specifico del tema della gestione delle perdite idriche si è sviluppata negli ultimi anni con l'obiettivo di rendere la simulazione idraulica consistente con le necessità di supporto alle decisioni gestionali, considerando gli effetti

volumetrici delle perdite diffuse e non riparabili singolarmente che producono rilevanti volumi di perdita d'acqua nel tempo.

Tali *perdite idriche* (di natura reale e non amministrativa) possono essere denominate *volumetriche* e sono relazionate alle pressioni medie nelle tubazioni come indicatore fisico globale dell'effetto complessivo torricelliano. Il modello di simulazione idraulica "avanzato" sviluppato dal Giustolisi nel 2008, coerentemente con l'idraulica e la fisica del sistema, assegna ad ogni tubazione un parametro (β), variabile negli ordini di grandezza 10^{-7} e 10^{-9} , che rappresenta un indicatore globale del deterioramento della condotta e, pertanto, parametro di rilevante utilità decisionale durante qualsiasi azione di gestione delle perdite idriche.

Il parametro β viene assegnato ad ogni tubazione attraverso la calibrazione del modello e determina, contemporaneamente allo stato pressorio, le *perdite idriche volumetriche* in m^3/gg . La simulazione idraulica "avanzata" a supporto della gestione delle reti acquedottistiche è, pertanto, assolutamente coerente con le esigenze espresse dalla necessità di gestione delle perdite idriche di ARERA⁶ con riferimento specifico ai seguenti macro-indicatori:

- **Macroindicatore M1** in quanto la somma delle *perdite idriche volumetriche* stimate in m^3/gg individua quelle globali del singolo acquedotto che, rapportate alla sua lunghezza totale, fornisce il valore medio in $m^3/km/gg$ ovvero il macro-indicatore M1a dell'ARERA calcolato in modo puntuale attraverso il contributo volumetrico delle singole tubazioni.
- **Macroindicatore M2** in quanto i risultati delle simulazioni idrauliche così sviluppate sono di supporto decisionale alle azioni di manutenzione ordinaria e straordinaria (*macro-indicatore M2*), poiché permettono di valutare, sia le utenze che risultano isolate a causa dei lavori che quelle servite in condizioni di pressione inferiore a quelle di servizio, consentendo altresì il supporto al cronoprogramma delle azioni manutentive di riabilitazione di sistema.
- **Macroindicatore M3** in quanto le stesse valutazioni relative alla qualità dell'acqua (*macro-indicatore M3*), sono tecnicamente più probanti se si analizza il sistema considerando le perdite idriche funzione della pressione.

⁶ ARERA (2017) Deliberazione 27 Dicembre 2017 917/2017/R/IDR "Regolazione della Qualità Tecnica del Servizio Idrico Integrato ovvero di ciascuno dei singoli servizi che lo compongono (RQTI).

Come già accennato nel paragrafo precedente la modellizzazione idraulica degli acquedotti si è sviluppata agli inizi del secolo scorso al fine della progettazione e realizzazione di nuove reti di acquedotto e, pertanto, con l'obiettivo specifico di calcolare le pressioni di esercizio ai nodi della rete, per fissate scabrezze dei tubi e domande, intese come richieste idriche statistiche delle varie tipologie di utenza da servire. La verifica era, in definitiva, una valutazione delle pressioni ai nodi rispetto alle pressioni minime per un corretto servizio all'utenza e, in relazione alla protezione antincendio, nella valutazione delle portate e pressioni residue minime per una corretta prestazione idraulica degli idranti.

Nel 1988, Todini con l'avvento del calcolo automatico, inventò il Global Gradient Algorithm (GGA), che pochi anni dopo divenne il "motore idraulico" di EPANET, sviluppato da Rossman dell'agenzia U.S. E.P.A. I software package attuali utilizzano in genere tale "motore idraulico" e, in ogni caso, tutti i simulatori idraulici classici nascono per la verifica idraulica e non a fini gestionali, ovvero consentono il calcolo delle pressioni ai nodi "guidate dalle domande fissate ai nodi" e sono denominati per questo motivo *demand-driven*.

Al fine di fornire una risposta modellistica *a supporto delle esigenze gestionali* rispetto alla qualità dell'acqua, alle perdite idriche, all'affidabilità, all'ottimizzazione energetica, alla riabilitazione, etc., Todini, nel 2003, pone il problema della simulazione idraulica che consenta di calcolare la "effettiva" domanda che la rete acquedotto riesce a fornire alle utenze in condizione di pressioni inferiori alle pressioni minime per un corretto servizio.

Come indicato in letteratura da Giustolisi e Walski (2012)⁷, il modello di Wagner (1988)⁸, riportato nelle Eq. (1) e visualizzato in figura 14, esprime una *domanda effettiva* $d(i,t)$ al nodo i -esimo all'ora t che:

- ✓ per pressioni maggiori di $P^{ser}(i)$ pressione minima per un corretto servizio, è pari alla richiesta idrica statistica dell'utenza $d^{req}(i,t)$;
- ✓ per pressioni più basse dell'altezza dell'ugello $P^{min}(i)$ è nulla;
- ✓ per pressioni intermedie, ovvero in condizioni di pressione insufficiente (*pressure-deficient condition*) risponde alla legge di Torricelli.

⁷ Giustolisi, O. & Walski, T.M. 2012 A Demand Components in Water Distribution Network Analysis. J. Water Resour. Plan. Manage., 138(4), 356 -367.

⁸ Wagner, J.M., Shamir, U. & Marks, D.H. 1988 Water distribution reliability: simulation methods. J. Water Res. Plan. Manage., 114(3), 276-294.

Pertanto, il modello è coerente e consistente con il reale funzionamento idraulico della rete dove gli utenti controllano le portate ai dispositivi di erogazione, statisticamente parlando, fintanto che le pressioni sono sufficienti, per poi attingere dagli stessi la massima portata consentita dalla pressione disponibile conseguente allo stato idraulico della rete (*legge di Torricelli per dispositivi completamente aperti*), ovvero il massimo volume in una data unità di tempo.

$$d(i,t) = \begin{cases} d^{req}(i,t) & P(i,t) \geq P^{ser}(i) \\ \frac{d^{req}(i,t)}{\sqrt{P^{ser}(i) - P^{min}(i)}} \sqrt{P(i,t) - P^{min}(i)} & P^{min}(i) < P(i,t) < P^{ser}(i) \\ 0 & P(i,t) \leq P^{min}(i) \end{cases} \quad (1)$$

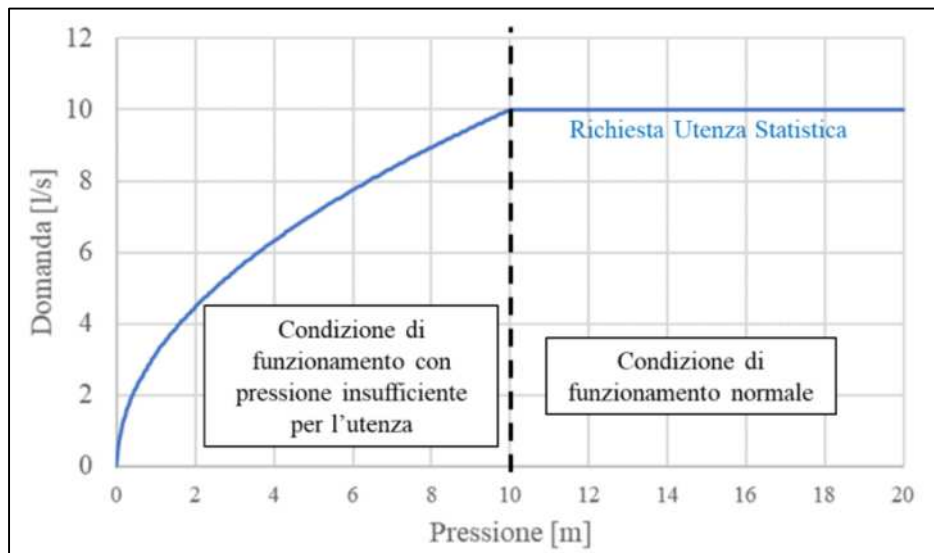


Fig.14 Diagramma pressioni-domanda per le utenze.

2.3. LE PERDITE IDRICHE REALI

Le perdite idriche che si sviluppano lungo le reti di distribuzione, calcolate come differenza tra l'acqua immessa e quella erogata alle singole utenze, rappresentano la quantità di risorsa perduta sia per *rotture* e *perdite di processo* che per problematiche dovute alla *mancata contabilizzazione dei volumi erogati*.

Le percentuali delle suddette perdite, le cui cause possono attribuirsi a fughe occulte, perdite o sfiori dai serbatoi, perdite dovute a malfunzionamento degli organi di rete, ad errori nelle procedure di contabilizzazione ed a derivazioni illegali di acqua, risultano essere molto elevate.

Come già accennato nell'introduzione alla presente tesi in Italia, le regioni meridionali e le isole hanno un tasso medio di perdite idriche pari rispettivamente al 48% ed al 55%, a fronte di una media nazionale stimata al 41%. In Calabria il *Piano di Ambito dell'Autorità Idrica Calabria (ATO Unico Calabria, dic.2020)* ha registrato una situazione ancora peggiore con perdite di rete a livello regionale pari a circa il 60% e con punta massima registrata nella provincia di Reggio Calabria dove vengono stimate perdite di rete pari a circa il 69% (*Bilancio Idrico Regionale*).

Tale percentuale risulta essere molto variabile in relazione sia alla vetustà delle reti esistenti che alla tipologia dei materiali che le costituiscono; entrambe le condizioni assumono maggiore rilevanza se si considera la scarsa manutenzione e le tempistiche non tempestive per effettuare gli interventi di riparazione.

Le perdite idriche volumetriche sono l'indicatore maggiormente rilevante per l'asset management in quanto, da un lato, palesano lo stato di deterioramento delle tubazioni, dall'altro guidano la gestione delle pressioni e le azioni di ricerca delle perdite implementate nello specifico acquedotto.

Lo stato di deterioramento (tronchi ammalorati e vetustà) di una singola condotta o di un'intera rete di acquedotto determina, per pressione unitaria, il valore di *perdite idriche* che in letteratura scientifica sono riportate come:

- perdite di sottofondo (*background leakages*);
- rotture localizzate (*reported burst leakages*);
- rotture non localizzate (*unreported burst leakages*).

Assumendo riparate o in riparazione quelle localizzate, le *perdite idriche di sottofondo* e quelle non ancora localizzate hanno i maggiori effetti volumetrici in funzione delle pressioni.

I *background leakages* si riferiscono a perdite idriche di piccola portata diffuse nel sistema idraulico mentre, nei limiti delle classificazioni tecnico-scientifiche, i *burst leakages* hanno portate maggiori e sono quindi localizzabili.

La generazione e lo sviluppo dei *burst leakages*, come noto in letteratura internazionale, sono in stretta relazione con il livello di *background leakages*, di cui sono la naturale evoluzione per fattori interni e/o esterni al sistema idrico (per esempio condizioni di fatica

dovute alle sollecitazioni di moto vario o al traffico veicolare, stress termico, condizioni di posa in opera non a regola d'arte, ecc.).

I *background leakages* hanno un'influenza globale sull'acquedotto, ma generalmente non condizionano la qualità del servizio in termini di pressioni minime, i *burst leakages* sono eventi che possono avere un'influenza locale o globale sul servizio in funzione della loro posizione nella rete e della loro portata di efflusso rispetto alla capacità idrica del sistema.

La razionalizzazione dell'operazione di "asset management" deve pertanto essere programmata considerando la riduzione delle perdite idriche volumetriche come indicatore rilevante di controllo gestionale, avente anche un conseguente effetto positivo sulla relativa generazione e sviluppo dei *burst leakages*.

La **modellizzazione avanzata del comportamento dei singoli acquedotti** deve rappresentare, per le suddette motivazioni tecnico-scientifiche, lo strumento decisionale e di supporto alle diverse attività di progettazione e pianificazione, ma anche a quelle di campo. Una delle novità dell'idraulica avanzata sviluppata in questo contesto è rappresentata dalla *calibrazione dei modelli idraulici*, da effettuarsi con un paradigma innovativo basato sui bilanci idrici al fine di integrare nelle analisi idrauliche le perdite idriche volumetriche in funzione delle pressioni calcolate a livello di singole tubazioni.

L'attività di calibrazione è un processo iterativo che parte da un modello di progetto che, successivamente, viene perfezionato con le misure di campo e considerando la pianificazione e l'implementazione dei DMA, gli effetti di ricerca delle perdite e della eventuale riabilitazione del sistema (sostituzione dei tronchi vetusti e/o ammalorati).

Come già accennato nel paragrafo precedente Giustolisi nel 2008 ha sviluppato la rappresentazione della componente di domanda delle *perdite volumetriche* in funzione delle pressioni (*leakages*) al fine di poter calcolare il valore da assegnare alle singole tubazioni all'interno del modello idraulico, unitamente all'algoritmo solutivo.

Tale modello, sulla base del modello di perdite idriche già proposto da Germanopoulos (1985), mette in relazione la domanda relativa alle perdite idriche ai nodi i e j di ogni tubazione con un fattore di deterioramento $\beta(k)$ e con la pressione media $P(k)$ della k -esima tubazione.

Nel modello idraulico della rete, le perdite calcolate lungo le tubazioni vengono poi concentrate nei nodi in cui le stesse convergono, in modo da fornire la componente di domanda delle perdite volumetriche in ognuno dei nodi della rete acquedottistica, vedi Eq.(2). Tale componente si somma quindi a quella relativa alla domanda effettiva delle utenze, come riportato in figura 15.

$$d^{leak}(i, P(k, t)) = \begin{cases} \frac{\beta(k)L(k)P(k, t)^\alpha}{2} & P(k, t) \geq 0 \\ 0 & P(k, t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

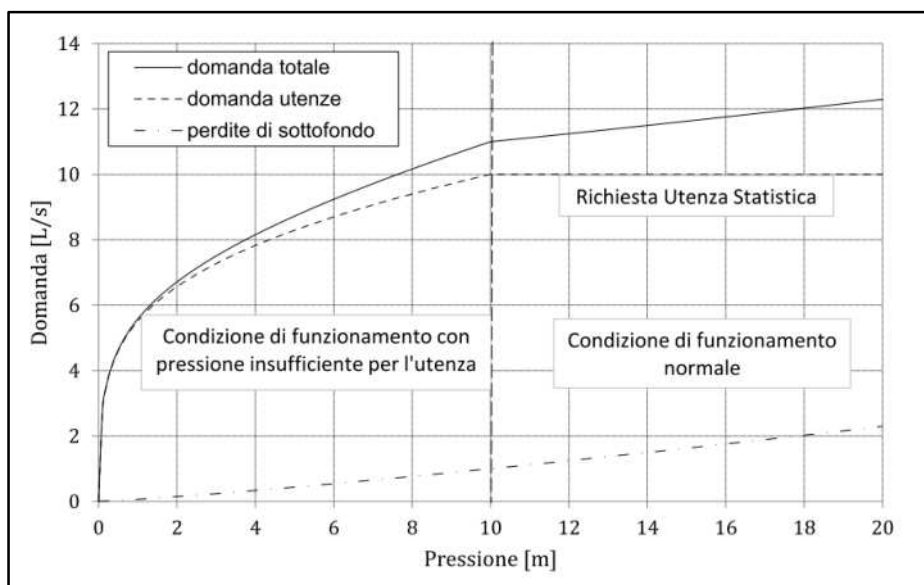


Fig.15. Diagramma pressioni-domanda per utenze e perdite idriche volumetriche concentrate nel nodo del modello.

L'esponente (α) del modello di Germanopoulos è funzione del materiale costituente la tubazione e può essere assunto, in prima approssimazione, unitario.

La figura 16 rappresenta in modo semplificato quanto adottato nella modellazione avanzata. Le perdite volumetriche dalle tubazioni sono assunte uniformemente distribuite e comprendono anche quelle che si generano lungo le connessioni alle utenze, fino ai contatori. Le perdite nelle singole tubazioni, vengono quindi messe in relazione alla pressione media delle stesse come evidenziate nell'Eq. (2).

Durante le simulazioni idrauliche, le portate delle perdite volumetriche sono concentrate nei nodi, senza errori di bilancio di massa ma con un minimo errore sul bilancio energetico generalmente del tutto trascurabile rispetto alle incertezze di sistema. Con la modellazione avanzata si fornisce pertanto la componente di domanda delle perdite volumetriche in

ognuno dei nodi della rete acquedottistica; tale contributo si somma a quello relativo alla domanda effettiva di servizio richiesta dalle utenze, come riportato in figura 16.

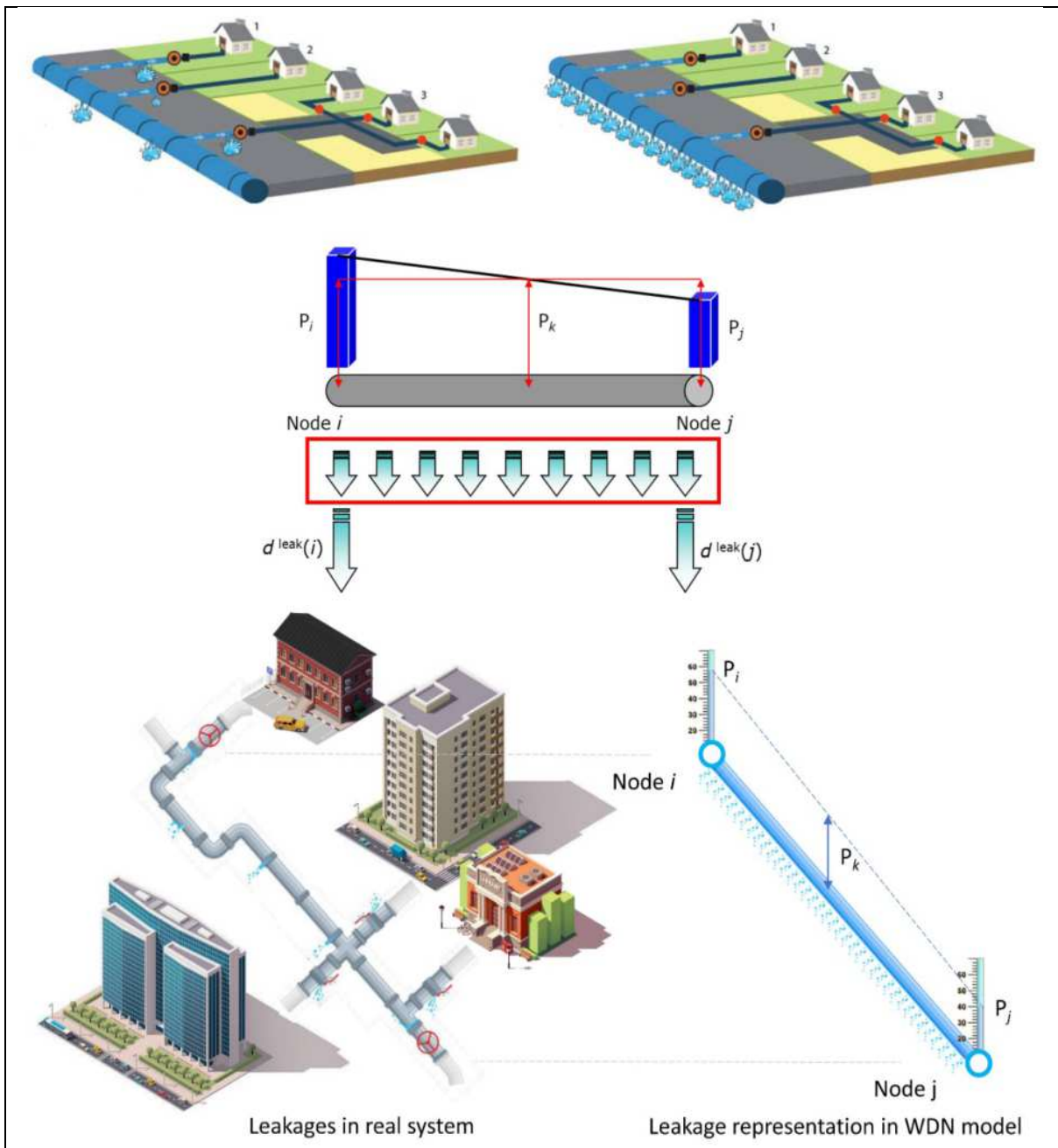


Fig.16. Perdite volumetriche e rappresentazione nel modello idraulico.

Nei simulatori classici (tipo Epanet) le “perdite volumetriche” di rete vengono simulate sostituendole con “idranti” concentrati in tutti i nodi della rete. Tale semplificazione oltre a rendere poco accurato il calcolo idraulico da diversi punti di vista, fa perdere l’informazione sulle perdite volumetriche a livello di singole tubazioni (poiché concentra le perdite a priori nei nodi), ovvero fa perdere l’informazione sul deterioramento dei tronchi e

sulle eventuali connessioni. Tali informazioni risultano essere assolutamente indispensabili per le scelte di sostituzione delle condotte nella pianificazione alla riabilitazione della rete.

I simulatori idraulici classici (es. EPANET) sono inoltre *demand-driven*, mentre le perdite idriche non possono essere fissate a priori poiché funzione delle pressioni medie nei tronchi. Pertanto, è assolutamente indispensabile che la simulazione idraulica delle reti acquedottistiche ai fini gestionali venga sempre effettuata con l'analisi *pressure-driven*, sia per la presenza certa delle perdite idriche, sia per la verifica idraulica dell'effettivo soddisfacimento delle richieste idriche delle utenze.

In definitiva, il modello delle *perdite volumetriche* assegna ad ogni tubazione un parametro di deterioramento (β), che è indicatore globale del deterioramento e, quindi, molto utile se non indispensabile a livello gestionale. Tale fattore β per ogni tubazione di rete idrica determina, contemporaneamente allo stato pressorio, le perdite idriche in m^3/gg . La somma di tali perdite a livello di singola tubazione determina le perdite globali dell'acquedotto che, divise per la lunghezza totale delle condotte del sistema, fornisce il valore medio in $\text{m}^3/\text{km}/\text{gg}$ relazionabile al macro-indicatore M1a dell'ARERA, oltre a fornire il contributo volumetrico delle perdite nelle singole tubazioni.

Con la modellazione avanzata è possibile pertanto stimare il volume di perdite idriche globale giornaliero $V_{\text{WDN}}^{\text{leak}}$ in funzione della pressione media in rete P_{WDN} e della lunghezza totale delle condotte L_{WDN} attraverso la formula⁹:

$$V_{\text{WDN}}^{\text{leak}} = L_{\text{WDN}} \cdot \beta \cdot P_{\text{WDN}}^{\alpha} \quad (3)$$

Da cui risulta determinabile il valore di β e del parametro C_{WDN} :

$$\beta = \frac{V_{\text{WDN}}^{\text{leak}}}{L_{\text{WDN}} \cdot P_{\text{WDN}}^{\alpha}} = \frac{\text{M1a}}{P_{\text{WDN}}^{\alpha}} \quad \text{ovvero} \quad \beta P_{\text{WDN}}^{\alpha} = 1.16 \cdot 10^{-8} \text{M1a} \quad (4)$$

$$C_{\text{WDN}} = \frac{\text{M1a}}{(P_{\text{media}}^{\text{WDN}})^{\alpha \approx 1}}$$

Assumendo $\alpha=1$, per pressioni medie in rete tra 5 e 100 m di colonna d'acqua e M1a tra 15 e 140 $\text{m}^3/\text{km}/\text{gg}$, come già rilevato per le reti italiane da ARERA, il parametro di deterioramento β varia tra gli ordini di grandezza 10^{-9} e 10^{-7} .

Il parametro C_{WDN} assume il significato di “*indicatore gestionale*”, risultando che:

⁹ “Berardi, L., Giustolisi, O. (2021) Calibration of Design Models for Leakage Management of Water Distribution Networks. Water Resources Management 35(8), 2537–2551.”

- ✓ per valori $C_{WDN} > 1$ le perdite idriche sono dovute principalmente al *deterioramento infrastrutturale*;
- ✓ per valori $C_{WDN} < 1$ le perdite sono dovute prevalentemente al *regime pressorio*.

La figure 17 e 18 esemplificano alcuni risultati ottenuti per il caso studio della rete acquedotto della Città di Reggio Calabria dalla simulazione idraulica eseguita in WDNNetXL-WDNNetGIS, con riferimento alla distribuzione dei volumi di perdita lungo le tubazioni con indicazione del macro-indicatore M1a per la rete in esame (figura 17) ed ai volumi relativi a ciascuna componente di domanda (figura 18).

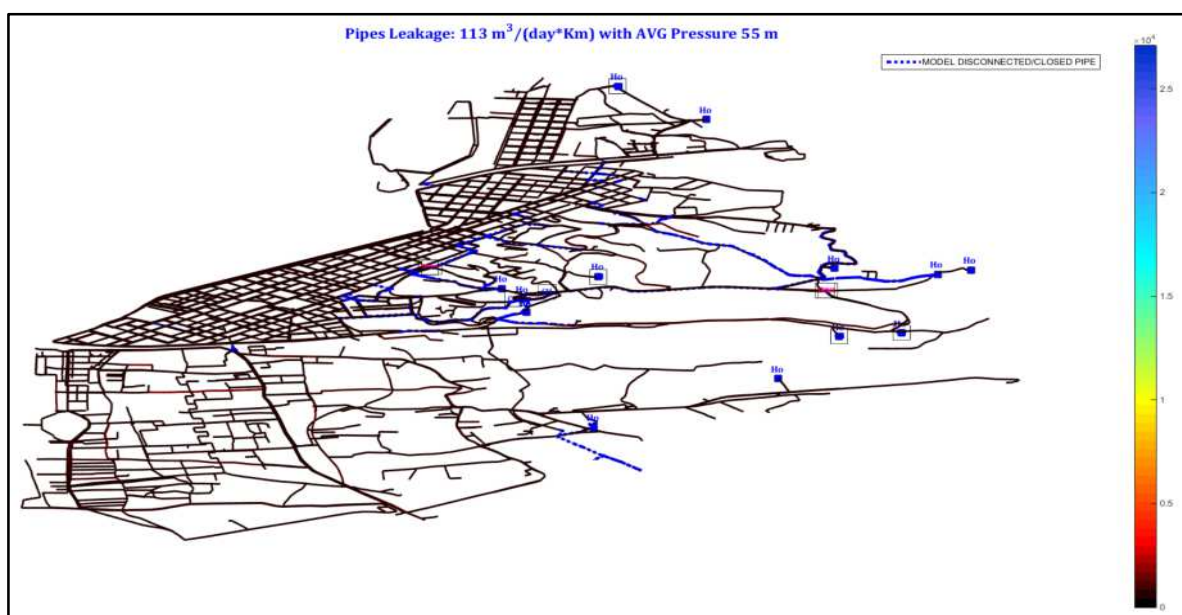


Fig.17. Perdite volumetriche a livello di tubazione – Città di Reggio Calabria

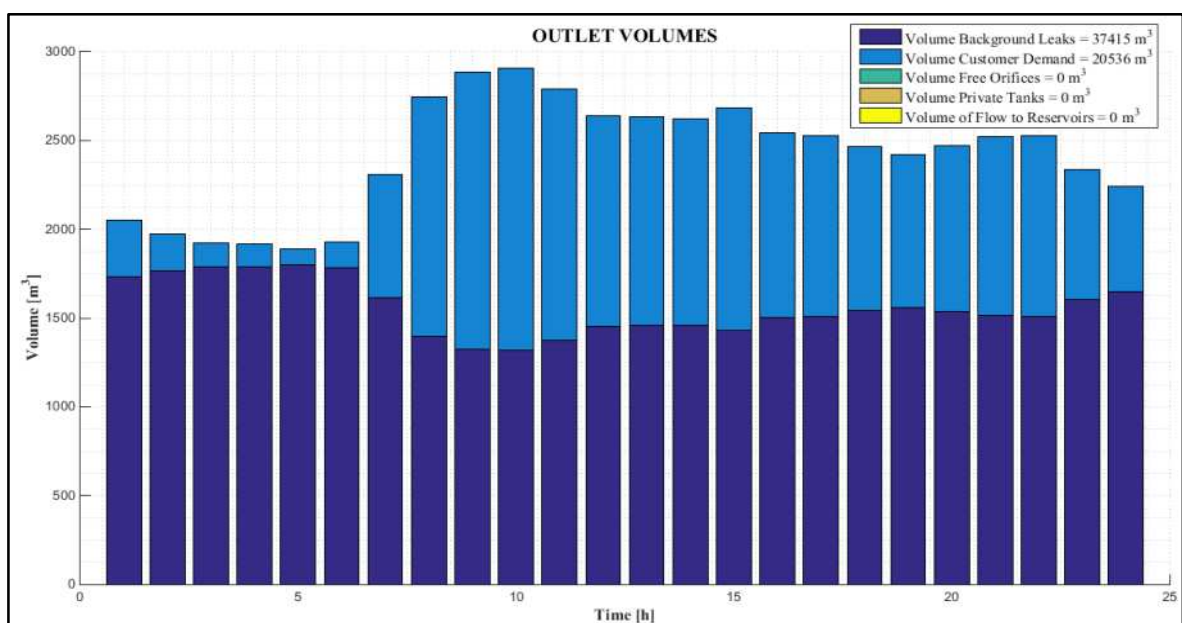


Fig.18. Valori delle perdite volumetriche e delle domande ai consumatori per la rete Città di Reggio Calabria.

2.4. CALIBRAZIONE DEL MODELLO BASATA SUL CONCETTO DI MASSA

Per quanto detto nei precedenti paragrafi, la modellizzazione idraulica avanzata delle reti a supporto della gestione di sistema deve essere necessariamente effettuata con un simulatore *pressure-driven*, come caratteristica idraulico-modellistica, e studiare non solo le perdite di energia nelle tubazioni attraverso le scabrezze, ma anche come queste siano correlate alle perdite volumetriche in rete in funzione delle pressioni di sistema.

La calibrazione deve essere pertanto estesa e prioritariamente basata su concetti di massa.

Nello sviluppo della presente tesi, con riferimento al caso studio della rete di distribuzione della *Città di Reggio Calabria*, la calibrazione del modello idraulico ha consentito di separare la componente “*statistica*” della domanda dalla portata immessa complessiva, ovvero quella legata ai “*consumi di utenza*” da quella “*deterministica*” delle “*perdite idriche volumetriche*”, funzione delle pressioni medie nelle tubazioni.

A tal fine, dopo aver caratterizzato le tipologie di utenze, almeno nei loro valori medi di richiesta idrica in un ciclo operativo giornaliero o settimanale, devono essere misurate le portate immesse in rete dalle sorgenti idriche, dai serbatoi e dai sistemi di pompaggio.

La calibrazione dei modelli idraulici è pertanto fortemente influenzata dai “*pattern di domanda*” che vengono determinati nei modelli steady-state (stazionari) di moto uniforme tecnico, come integrazione alla scala temporale stazionaria degli impulsi alla scala reale di utilizzo dell’acqua. Viene pertanto assegnato lo stesso *pattern di domanda* a gruppi omogenei di *tipologia di utenza*, alla scala di acquedotto o di sottoreti o, anche, a quella minore di *District Metering Areas* (DMAs) laddove siano attivate misure di bilancio idrico nello specifico sistema acquedottistico.

Dal punto di vista statistico gli impulsi, alla scala reale di utilizzo della risorsa idrica, seguono la distribuzione di Poisson; tali impulsi, integrati nel tempo e nello spazio considerando gruppi omogenei di tipologia di utenza, definiscono la statistica Gaussiana della domanda alla scala del modello. I fattori dei *pattern di domanda*, quindi, moltiplicati per la domanda di base (*media giornaliera*), forniscono i valori medi “stazionari” alla scala definita nel modello che, usualmente, va da qualche minuto ad un’ora.

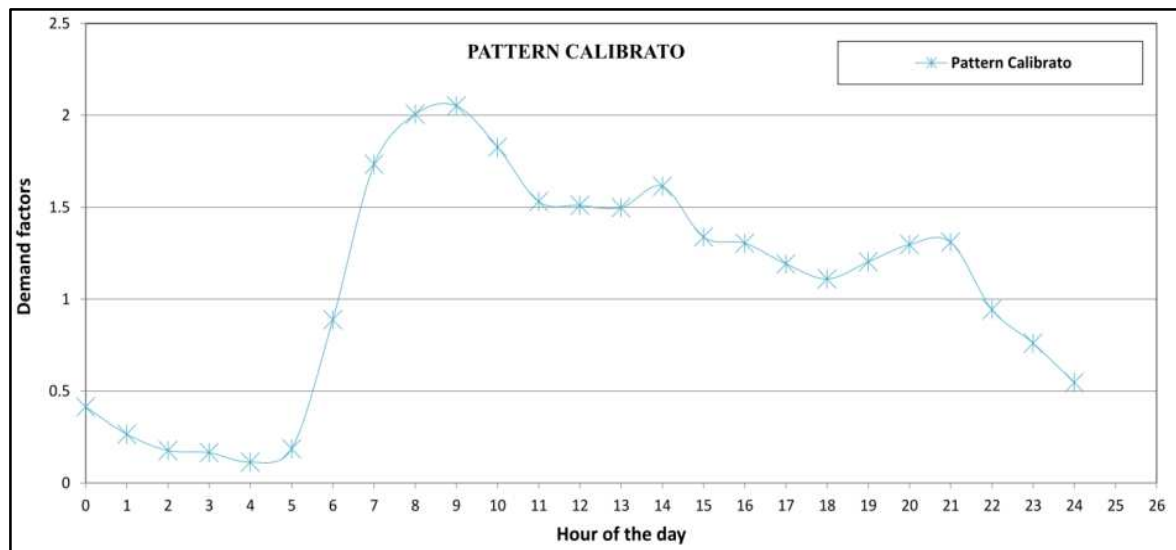


Fig.19. Pattern calibrato sulle 24 ore

La variabilità giornaliera dei *pattern di domanda* si ripercuote sui valori di pressione media alla *scala del modello*. La misura della pressione, inoltre, non essendo una variabile di stato rappresentativa dei fenomeni di massa che caratterizzano l'acquedotto, è fortemente variabile alla scala dei secondi in quanto influenzata dalla richiesta idrica ad impulsi e dal "naturale" moto vario sempre presente nei sistemi acquedottistici.

La *calibrazione di un modello stazionario* deve considerare pertanto quanto sopra riportato al fine di essere utilizzata a "*livello gestionale*" per l'interpretazione corretta della fenomenologia del reale funzionamento dell'acquedotto. Una calibrazione effettuata in modo non corretto comporta come risultato l'adattamento del modello alla *scala temporale dei secondi* che, da un lato risulta essere incoerente con le ipotesi stesse di stazionarietà delle equazioni alla base del modello, dall'altro fornisce una "fotografia" di un particolare funzionamento idraulico del sistema, grossolana ipotesi di base in qualsiasi attività di razionalizzazione idraulica di un acquedotto.

La tradizione idraulica concentra l'attenzione sulla calibrazione delle "*resistenze idrauliche*" delle tubazioni attraverso la *misura di pressioni* ed adottando "*pattern di domanda*" spesso determinati a monte del calcolo e, pertanto, difficilmente coerenti con le misure stesse. La calibrazione delle resistenze idrauliche ottenuta utilizzando tracciati di pressione alla scala del secondo, inoltre, fa immaginare che la *pressione* possa essere utilizzata come variabile di controllo in "tempo reale" del sistema, non tenendo debitamente

in conto la celerità di propagazione del moto vario, le ipotesi modellistiche, i fenomeni di massa e la stessa inutilità tecnica.

Il controllo di sistema in tempo reale è infatti erroneamente “rappresentato” quando si adottano parallelismi con i “*sistemi elettrici*” il cui controllo è favorito dalla velocità di trasmissione della informazione (velocità della luce).

Tanto premesso, durante la “calibrazione classica” del sistema idraulico acquedotto vengono quindi trascurati almeno 2 due elementi di fondamentale importanza a “*livello gestionale*”:

1. Le diverse modalità di funzionamento dell’acquedotto nel suo ciclo giornaliero, che è determinato da fattori socioeconomici.
2. Le perdite volumetriche a livello di singola tubazione e diramazioni che sono funzione della pressione di sistema a sua volta determinata dalla variabilità giornaliera e stocastica di richiesta idrica.

Appare evidente che la variabilità giornaliera dell’impresso in rete, che si traduce nei *patterns di domanda* del sistema, riveste un ruolo determinante nella calibrazione idraulica del modello.

Pertanto, la calibrazione di un “*modello robusto*”, a supporto delle attività gestionali delle reti acquedotto e di pianificazione della riabilitazione delle condotte, deve partire da indagini sulle modalità di funzionamento dell’acquedotto nel ciclo socioeconomico giornaliero, ovvero dall’approfondimento dei “*pattern giornalieri*” caratteristici all’interno di una annualità, che contenga al suo interno anche tutte le tipologie di festività e stagionalità.

Le perdite volumetriche e la domanda, infatti, variano nei cicli operativi scelti; la calibrazione ha la finalità pertanto di definire, da un lato il modello delle perdite volumetriche e, dall’altro, i *pattern di domanda* caratteristici delle differenti tipologie di giorni (festivo, feriale, invernale, estivo, Natale, Pasqua, etc.).

Questo può avvenire attraverso le misure di impresso nella rete acquedottistica e, laddove siano attivati DMA, attraverso le misure di portata ai bordi del sistema; avendo a disposizione tali dati la calibrazione consente anche la definizione dei *pattern di domanda* e

del modello di perdite volumetriche in sottopozioni di sistema a vantaggio, ad esempio, delle scelte di riabilitazione.

In questo quadro la calibrazione delle resistenze idrauliche e l'uso della pressione media alla scala temporale rivestono un aspetto di complementarità nel processo. Infatti, le pressioni nei nodi all'estremo delle poche condotte che fungono da elementi di trasporto dell'acqua nel sistema (condotte di avvicinamento dai serbatoi/pozzi alla rete di distribuzione) sono utili a specificarne in modo più accurato le relative resistenze idrauliche e, soprattutto, vengono utilizzate come verifica dello stato idraulico del sistema.

Le pressioni interne all'insieme di condotte in una determinata zona della rete, invece, sono utili a determinare i "livelli" generali di pressione delle aree specifiche essendo il loro andamento determinato dalla stocastica spaziale della domanda. Tali valori di pressione interna possono essere inoltre anche un utile indicatore di anomalie nel sistema come, ad esempio, indice dell'esistenza di valvole parzialmente o totalmente chiuse ovvero di perdite volumetriche rilevanti anche se non individuate.

A tal proposito si osserva che ogni ipotesi effettuata a priori su *pattern* di alcune tipologie di utenza (es. commerciale, industriale, pubblico), laddove non supportate da misure di dettaglio per tali utenze, rappresentano un elemento di distorsione nell'identificazione del "*pattern di domanda dominante*" osservabile dalle misure di portata in ingresso alla porzione di sistema in esame. Pertanto, l'identificazione di un pattern, ad esempio industriale, sarà possibile esclusivamente per quelle porzioni di rete in cui esso è dominante (es. zone industriali) e per le quali sia disponibile la relativa misurazione della portata in ingresso.

Con riferimento alle attività oggetto della presente tesi di dottorato l'obiettivo, quindi, è stato quello di calibrare per stati diversi, raccogliendo abbastanza informazioni sul comportamento della rete al fine di ottenere un modello robusto e predisposto a tutte le possibilità di funzionamento cui la rete potrebbe essere soggetta.

La figura 20 mostra in modo semplice le diverse componenti del pattern di misura delle portate in ingresso ottenuto dalla separazione delle due componenti principali che determinano il bilancio di massa nel sistema acquedottistico, a partire dai pattern di misura delle portate in ingresso al sistema.

La separazione delle due diverse componenti del *pattern di domanda* non può fare a meno della valutazione delle pressioni medie in rete e, quindi, della calibrazione delle scabrezze, ovvero delle resistenze idrauliche delle tubazioni. Tale calibrazione viene così effettuata al fine di ottenere *valori calibrati* di β il più realistici ed accurati possibile rispetto all'informazione a disposizione.

La *calibrazione per fini gestionali* è pertanto operativamente parte di un processo dinamico che parte assumendo una distribuzione iniziale dei valori di β . Tale distribuzione può derivare dalla elaborazione del dato di perdita riportato in modelli esistenti in base a monitoraggio pregresso del sistema, ovvero in funzione di caratteristiche infrastrutturali specifiche della rete come, per esempio, i diametri oppure l'età delle tubazioni ed il numero di connessioni alle singole condotte.

Analisi effettuate nel tempo su molteplici reti acquedottistiche hanno dimostrato che la variazione del parametro β non altera le pressioni in rete ma, piuttosto, fa variare la distribuzione delle perdite tra i diversi tronchi.

Le misure di pressione effettuate in rete, pertanto, per quanto utili alla verifica dello stato pressorio restituito dal modello idraulico in diverse zone del sistema, sono necessarie in misura minore rispetto alla calibrazione dei “modelli classici”, in quanto non rappresentative dei fenomeni di massa che si sviluppano all'interno della rete.

Quanto detto, peraltro, rende la calibrazione basata su “*concetti di massa*” maggiormente robusta rispetto al rilievo della pressione in rete che, come noto, varia con la domanda e può risentire pertanto di effetti di disturbo locali.

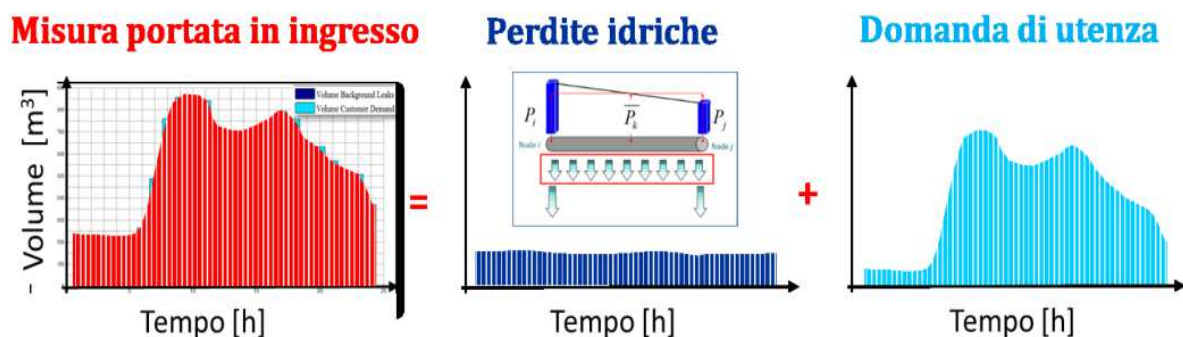


Fig.20. Componenti del pattern di misura della portata in ingresso (perdite volumetriche e domanda di utenze).

2.5. ANALISI DEL DOMINIO TOPOLOGICO DELLA RETE

L'analisi del “*dominio topologico*” delle reti prevede la valutazione di metriche di centralità derivate dalla *complex network theory* (CNT) ed appositamente riformulate per le infrastrutture acquedottistiche. Attraverso l'utilizzo della CNT è possibile concettualizzare le reti infrastrutturali in grafi, composti da nodi e tronchi, e studiare il comportamento dei sistemi dal punto di vista topologico, preliminarmente all'utilizzo della modellazione idraulica fisicamente basata.

Le metriche sviluppate con la CNT, in particolare quelle di centralità, permettono di *classificare il ruolo preponderante che alcuni tronchi e nodi assumono all'interno della struttura a rete* rispetto alla loro posizione, al loro grado di connessione con gli elementi più rilevanti del sistema ed al trasferimento dell'informazione.

Le stesse metriche, riformulate per considerare le peculiarità geometriche ed idrauliche dell'infrastruttura acquedottistica, permettono di identificare gli elementi prevalenti della rete in cui *l'informazione che si propaga è rappresentata dallo spostamento di volumi d'acqua che si muovono lungo i percorsi minimi (shortest paths)* del sistema.

Gli elementi del sistema possono pertanto influenzare il comportamento complessivo della rete sia per la loro posizione topologica che per la loro rilevanza intrinseca (ad esempio legata ai consumi di utenza).

La metrica utilizzata per l'analisi topologica della rete idrica, riformulata per tenere conto delle peculiarità dell'infrastruttura idraulica in oggetto, è la *Tailored Edge Betweenness* che misura l'importanza di ciascun tronco dell'acquedotto senza necessità di implementare l'idraulica^{10,11}.

La figura 21 esemplifica il risultato dell'analisi di dominio ottenuto per il caso studio della rete acquedotto della Città di Reggio Calabria.

¹⁰ Giustolisi O., Ridolfi L. & Simone A., 2019. Tailoring Centrality Metrics for Water Distribution Networks. *Water Resources research*, 55(3), pp. 2348–2369.

¹¹ Giustolisi O., Ridolfi L. & Simone A., 2020. Embedding the intrinsic relevance of vertices in network analysis: the case of centrality metrics. *Nature Scientific Report*, 10, pp. 3297.

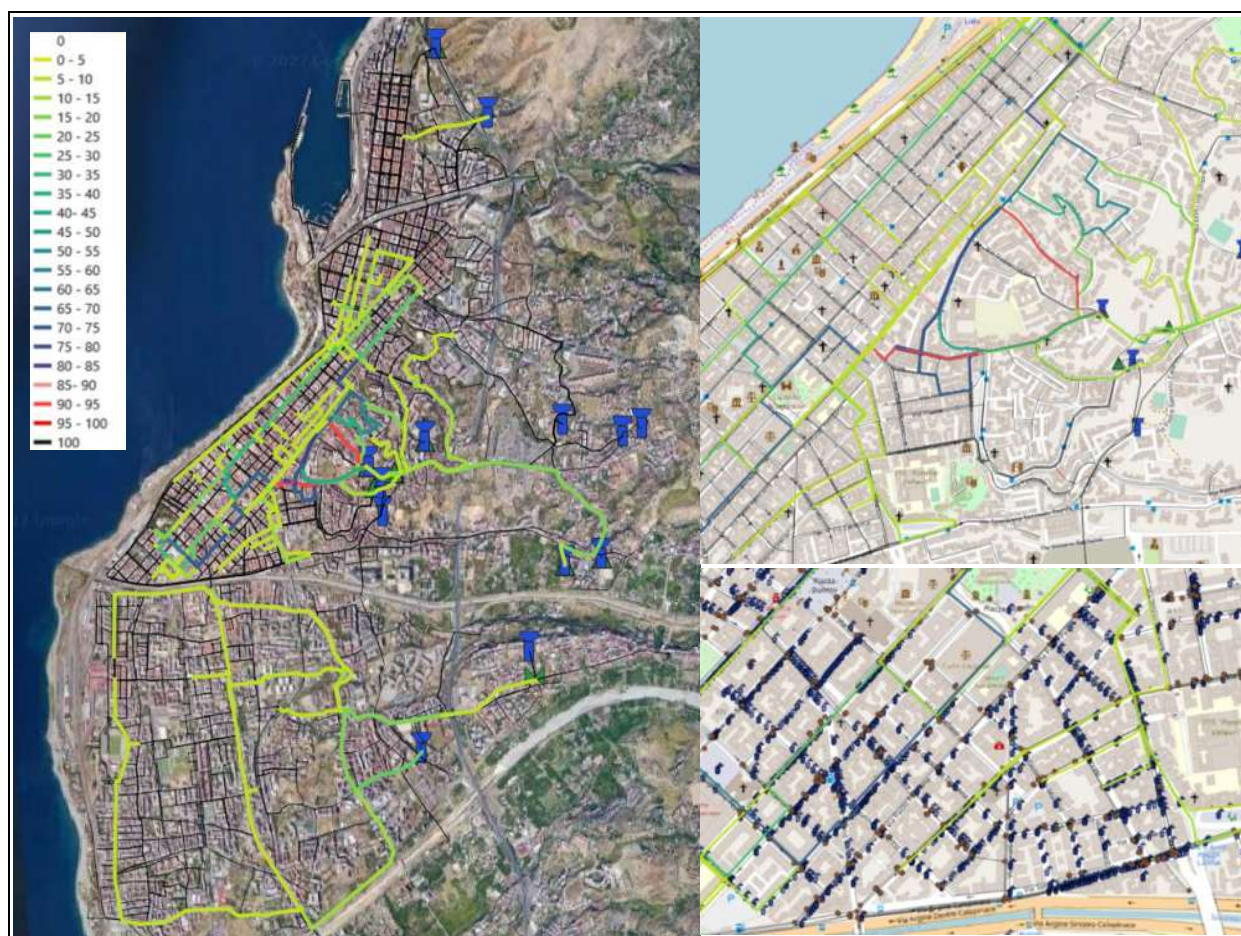


Fig.21. “Tailored Edge Betweenness” per il sistema – Città di Reggio Calabria

Tale informazione è utile per diverse finalità, tra cui l’identificazione delle poche condotte che fungono da elementi di trasporto dell’acqua nel sistema di cui è opportuno, ad esempio, calibrare le resistenze idrauliche in quanto condizionano il funzionamento idraulico dell’intero sistema.

2.6. DISTRETTUALIZZAZIONE: DISTRICT METERED AREAS (DMA) E PRESSURE MANAGEMENT ZONES

La distrettualizzazione è una operazione di divisione della struttura a rete di un acquedotto in “*distretti*” al fine di migliorarne la gestione, intesa classicamente (DMA), rispetto al monitoraggio dei bilanci idrici o di massa.

Normalmente, la progettazione della distrettualizzazione è operazione *trial-and-error* con la quale, in modo empirico, il tecnico divide la rete immaginando la presenza di valvole di sezionamento chiuse e misure di portata che configurino “*distretti di monitoraggio*”

caratterizzati da un parametro omogeneo, come l'altimetria, il materiale, il diametro e la vetustà delle condotte.

La progettazione tiene conto anche di vincoli che devono essere imposti dal tecnico quali ad esempio:

- *Vulnerabilità del sistema, in particolar modo in relazione alle condotte principali di trasferimento dell'acqua;*
- *Pressioni di esercizio in relazione all'altezza degli edifici;*
- *Tipologie di utenze;*
- *Esigenze antincendio.*

La “*distrettualizzazione classica*”, quindi, rinuncia sia ad un processo razionale di progettazione ottimizzata, efficiente oltre che efficace, sia alla replicabilità delle scelte progettuali. Inoltre, la progettazione classica dei DMA non valuta le opportunità di controllo globale delle pressioni in rete, attraverso la riconfigurazione dei flussi idrici conseguente alla chiusura di valvole di sezionamento. Tale ultima condizione consente di infatti di ridurre sia le pressioni, quindi le sollecitazioni sull'infrastruttura, sia la probabilità di rottura dei componenti del sistema (*burst leakages*), sia le perdite volumetriche di sottofondo.

Con il fine di adottare una procedura progettuale razionale, efficiente ed efficace, guidata anche dalle esigenze di riduzione delle perdite volumetriche, nella presente si utilizzerà una procedura di distrettualizzazione avanzata, che verrà sviluppata in due diverse fasi¹²:

- *Segmentazione della struttura topologica a rete dell'acquedotto;*
- *Distrettualizzazione idraulica.*

La metodologia a due fasi consente infatti la possibilità di creare un processo razionale ed ottimizzato di progettazione rispetto a qualsiasi vincolo e/o obiettivo che il tecnico voglia imporre, considerando la specificità dell'acquedotto, pur rimanendo all'interno di una strategia che diviene esperienza replicabile nei diversi sistemi idrici del Gestore.

¹² Laucelli, D., Simone, A., Berardi, L., Giustolisi, O. (2017). Optimal Design of DMAs for Leakages Reduction. J. Water Res. Plan. Manage. 143(6).

La motivazione delle due diverse fasi risiede nel funzionamento idraulico di un acquedotto che è condizionato in modo dominante dalla connettività della rete (*topologia*) che rappresenta il dominio del fenomeno idraulico.

La *segmentazione* rappresenta pertanto un processo ottimizzato di “divisione virtuale” della topologia della rete con tagli concettuali da imporre vicino ai nodi (pozzetti) al fine di ottenere segmenti o moduli che rispettino obiettivi e vincoli tecnici.

La *distrettualizzazione idraulica* rappresenta invece un processo di ottimizzazione relativo alla decisione tecnico/economica di installare una valvola di sezionamento o un misuratore di portata nei *tagli concettuali* (pozzetti) al fine di riconfigurare i flussi idrici interni alla rete riducendo le perdite volumetriche come effetto della riduzione delle pressioni e con il vincolo di rispettare, con adeguati margini di sicurezza, le pressioni di esercizio richieste per le diverse utenze durante il ciclo operativo di sistema.

È importante sottolineare che la *segmentazione* utilizza *l'indice di modularità* quale metrica di efficienza della divisione e non equivale all'apertura “ad albero” della rete con le relative conseguenze sull'affidabilità. La *segmentazione* rappresenta una divisione efficiente in segmenti o moduli con il minor numero di tagli possibili. Il calcolo idraulico che consente la verifica della riconfigurazione dei flussi idrici, semplice da riportare, richiede inoltre necessariamente una modellazione avanzata “*pressure driven*”. Una modellazione *demand-driven*, infatti, assumerebbe la componente di perdite volumetriche imposta come *pattern fisso*, in analogia alle richieste idriche statistiche dell'utenza; tale semplificazione non può restituire pertanto né valutazioni accurate circa la riduzione delle perdite, né implementabili con un minimo grado di confidenza tecnica, in quanto lontane dal reale comportamento idraulico di sistema. Solo l'approccio *pressure-driven* consente il calcolo accurato e realistico dovuto agli effetti spaziali di riduzione delle perdite volumetriche, a livello di singoli tronchi, che trovano equilibrio nel nuovo stato pressorio anche in funzione della riduzione dei flussi idrici in rete.

2.6.1. SEGMENTAZIONE

La divisione virtuale della topologia della rete in “*segmenti*” attraverso l'inserimento in rete di tagli concettuali da attuare in prossimità dei nodi viene ottimizzata al fine di essere efficiente rispetto a diversi elementi del sistema (*lunghezza simile dei segmenti, altezza geodetica simile interna ai segmenti, etc.*). Questo avviene attraverso la massimizzazione di

uno specifico indice di modularità (*metrica di efficienza della divisione mutuata dalla Teoria delle Reti Complesse come da letteratura tecnico-scientifica*) e la contemporanea minimizzazione del numero di tagli concettuali in rete. I segmenti diventano pertanto distretti veri e propri nel momento in cui all'interno dei tagli concettuali (pozzetti) vengono installati i dispositivi (*valvole di sezionamento, misuratori di portata e valvole di riduzione/controllo delle pressioni*), oggetto della successiva fase di *distrettualizzazione idraulica*.

La procedura è più efficiente ed efficace di qualsiasi altra procedura empirica per ogni possibile scelta di obiettivi o vincoli. Essa, inoltre, si presta a considerare la eventuale distrettualizzazione esistente nelle reti acquedotto oggetto di studio e ne permette la razionalizzazione e l'affinamento. Questo è possibile, da un lato, attraverso l'utilizzo dell'*indice di modularità modificato*¹³ per le *reti idrauliche*¹⁴, dall'altro, attraverso l'utilizzo di una procedura di ottimizzazione per risolvere un problema combinatorio (*ogni tubazione ha 2 potenziali posizioni per il taglio concettuale*), non affrontabile in modo efficiente con il solo giudizio esperto dell'ingegnere già per la risoluzione di reti idriche caratterizzate da poche migliaia di tronchi, in particolar modo se trattasi di reti molto magliate e topologicamente complesse. La segmentazione produce pertanto un fronte paretiano di soluzioni ottime che rappresentano configurazioni di divisione della rete in segmenti al variare del loro numero e del relativo numero di tagli concettuali. Il risultato è un sistema di supporto alla decisione gestionale, rappresentata da una serie di configurazioni di divisione della rete che possono essere scelte in qualsiasi fase progettuale come base del monitoraggio del sistema. Ogni configurazione è infatti contenuta (*annidata*) in tutte quelle con maggior numero di segmenti; tale condizione consente pertanto la necessaria flessibilità decisionale poiché la scelta iniziale, caratterizzata da un numero minore di segmenti, può essere in qualsiasi momento ulteriormente affinata aumentandone il numero.

La flessibilità così ottenuta la segmentazione del sistema acquedotto è rilevante per gli aspetti gestionali del Gestore. La successiva fase di *distrettualizzazione idraulica* utilizza infatti la configurazione con il massimo numero di tagli al fine di avere la massima efficacia ed efficienza nella riconfigurazione dei flussi idrici dell'acquedotto.

¹³ Giustolisi, O., Ridolfi, L. (2014). A new modularity-based approach to segmentation of water distribution network. *J. Hydr., Eng.*, 140(10).

¹⁴ Giustolisi, O., Ridolfi, L. (2014). A novel infrastructure modularity index for the segmentation of water distribution networks. *Water Resource Research*, 50(10).

La figura 22 riporta l'esempio di configurazione di "segmentazione annidata" per la rete di Reggio Calabria corrispondente a n.33 distretti virtuali DMA.

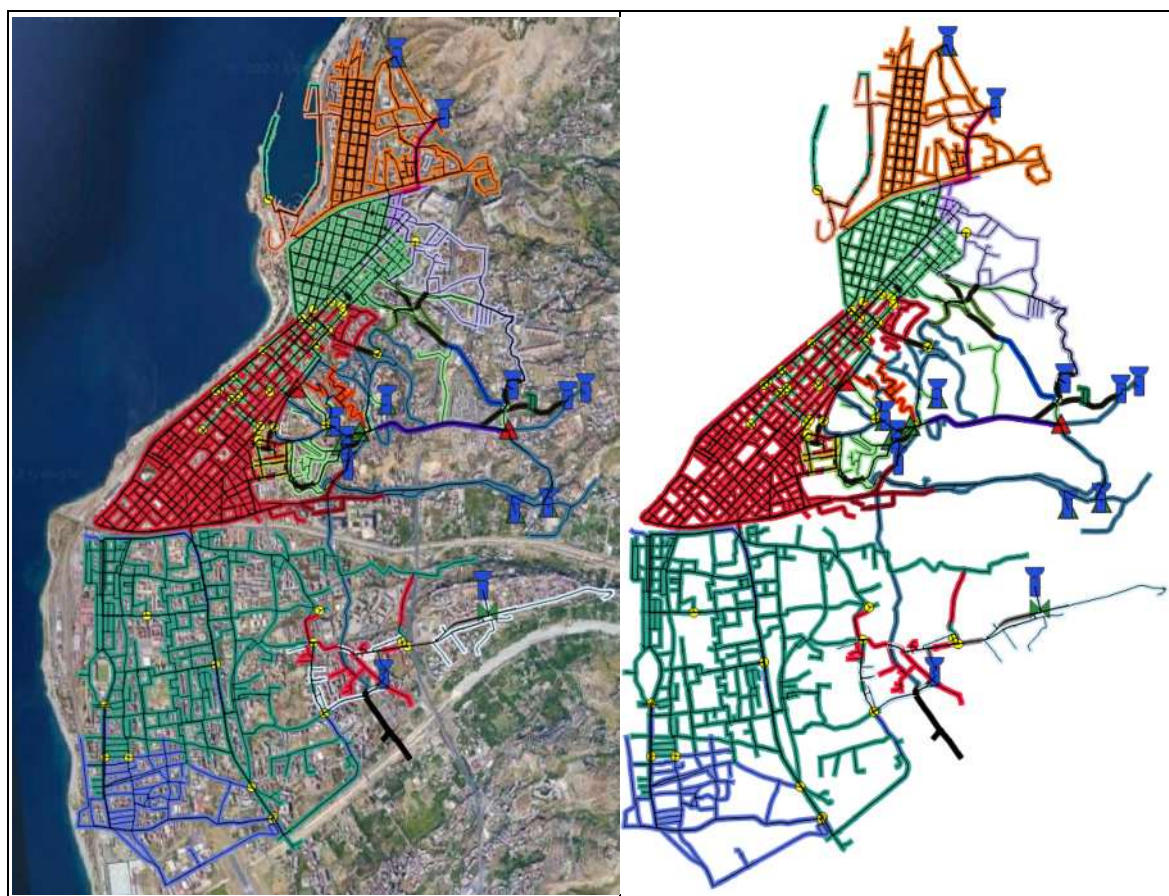


Fig.22. Configurazioni di segmentazione per la rete di Reggio Calabria - 32 distretti DMA e 100 tagli concettuali

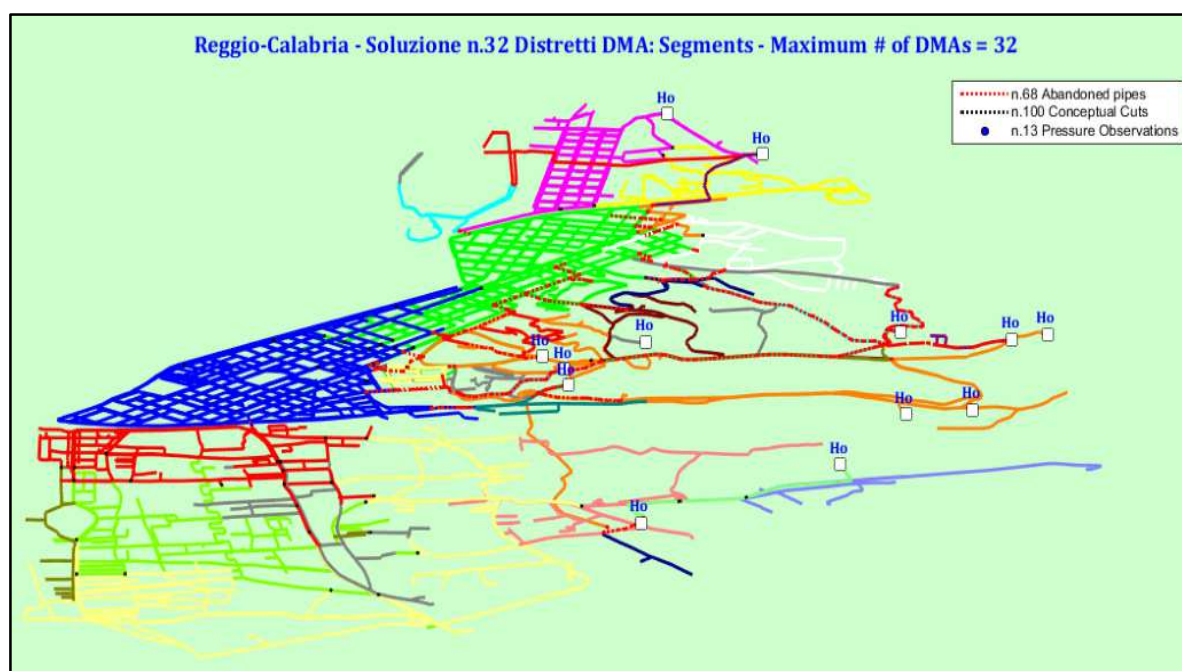


Fig.23. Configurazioni di segmentazione per la rete di Reggio Calabria corrispondente n.32 distretti DMA.

Dopo aver installato le valvole di sezionamento con l'obiettivo di riconfigurazione dei flussi in rete, si potrà pertanto scegliere il numero di distretti da monitorare in modo ottimo (costi/benefici), lasciando la possibilità al Gestore, in qualsiasi momento, di poter "attivare" ulteriori "distretti annidati" attraverso l'integrazione del numero di misuratori di portata in postazioni già predisposte in modo "topologicamente" efficiente durante la fase di distrettualizzazione idraulica e la relativa installazione delle valvole di isolamento.

2.6.2. DISTRETTUALIZZAZIONE IDRAULICA

La distrettualizzazione idraulica è finalizzata alla "*divisione reale*" della rete in distretti veri e propri attraverso l'installazione dei dispositivi (*valvole di sezionamento e misuratori di portata*) all'interno dei tagli concettuali (pozzetti) determinati nella precedente fase di segmentazione.

Essa è concepita come un processo di ottimizzazione idraulica vincolato mediante elementi scelti dall'utente (*per esempio massimo diametro o portata idrica della condotta dove è possibile ipotizzare valvole di sezionamento*) attraverso l'utilizzo della modellizzazione idraulica *pressure-driven*; tale processo viene ottenuto massimizzando la riduzione delle perdite volumetriche e, contemporaneamente, minimizzando il numero di misure di portata, imponendo la condizione necessaria che in qualsiasi punto del sistema idraulico acquedotto la pressione sia sufficiente a garantire un corretto servizio alla specifica utenza.

La procedura fornisce pertanto diverse configurazioni dei distretti; ogni configurazione soddisfa i vincoli ingegneristici imposti come dati di input e non incide sul corretto servizio fornito alle diverse utenze durante l'intero ciclo operativo dell'acquedotto.

Tale condizione viene ottenuta ridisegnando in modo razionale ed ingegneristicamente vincolato i "flussi idrici" con l'obiettivo di ridurre le pressioni e, di conseguenza, minimizzare le perdite volumetriche nelle aree a pressione medio-elevate e nel rispetto delle reali richieste delle utenze per un corretto servizio.

La procedura include la possibilità di considerare nei tagli concettuali (pozzetti) la presenza di valvole di riduzione di pressione i cui valori di *set point* possono essere ottimizzati contemporaneamente alla definizione della fase di distrettualizzazione idraulica.

La procedura adottata esclude la possibilità di disconnessione di qualsiasi parte del sistema idraulico nell'ipotesi di inserimento di "valvole di sezionamento" nei tagli concettuali;

questo è possibile grazie all'ottimale simulazione idraulica del sistema acquedotto attraverso analisi automatiche di connettività e riconfigurazione topologica durante il calcolo idraulico.

Lo studio di decine di reti reali provenienti da varie realtà tecniche e diverse condizioni plano-altimetriche dimostra che è possibile ridurre da un minimo del 15% fino ad un massimo stimabile del 50%-60% le perdite volumetriche esclusivamente riconfigurando i flussi idrici nelle reti dove la capacità idraulica risulta superiore in modo consistente alle reali esigenze di servizio.

Dal punto di vista tecnico-economico rispetto a qualsiasi altra procedura empirica, la procedura di distrettualizzazione idraulica proposta consente di ottenere, a parità di condizioni, obiettivi e vincoli, una distrettualizzazione più efficace (*rispetto dei vincoli tecnici dati*) ed efficiente (*minor costo di installazione a parità di obiettivi, come ad esempio, numero di distretti e riduzione delle perdite volumetriche*).

La razionalità della metodologia, peraltro, diviene esperienza replicabile per il Gestore dell'acquedotto, circostanza rilevante per l'*asset management* in una visione ottimale di scala gestionale ed aziendale.

È inoltre da evidenziare il fatto che la progettazione della distrettualizzazione secondo lo schema proposto razionale e controllato in tutte le sue fasi non ha alcun effetto di riduzione della qualità dell'acqua né può determinare alcuna riduzione dell'affidabilità di sistema dal punto di vista meccanico ed idraulico.

2.7. MONITORAGGIO DI PORTATE E PRESSIONI

Il monitoraggio delle pressioni e delle portate delle reti acquedotto è un problema molto complesso dal punto di vista tecnico e scientifico.

La base concettuale è determinata dalla necessità di misurare le pressioni nei nodi del sistema e le portate nei tronchi di rete al fine di poter per "osservare" i cambiamenti del comportamento del sistema idraulico durante il ciclo operativo, al variare pertanto delle condizioni al contorno del sistema che sono funzione delle richieste idriche delle utenze, del funzionamento dei dispositivi idraulici, delle resistenze idrauliche delle condotte, dei livelli dei serbatoi, dell'evoluzione nel tempo dei *burst leakages*, etc.

Si tratta, pertanto, di scegliere la localizzazione dei dispositivi di misura di portata e di pressione in modo tale da rendere il sistema acquedotto osservabile rispetto al monitoraggio scelto. L'osservabilità è una condizione significativamente determinata dalla struttura topologica del sistema e del suo reale funzionamento idraulico. È da evidenziare che l'assoluta osservabilità del sistema non può essere ottenuta se non attraverso l'utilizzo di un numero rilevante di misure, tenendo comunque in debita considerazione l'incertezza delle misure stesse e delle ipotesi che stanno alla base del modello idraulico.

La “distrettualizzazione classica”, per esempio, configura distretti DMA che risolvono il problema della osservabilità in modo “zonato” offrendo pertanto la possibilità di monitorare bilanci idrici o di massa interni ai distretti stessi, ma rinunciando in parte all'osservabilità puntuale di come tali bilanci di massa si determinano rispetto, ad esempio, ai flussi idrici nelle singole condotte.

La scelta della localizzazione delle misure di pressione si determina pertanto in modo “tradizionale” considerando:

- *l'esigenza di monitorare localmente il funzionamento dei dispositivi idraulici e dei serbatoi, che rappresentano condizioni al contorno rilevanti per il comportamento globale del sistema;*
- *i nodi maggiormente sensibili alle variazioni di comportamento idraulico del sistema.*

In coerenza con le esigenze di soluzione del problema dell'osservabilità, almeno nel senso zonato dei bilanci idrici, la “segmentazione” può essere pertanto sviluppata considerando uno specifico indice di modularità¹⁵ che tenga conto del posizionamento delle misure di pressione ai nodi di bordo dei distretti insieme alle esigenze di divisione con un numero minimo di tagli concettuali (pozzetti). In questo modo, il monitoraggio idraulico risulta integrato ed i distretti DMA sono progettati in modo “topologicamente” efficiente al fine di ottenere un numero di distretti elevato con il minor numero di tagli concettuali (pozzetti) e di misure di pressione al bordo del sistema acquedotto. Tali distretti diventano pertanto DMA di pressione e di bilancio idrico¹⁶.

¹⁵ Simone, A., Giustolisi, O., Laucelli, D. (2016). A proposal of optimal sampling design using a modularity strategy. *Water Resource Research*, 52(8).

¹⁶ Simone, A., Laucelli, D., Berardi, L., Giustolisi, O. (2017). Modularity index for optimal sensor placement in WDNs. *SimHydro 2017: Choosing the right model in applied hydraulics*, 14-16 June 2017, Sophia Antipolis

2.8. ADOZIONE DI SISTEMI DI REGOLAZIONE DELLA PRESSIONE IN RETE: VALVOLE PRV AUTOMATICHE

La “*distrettualizzazione*” è un processo globale di riconfigurazione strutturale della rete mentre l’installazione di una valvola di riduzione delle pressioni in un nodo specifico del sistema introduce esclusivamente un controllo locale delle pressioni. La distrettualizzazione è finalizzata alla riduzione delle perdite volumetriche e, pertanto, deve sempre essere combinata con l’installazione mirata di valvole di riduzione della pressione, con l’obiettivo di prevedere il numero minore di valvole a parità di effetto complessivo sulle perdite volumetriche. L’approccio proposto, inoltre, limitando al minimo indispensabile l’utilizzo delle valvole di riduzione delle pressioni, rende il sistema più affidabile rispetto alle reciproche interferenze, specie se ogni distretto non risulta configurato in modo idoneo per evitarle; tale condizione diventa molto difficile da evitare considerando l’elevata “magliatura” e, talvolta complessità, delle reti italiane.

La modellizzazione avanzata consente pertanto la pianificazione dell’inserimento ottimale delle valvole idrauliche di riduzione della pressione e, quindi, del valore della pressione di controllo subito a valle delle stesse. La riduzione globale delle *perdite volumetriche* durante il ciclo operativo viene considerata come indicatore di efficienza gestionale consentendo di analizzare nel dettaglio le possibili interferenze fra valvole e affidabilità complessiva di sistema.

La pianificazione di valvole RRTC¹⁷ (Remote Real-Time Control) controllate attraverso le condizioni di pressione misurata in un nodo “sentinella”, ottimizza ulteriormente il controllo delle pressioni all’interno del sistema. In funzione delle richieste idriche nel ciclo operativo dell’acquedotto, essa viene utilizzata per valutare la variazione oraria del set-point delle valvole idrauliche che, pertanto, risulterà ottimizzata rispetto al controllo delle pressioni e riduzione delle *perdite volumetriche*.

Gli aspetti innovativi di tale procedimento, in relazione alle strategie di controllo delle pressioni, possono essere così riassunti:

¹⁷ Laucelli D., Berardi L., Ugarelli, R., Simone A., Giustolisi O. (2016) Supporting Real-time Pressure Control in Opegård Municipality with WNetXL. In: “12th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2016) - Smart Water for the Future” Procedia Engineering, 154, 71-79.

- a) Il controllo locale delle pressioni si integra con quello globale della distrettualizzazione migliorando l'efficienza della riduzione delle perdite volumetriche a parità di dispositivi in campo e, quindi, ottenendo la stessa affidabilità di sistema;
- b) La modellizzazione delle valvole RRTC consente un'ulteriore ottimizzazione delle valvole idrauliche attraverso la pianificazione di set-point di pressione oraria in funzione delle reali richieste idriche dell'utenza.

2.9. SOSTITUZIONE DEI TRONCHI VETUSTI E AMMALORATI: PIANIFICAZIONE DELLA RIABILITAZIONE

La riabilitazione delle condotte di rete non rappresenta un'opzione gestionale di riduzione "massiva" delle perdite volumetriche poiché gli interventi di sostituzione interessano una piccola percentuale rispetto alla lunghezza totale delle tubazioni dell'acquedotto. Le condotte presentano normalmente un deterioramento diffuso in relazione alla loro età media di posa (in genere non inferiore alla decina di anni). Gli effetti della sostituzione di una tubazione e della relativa riduzione delle perdite in quel determinato sono evidenti in termini di anomale riduzioni delle pressioni in rete nella zona vicina e di impatto sul corretto servizio all'utenza. Perdite volumetriche elevate in una singola tubazione in realtà sono infatti riferibili come *burst leakages*, e pertanto rappresentano la diretta conseguenza del generico stato di ammaloramento della rete. Per tale ragione la scelta dei tronchi da sostituire va eseguita considerando le perdite volumetriche come indicatore gestionale in quanto segnalatore degli effetti complessivi della riabilitazione sull'acquedotto, mentre i *burst leakages* non rappresentano indicatori attendibili in quanto sono eventi effetto dell'evoluzione dei background leakages innescati da fattori esterni o locali, talvolta casuali.

È importante chiarire che la semplice sostituzione di uno o più tronchi di tubazioni, qualora non associata ad una preventiva valutazione degli effetti che tale sostituzione può determinare sullo stato idraulico dell'intera rete, può determinare risultati negativi sulla riduzione globale delle perdite volumetriche dell'intera rete acquedotto.

La sostituzione di un tratto di rete deve tener conto infatti sia della riduzione delle perdite volumetriche delle tubazioni sostituite, ma anche degli effetti idraulici sulla restante rete in termini di aumento di pressione (quindi di perdite volumetriche) dovuti all'incremento della

conduttanza idraulica che la nuova tubazione causerà al sistema in funzione della sua “posizione idraulica”. È di tutta evidenza pertanto, per come riportato anche nella letteratura tecnico-scientifica, che una riabilitazione basata su un approccio metodologico superficiale possa diventare elemento “*negativo globalmente*” per il sistema idraulico anche se “*positivo localmente*” per le condotte sostituite. Per tale motivo, la “progettazione” della sostituzione dei tronchi vetusti ed ammalorati di una rete acquedotto deve essere eseguita considerando in modo complessivo gli effetti sopra riportati al fine di renderla efficiente dal punto di vista globale del sistema idraulico, ovvero dal punto di vista della sua gestione, e non esclusivamente guardando alla riduzione dell’età media dell’acquedotto.

La sostituzione di condotte idriche ottenuta considerando il solo parametro “vetustà”, infatti, può essere causa di incremento di sollecitazioni per altre tubazioni della rete, anch’esse vetuste, ma non sostituite per i *limiti fisiologici di budget*.

La pianificazione della riabilitazione deve essere finalizzata all’identificazione delle tubazioni da sostituire considerando gli anni di servizio (tronchi vetusti) attraverso un “*parametro di deterioramento*” ed utilizzando la simulazione idraulica avanzata.

Come detto, le perdite volumetriche sono un indicatore di *asset management*, attraverso l’utilizzo della seguente formula:

$$q_k^{leakage} = \beta_k (A_e, D, P_r, \dots) P_{k,t}^\alpha L_k$$

Le portate delle perdite volumetriche per unità di lunghezza, q_k/L_k , a livello di singolo tronco, k , sono funzione della variazione nel tempo della pressione media, $P_{k,t}$, tramite un parametro di deterioramento, β_k , ed un esponente α .

Studi internazionali hanno dimostrato che:

- ✓ Impostare $\alpha = 1$ è una buona assunzione tecnica specie a livello di modello di progetto;
- ✓ il parametro di deterioramento β_k è in realtà funzione della vetusta/età della condotta, A_e , del diametro, D , in relazione alla posa in opera e del numero di utenze/proprietà servite, P_r , dalla condotta come fattore di criticità delle giunzioni.

Per la definizione del parametro β_k sono stati riportati i fattori di *asset* più semplici da reperire a livello progettuale, anche se tale parametro è comunque funzione di altri fattori di

fatica legati alla vita del sistema come ad esempio stress termici, traffico, pressione, sollecitazioni di moto vario, etc., che, comunque, in qualche modo sono rappresentati, indirettamente, in quelli principali.

La riabilitazione proposta, quindi, è rappresentata da un processo di ottimizzazione che prevede la scelta dei tronchi da sostituire in modo da minimizzare il rapporto tra costo di sostituzione e beneficio della riduzione e quasi annullamento delle perdite q_k .

Per questo motivo β_k viene scelto proporzionale ad A_e e/o a P_r ed inversamente proporzionale a D in relazione, in quanto è noto in letteratura tecnico-scientifica che i diametri più piccoli sono statisticamente più ammalorati, per condizioni di posa in opera e per il maggior numero di proprietà/utenze allacciate per metro lineare, coerentemente con la calibrazione del modello idraulico di progetto.

Si osserva inoltre che la dipendenza diretta tra β_k delle tubazioni e l'età delle stesse permette di selezionare preferenzialmente condotte più vetuste rispetto ad altre messe in opera più recentemente, qualificando altresì gli investimenti più recenti.

La riduzione della resistenza idraulica delle nuove tubazioni sostituite determina infatti un cambiamento dello stato pressorio (incremento) a valle della sostituzione, generalmente non compensato dall'effetto di riduzione q_k che può determinare, come è noto, un effetto contrario di incremento volumetrico delle perdite volumetriche ed in conseguenza dei *burst leakages* dovuto alle maggior sollecitazioni pressorie.

Per tale motivo il modello idraulico avanzato consente anche l'ottimizzazione topologica dei tubi da sostituire considerando le condizioni sia idrauliche che plano-altimetriche della rete. Infine, la pianificazione della riabilitazione viene ottimizzata rispetto alla rete acquedotto già controllata nelle pressioni attraverso la distrettualizzazione e le valvole di riduzione della pressione, consentendo maggior affidabilità delle scelte gestionali.

In definitiva, è dimostrabile che, seppur la riabilitazione di sistema deve avere come indicatore la riduzione delle perdite volumetriche rispetto al valore dell'investimento, essa non raggiunge efficienze (benefici/costi) simili alla strategia basata sulla riconfigurazione dei flussi idrici durante la pianificazione dei DMA perché, in quest'ultimo caso, si possono conseguire riduzioni di perdite molto maggiori ad un costo di investimento molto minore.

2.10. SUPPORTO ALLA PIANIFICAZIONE DEL MONITORAGGIO PER PRE-LOCALIZZARE LE PERDITE IDRICHE

La previsione delle variazioni di pressione e portata conseguenti ad un evento di rottura stimabile mediante il modello idraulico avanzato, permette di interpretare le misure di pressione e portata in rete al fine di localizzare le condotte in cui è maggiormente verosimile che il guasto sia avvenuto.

In particolare, la disponibilità dei dati di consumo alle singole utenze e la modellazione idraulica di dettaglio predispongono all'utilizzo di letture di pressione alle proprietà private, che potranno essere integrate agli *smart meters* nel prossimo futuro, in aggiunta ai dati di pressione e portata monitorati in rete.

Il sistema WNetXL include il modulo di *Leak Detection*, che permette di supportare tutte le fasi gestionali e operative per l'identificazione di nuove perdite e la loro localizzazione mediante tre funzioni:

- *Pressure Monitoring Analysis*: analisi e visualizzazione dei distretti per il monitoraggio delle pressioni mediante le postazioni di misura esistenti;
- *Pressure Monitoring Design*: progetto ottimale delle postazioni per il monitoraggio delle pressioni;
- *Anomaly Detection*: funzione di supporto alla pre-localizzazione di nuove perdite e di analisi delle performance del sistema di monitoraggio esistente.

La pre-localizzazione di nuove perdite integra i dati di monitoraggio, la previsione modellistica e la probabilità di guasto. Quest'ultima può essere ottenuta mediante analisi dei *database di guasto/riparazioni* in possesso del *Gestore* e, quindi, permette di valorizzarne il contenuto per finalità gestionali.

CAPITOLO 3

ANALISI PRESSURE DRIVEN IN WNetXL - SIMULATORE IDRAULICO

3.1. ANALISI IN WNetXL-WNetGIS - PREMESSA

Il sistema che è stato utilizzato per l'elaborazione del modello e per le diverse attività proposte all'interno della presente tesi è WNetXL, frutto della ricerca-tecnico-scientifica italiana ed in particolare del Politecnico di Bari.

La modellazione idraulica avanzata utilizzata nel sistema WNetXL-WNetGIS rappresenta il principale elemento innovativo a supporto delle analisi per finalità di gestione efficace ed efficiente delle reti idriche. La piattaforma digitale WNetXL consente infatti di poter generare il Digital Twin (gemello digitale) della rete reale attraverso il quale è possibile fornire una rappresentazione digitale della topologia e del comportamento idraulico del sistema, integrata in ambiente GIS con geo-referenziazione di qualsiasi elemento del sistema, inclusi i contatori di utenza attivi e non attivi, utile per le finalità progettuali e gestionali.

Il sistema WNetXL si basa sulla modellizzazione idraulica avanzata degli acquedotti e ne consente l'analisi del funzionamento realistico di sistema per le diverse attività di pianificazione, progettazione e gestione come ad esempio:

- *la valutazione delle perdite volumetriche a livello di singole condotte in funzione dello stato pressorio;*
- *la valutazione delle condizioni di pressione insufficiente per il corretto servizio all'utenza;*
- *la simulazione di edifici con erogazione a piani con quote differenti;*
- *la simulazione dei sistemi di autoclavi molto diffusi nelle reti acquedotto calabresi.*

Nei paragrafi a seguire vengono illustrati alcuni aspetti innovativi e distintivi di WNetXL-WNetGIS inerenti sia la definizione del modello idraulico che le capacità di analisi idrauliche e topologiche.

3.2. VERIFICHE DI CONNETTIVITÀ DELLA RETE

Il sistema idraulico WNetXL, integra funzioni di analisi topologica mutuata dalla *teoria delle reti complesse*, prima e durante la simulazione idraulica.

Attraverso tali funzioni viene creato il modello e possono essere eseguite varie verifiche di connettività sin dalle prime fasi di importazione dei dati acquisiti dal Gestore (in formato *.inp* di EPANET e/o da *database di SIT aziendali*), tra le quali:

- *Semplificazione topologica con riferimento a tronchi piccoli relativi alla rappresentazione delle valvole di isolamento nel database di origine e rappresentati in WNetXL come proprietà dell'oggetto link;*
- *Identificazione dei nodi duplicati, dovuti a errori di rappresentazione;*
- *Identificazione di elementi della rete disconnessi*
- *Supporto alla correzione del dato topologico nel SIT, laddove necessario.*

L'analisi di connettività del sistema *identifica nodi e tronchi isolati dalla rete*, ovvero non alimentati da sorgenti idriche in ingresso alla rete di distribuzione. In sede di definizione del modello tale analisi consente di evidenziare specifiche parti del sistema in cui è opportuno verificare l'informazione topologica di dettaglio. È da evidenziare il fatto che, in sede di simulazione idraulica, il modello in WNetXL-WNetGIS è in grado di eseguire analisi idrauliche anche in presenza di elementi disconnessi, riferendosi alla topologia delle sole parti connesse alle sorgenti idriche (es. serbatoi, pompe).

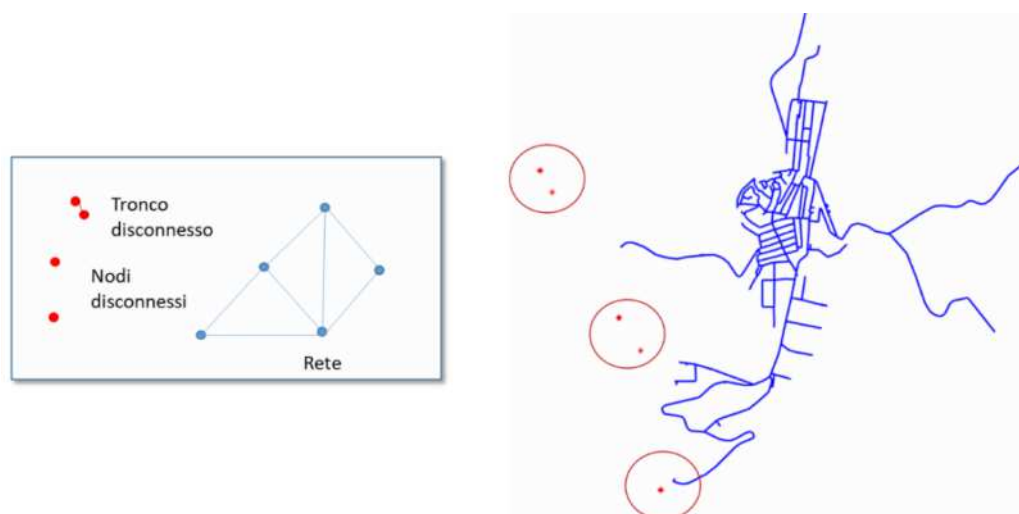


Fig.24. Identificazione di tronchi e nodi disconnessi dalla rete

Nel caso in cui la disconnessione di porzioni di rete sia dovuta ad errori riportati dal dato di origine (mancanza di connettività), il sistema li rileva senza precludere la simulazione idraulica della parte connessa alle sorgenti idriche (es. serbatoi, pompe).

Nel caso in cui la disconnessione sia dovuta invece alla chiusura volontaria di organi di intercettazione, ad esempio, per consentire interventi di manutenzione, il sistema WNetXL-WNetGIS identifica sia la parte volutamente isolata che le porzioni eventualmente disconnesse per effetto delle stesse chiusure, senza la necessità di manipolazioni preliminari del modello (es. rimozione di tronchi).

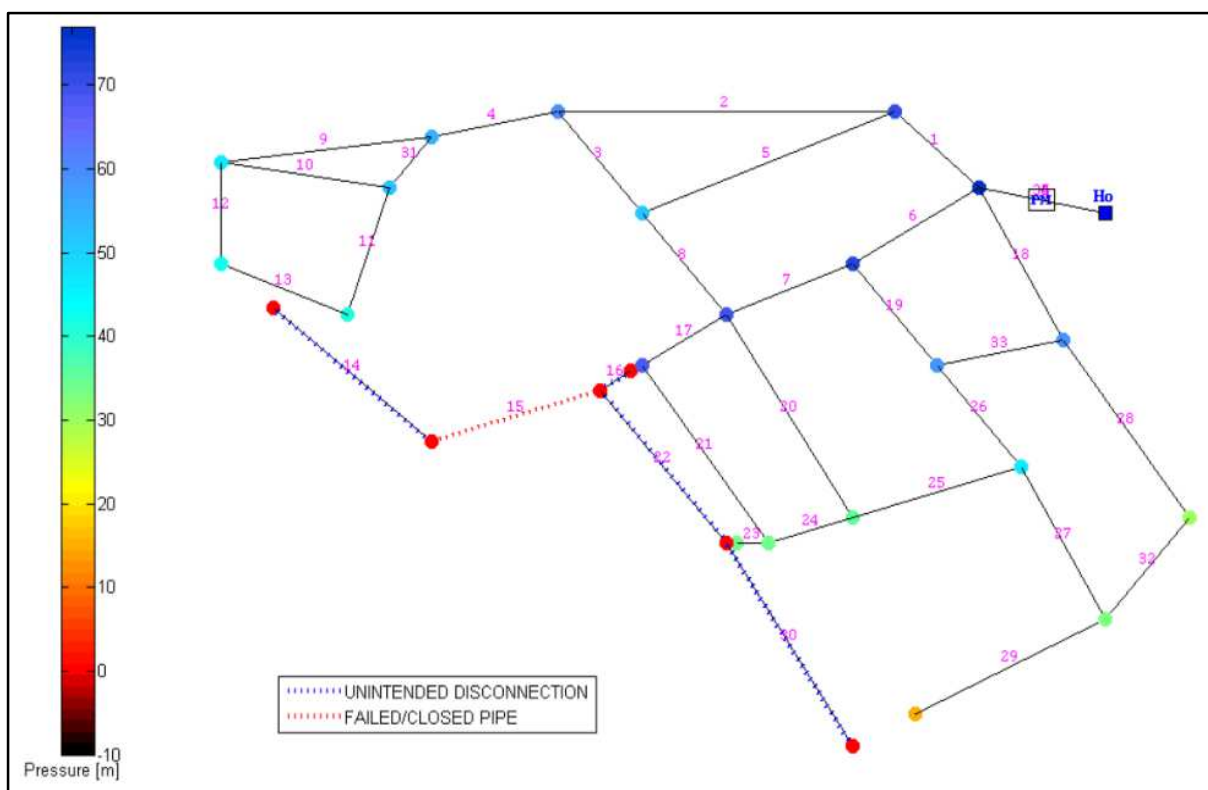


Fig.25. Identificazione di porzioni di rete disconnesse per effetto della chiusura volontaria di organi di intercettazione per lavori di manutenzione e modellazione delle pressioni nei nodi.

3.3. DEFINIZIONE DELLA RESISTENZA IDRAULICA DELLE CONDOTTE

La perdita di carico uniformemente distribuita lungo una tubazione (ΔH) è calcolabile con la formula di Darcy-Weisbach:

$$\Delta H = \frac{\lambda}{2gD^5} Q^2 L = KQ^2 L \quad (5)$$

Dove:

- D è il diametro interno della tubazione;
- L è la lunghezza della tubazione;
- Q la portata che attraversa la tubazione;
- λ è l'indice di resistenza della tubazione.

L'indice di resistenza λ può essere ritenuto indipendente dalla portata Q nelle reti di distribuzione in cui prevale del tutto il moto assolutamente turbolento di tubo scabro.

Per sistemi acquedotto in servizio da decenni, ovvero per modelli idraulici sviluppati per finalità “gestionali”, il dato disponibile sul diametro delle condotte rappresenta in verità un parametro solo indicativo del reale diametro interno della tubazione a causa di possibili incrostazioni, presenza di eventuali valvole non completamente aperte, etc..

Lo stesso concetto di “scabrezza” della tubazione risulta modificato e, pertanto, l'indice di resistenza λ va inteso come un parametro correttivo della perdita di carico che contiene al suo interno tutti gli effetti non direttamente rappresentati dal diametro interno D della tubazione.

L'Equazione (5) rivista con le condizioni reali della rete sopra riportate evidenzia che, per la calibrazione dei modelli gestionali, è più razionale parlare di *resistenza idraulica unitaria* K della condotta non potendo separare il contributo della scabrezza dall'incertezza di misura del reale diametro medio interno delle tubazioni che, oltretutto, è rappresentata nell'equazione con esponente 5.

Nel sistema WNetXL-WNetGIS, le *resistenze idrauliche unitarie* K sono riportate in una tabella dei valori dell'*asset* a cui vengono indirizzate le singole tubazioni dell'acquedotto. È possibile implementare anche esponenti diversi da 2 nella formulazione dell'equazione (5).

Tale condizione può essere utilizzata ad esempio qualora si voglia usare il sistema U.S.A., che fa riferimento alla formula di Hazen-Williams, adottando l'esponente 1.852. L'utilizzo di quest'ultima formulazione “non europea” è opinabile, tuttavia, considerando il *regime di moto assolutamente turbolento* e di *tubo scabro* che caratterizza le tubazioni principali rappresentate nei modelli idraulici.

3.4. DOMANDA CON CONNESSIONE DIRETTA DELLE UTENZE (PRESA DIRETTA DALLA RETE)

In presenza di domanda con connessione diretta delle utenze con presa in carico dalla rete (per esempio senza utilizzo di autoclavi), il solutore idraulico WNetXL fa riferimento al *modello di Wagner*, già descritto al paragrafo 2.2, che permette di calcolare, oltre alla domanda erogata in condizioni di servizio *normali*, anche la domanda effettivamente erogabile in condizioni di *deficit di pressione*.

Nel solutore idraulico WNetXL vanno definiti, pertanto, oltre alla richiesta idrica media *statistica*, eventualmente variabile nel tempo con pattern di domanda assegnato, anche i valori di *pressione necessari per un corretto servizio* P^{ser} e quelli minimi per erogare qualsiasi domanda in condizioni di deficit pressorio P^{min} , per come riportato nelle seguenti Eq. (6) ed esemplificato in figura 26.

$$d(i,t) = \begin{cases} d^{req}(i,t) & P(i,t) \geq P^{ser}(i) \\ \frac{d^{req}(i,t)}{\sqrt{P^{ser}(i) - P^{min}(i)}} \sqrt{P(i,t) - P^{min}(i)} & P^{min}(i) < P(i,t) < P^{ser}(i) \\ 0 & P(i,t) \leq P^{min}(i) \end{cases} \quad (6)$$

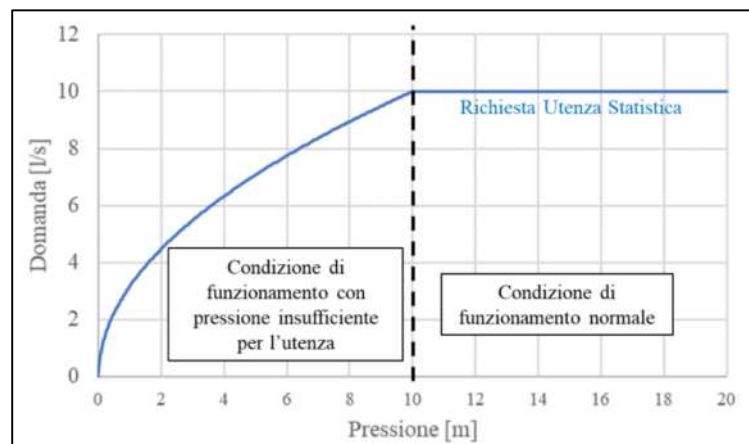


Fig.26. Diagramma pressioni-domanda per le utenze.

Nel caso di domanda con connessione diretta delle utenze in edifici multi-piano, la figura 27 indica schematicamente, al singolo nodo (disegnato con colore rosso), una domanda che rappresenta dispositivi di erogazione ai diversi piani degli edifici. In WNetXL-WNetGIS è possibile definire, per ciascun nodo di rete, il numero di piani e l'altezza di interpiano Δz , mentre la funzione di domanda calcola autonomamente la frazione di richiesta idrica definita al nodo che sarebbe ancora erogabile nei piani con pressione in deficit.

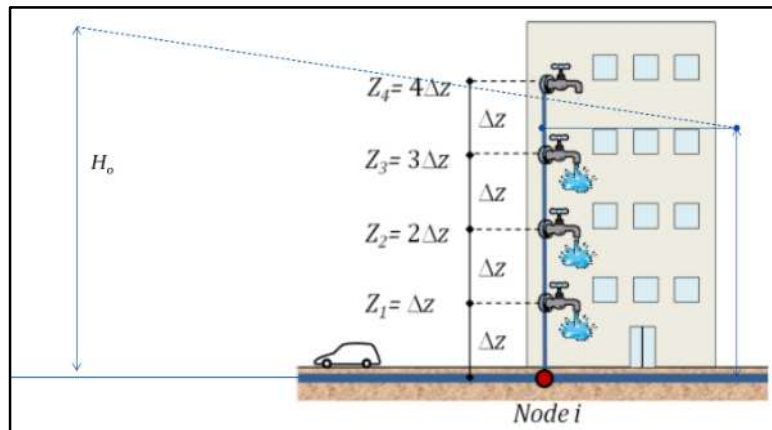


Fig.27. Modellazione al singolo nodo delle erogazioni ai vari livelli degli edifici multi-piano.

3.5. DOMANDA DELLE UTENZE CON CONNESSIONE CON SERBATOI PRIVATI (IMPIANTI AUTOCLAVE)

Considerare la presenza di serbatoi privati con autoclavi è di specifico interesse nei centri urbani in area mediterranea, ed in particolar modo in Calabria, in cui la presenza di serbatoi privati a servizio di autoclavi o in sommità degli edifici è molto diffusa ed è di interesse gestionale in situazioni di carenza idrica.

La figura 28 rappresenta lo schema di alimentazione mediante serbatoi privati. Il modello idraulico in WDNNetXL è in grado di simulare il processo di riempimento/svuotamento in ciascun serbatoio definibile, in ogni singolo nodo, mediante la definizione della massima capacità di riserva privata, di un volume disponibile all'inizio della simulazione e di parametri inerenti alla valvola che alimenta il serbatoio.

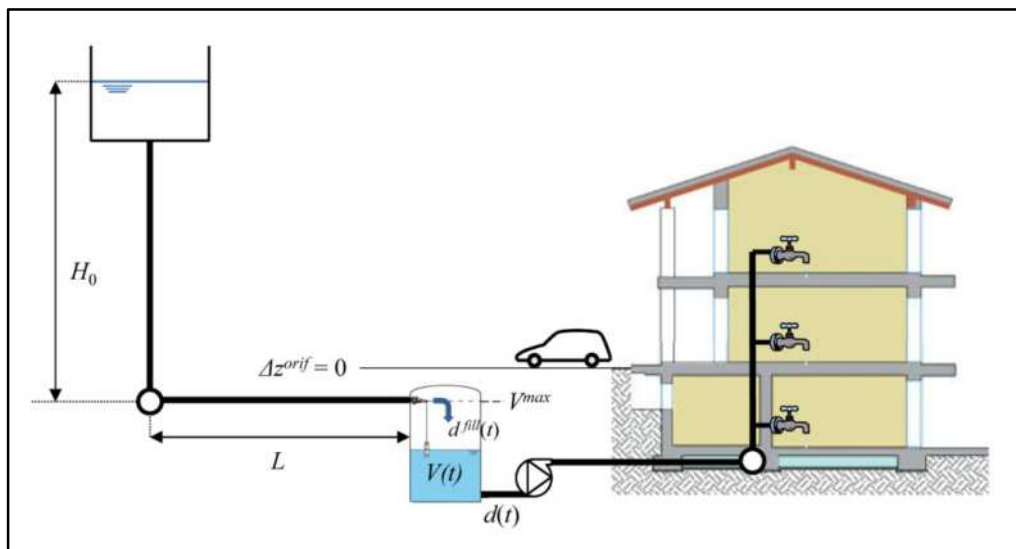


Fig.28. Modellazione di serbatoi privati a servizio di autoclavi.

3.6. DEFINIZIONE E SIMULAZIONE DELLA DOMANDA ALLE SINGOLE UTENZE

Il sistema WNetXL-WNetGIS può importare i dati della rete idrica contenuti nei database del sistema informativo territoriale (SIT) utilizzato per finalità gestionali. Oltre all'importazione degli elementi geometrici ed idraulici delle reti da SIT e alla loro sincronizzazione con un modello esistente (importabile automaticamente da file in formato *.inp di EPANET), il sistema WNetXL-WNetGIS permette di importare i dati relativi alle singole utenze, senza aggregare le richieste idriche ai nodi del modello.

Tale funzione risulta essere di fondamentale importanza e consente di eseguire due diversi tipi di elaborazioni:

- Analisi *demand-driven* o *pressure-driven* di tutte le componenti di domanda in funzione della pressione concentrate ai nodi del modello di rete (modellistica classica);
- Analisi *demand-driven* o *pressure-driven* di tutte le componenti di domanda in funzione della pressione alle singole utenze, utilizzando le informazioni sulla georeferenziazione dei contatori ed i dati di consumo contabilizzati.

Tale paradigma innovativo di modellazione, non comporta significativi incrementi dei tempi di calcolo e consente di aggiornare periodicamente la base di dati del modello con nuovi dati provenienti dal SIT riguardanti, ad esempio, la cessazione di alcune utenze, ovvero la presenza di nuovi allacci e i relativi dati di consumo.

Inoltre, esso predispone il sistema all'acquisizione di dati di dettaglio che potranno essere disponibili nel prossimo futuro come, ad esempio, l'altezza degli edifici da servire ed il numero di piani o la presenza di volumi di accumulo privati (autoclavi). Questa funzionalità innovativa di simulazione idraulica in WNetXL-WNetGIS permette pertanto di poter effettuare l'analisi di dettaglio delle condizioni di servizio, indicando eventuali utenze in deficit.

La figura 29 riporta un estratto della tabella “*nodes_consumers*” della rete in cui per ciascuna utenza vengono evidenziati, ad esempio, i dati relativi a:

- Richiesta statistica (d_s);
- Pattern di consumi associato alla tipologia di utenza (Pattern ID);
- Coordinate georeferenziate del contatore (X_s, Y_s, Z_s);

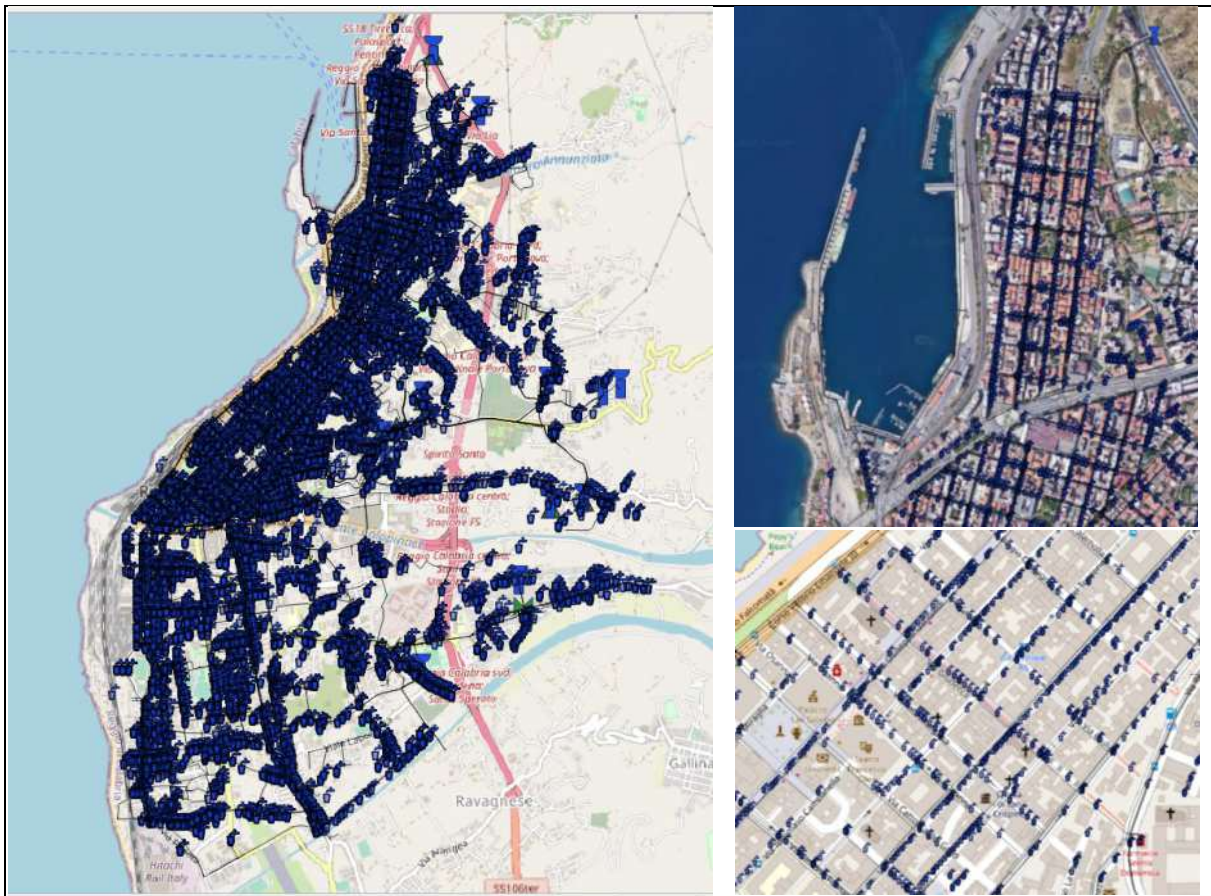


Fig.30. Visualizzazione delle singole utenze georeferenziate in WDNNetGIS – Città di Reggio Calabria

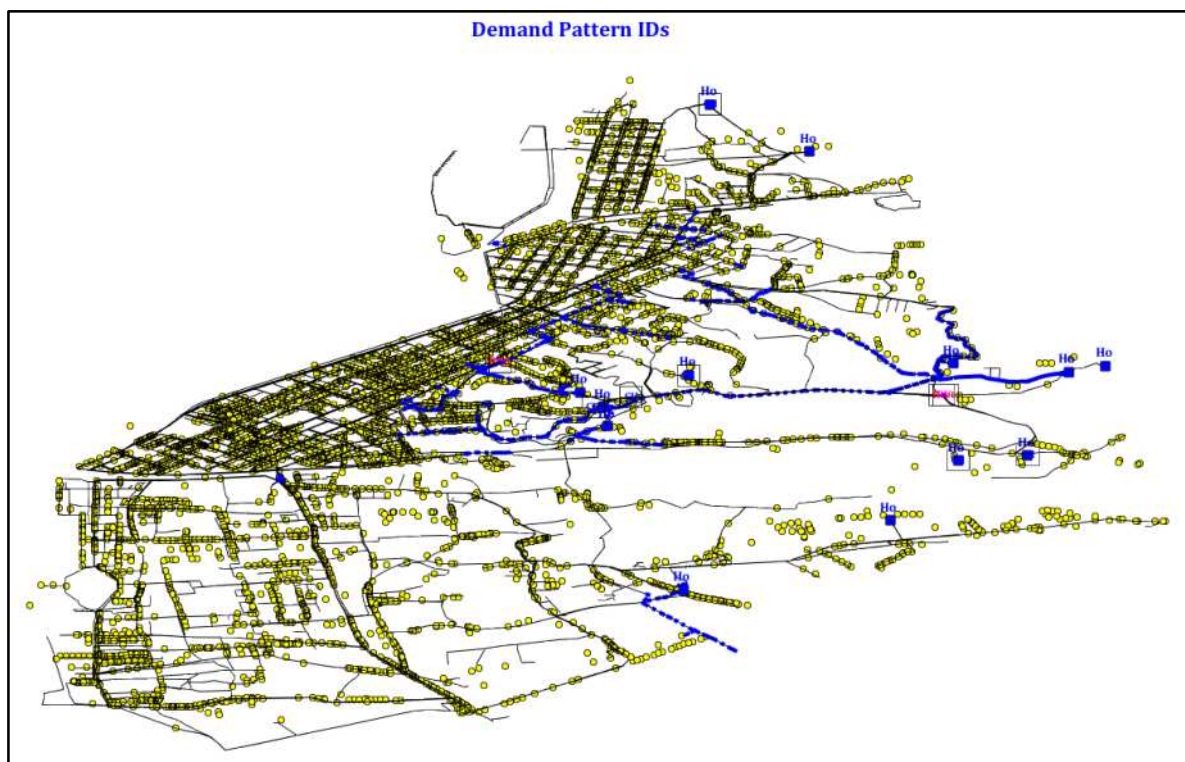


Fig.31. Definizione delle singole utenze nel modello – Città di Reggio Calabria

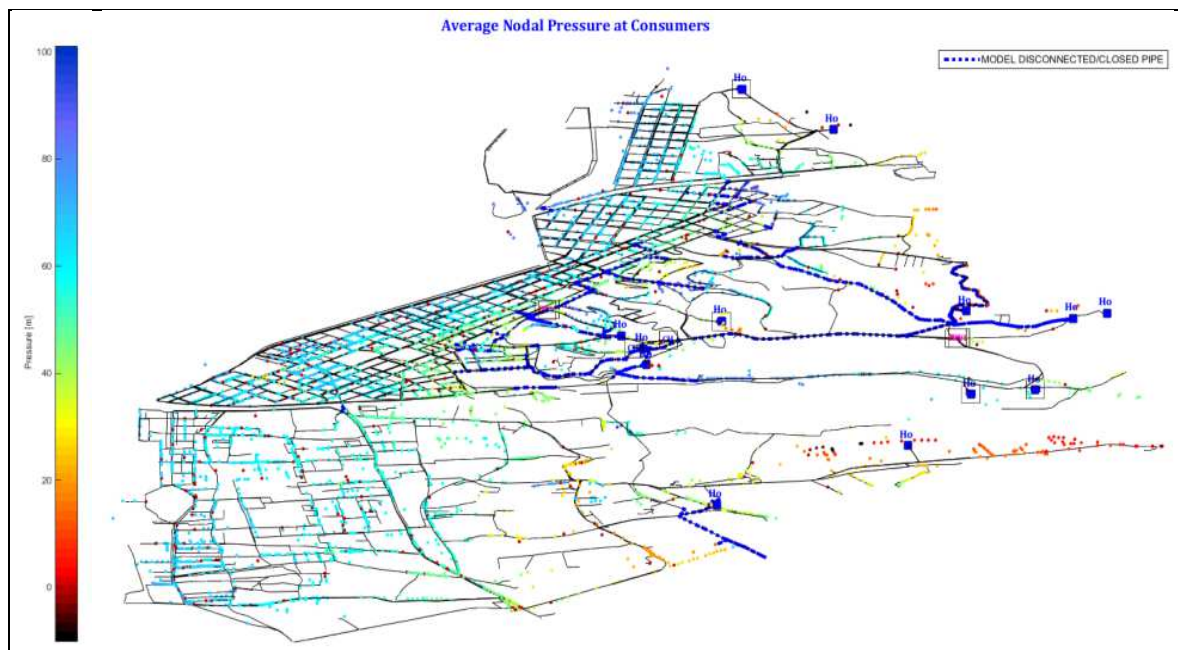


Fig.32..Calcolo delle pressioni medie su un ciclo operativo alle singole utenze – Città di Reggio Calabria

3.7. RAPPRESENTAZIONE DEI DISPOSITIVI IDRAULICI E DELLE VALVOLE COME PROPRIETÀ DELL'OGGETTO LINK

WDNetXL-WDNetGIS introduce una rappresentazione topologica opzionale dei dispositivi idraulici e delle valvole di ogni tipologia rappresentabili come oggetti delle tubazioni ovvero dei *link della topologia* della rete. Le potenzialità di tale rappresentazione topologica possono essere utilizzate nella simulazione idraulica, ad esempio, per come di seguito riportate:

- Considerando le **valvole di sezionamento** *normalmente chiuse* possono essere formati i distretti di monitoraggio (DMA);
- Considerando le **valvole di isolamento** *normalmente aperte e chiuse all'occorrenza* può essere simulata la separazione di porzioni di acquedotto per lavori di manutenzione.

Si riportano in figura 33 i due schemi concettuali. A sinistra la valvola è rappresentata da un link aggiuntivo, a destra è definita come proprietà del link principale, ovvero del tronco su cui è installata.

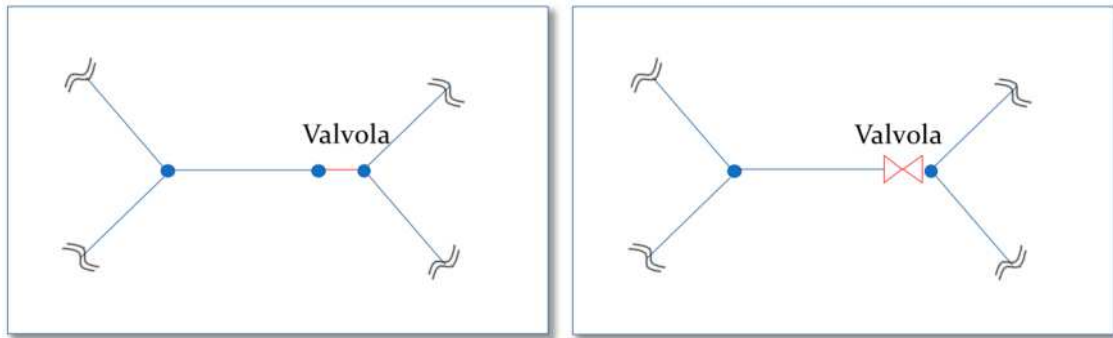


Fig.33. Valvola: elemento link aggiuntivo (sinistra) e proprietà dell'oggetto del link (destra).

Per tutti i dispositivi idraulici è possibile inoltre definire nella tabella “pipes” la proprietà di link rappresentate come “device position”, che indica la presenza di un pozzetto in cui possono trovarsi o essere installati in futuro dispositivi idraulici.

$$Device\ position = \begin{cases} 0 & \text{posizione del dispositivo non definita} \\ 1 & \text{dispositivo in prossimità del nodo 1} \\ 2 & \text{dispositivo in prossimità del nodo 2} \end{cases}$$

Laddove sia definita la posizione del dispositivo, la colonna $D_{k-device}$ riportate nella stessa tabella consente di assegnare al dispositivo idraulico un diametro diverso da quello della tubazione principale al fine che lo stesso possa essere utilizzato nei calcoli idraulici.

Tale rappresentazione, pur preservando la completezza del dato, evita la restituzione negli *shapefile* e nel modello idraulico di “link fittizi” molto piccoli inseriti in altri software per adattare la rappresentazione di dispositivi idraulici e valvole di ogni genere.

Tale rappresentazione permette inoltre di poter ottenere una coerenza assoluta tra *shapefile* in WDNNetGIS (dove valvole e dispositivi sono rappresentati da oggetti puntiformi) e formato dati in WDNNetXL che, di fatto, è definito da tabelle che vengono in seguito “georeferenziate” in GIS con attribuite le proprietà relative ai link ed ai nodi.

Ciò rafforza l’interoperabilità fra WDNNetGIS e WDNNetXL consentendo di caricare i file *xls* di WDNNetXL direttamente da WDNNetGIS, senza ricorrere alla trasformazione intermedia in *shapefile*.

3.8. MODELLAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELLE VALVOLE

Il sistema WDNNetXL-WDNNetGIS permette di modellare tutti i tipi di valvole di regolazione e di controllo dei quali è possibile pianificare controlli mediante l'utilizzo di regole semplici o complesse.

In particolare, il software WDNNetXL è in grado di modellare il funzionamento di:

- Valvole di isolamento (analisi del SVI);
- Valvole di sezionamento (analisi dei DMA) e tronchi abbandonati;
- Valvole di flusso (FCV) e valvole unidirezionali (di non inversione del flusso);
- Valvole di riduzione/sostegno della pressione (PCV) anche con nodi di controllo interni alla rete ed analisi di controllabilità;
- Qualsiasi tipo di saracinesca controllata.

Vengono riportate di seguito le peculiarità della rappresentazione di ogni tipologia di dispositivo “valvole” e “saracinesche”:

a) Sistema di Valvole di Isolamento (SVI)

Le valvole di isolamento sono normalmente aperte e vengono chiuse solo per consentire l'esecuzione di lavori di manutenzione pianificati o non pianificati (guasto delle tubazioni o riabilitazione) per isolare il segmento di rete interessato.

Pipe ID	1 st node	2 nd node	P ₁ [m ³ /s]	L _c [m]	D _i [-]	K _s ^{int} [s ² /m ⁵]	H ₀ [m]	r _e [1/c ₀]	1 st IV	2 nd IV	Flow Obs.	Q _{max} [m ³ /s]	Device Pos.	FP [-]
1	1	2	0	348.5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	3	0	955.7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	4	0	483	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	3	9	0	400.7	7	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	2	4	0	791.9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	5	0	404.4	9	0	0	0	0	0	0	0	1	0
7	5	6	0	390.6	8	0	0	0	0	0	0	0	1	0
8	6	4	0	482.3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	9	10	0	934.4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	11	10	0	431.3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig.34. In verde le colonne per le valvole di isolamento vicino al primo o al secondo nodo di estremità del tronco.

La figura 34, riporta un estratto della tabella dati dei “pipes” (link) in cui le colonne “1stIV” e “2ndIV”, evidenziate in verde, indicano la presenza di valvole di isolamento vicino al primo o al secondo nodo di estremità del tronco.

Poiché in alcuni tronchi tali valvole potrebbero essere installate ad entrambe le estremità, non è necessario definire la colonna “Device position”. Il sistema WDNNetXL-WDNNetGIS permette di associare automaticamente una data tipologia di valvola (tipicamente una

Throttle Control Valve in formato .inp di EPANET) a valvole di isolamento, sin dalla importazione dei dati per la costruzione del modello. L'analisi topologica delle reti permette, una volta definito il Sistema di Valvole di Isolamento (SVI), di identificare i segmenti di rete isolabili, come esemplificato in figura 35.

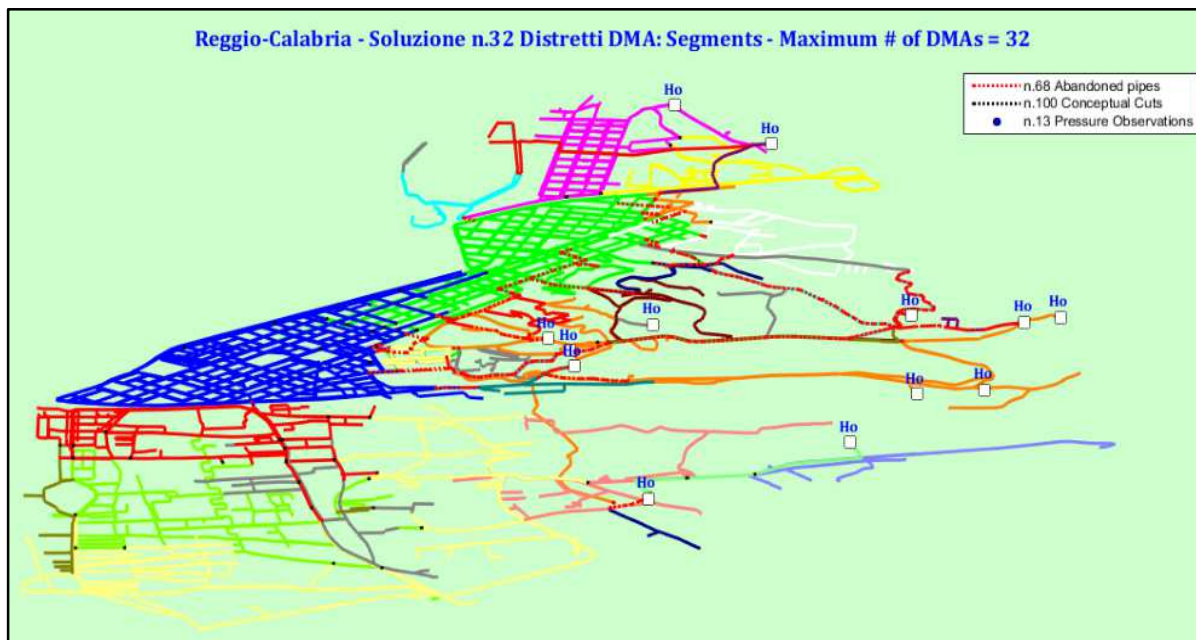


Fig.35. Divisione della rete in segmenti (colorati) a seguito della chiusura di valvole di isolamento (SVI)

b) Valvole di sezionamento e tronchi abbandonati

WDNetXL-WDNetGIS permette di definire valvole di sezionamento che, a differenza delle valvole di isolamento, sono chiuse durante il funzionamento normale del sistema, ad esempio, per delimitare distretti di monitoraggio (DMA). In tal caso, la colonna Device Position riporta indicazione della posizione della valvola e il valore -1 nella colonna K_k^{ml} ne indica la chiusura (vedi figura 36).

Pipe ID	1 st node	2 nd node	P_1 [m ³ /s]	L_1 [m]	D_1 [-]	K_k^{ml} [s ² /m ⁵]	$D_{k-device}$ [-]	Efficiency [-]	α_k [-]	β_k [1/(α_k)]	1 st IV	2 nd IV	Flow Obs.	Q_{max} [m ³ /s]	Device Pos.	FP [-]
1	1	2	0	348.5	8	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2	2	3	0	955.7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

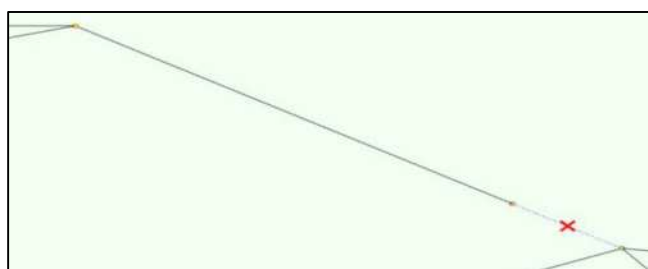


Fig.36. Estratto della tabella “pipes” (in alto) e visualizzazione (in basso) di una valvola di sezionamento.

Se la colonna Device Position riporta valore “0”, il sistema riconosce una condotta abbandonata o riportata come “chiusa” in altri modelli (es in EPANET), visualizzandola come in Figura 37, ma ignorandone la presenza durante il calcolo idraulico.

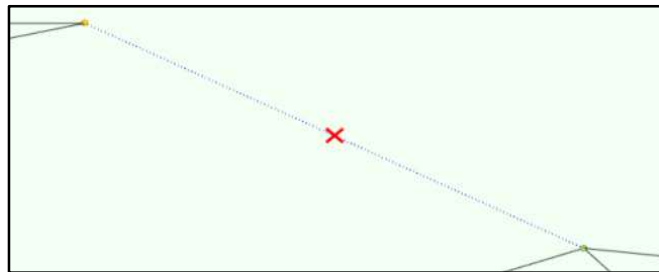


Fig.37. Visualizzazione di un tronco abbandonato o “chiuso”.

c) Valvole di regolazione della portata (FCV) e valvole unidirezionali (Check valves)

Le valvole di regolazione della portata sono modellate in WDN_{et}XL-WDN_{et}GIS adottando uno schema noto in letteratura che determina esplicitamente, all’interno del solutore idraulico, la perdita di carico localizzata associata al dispositivo per limitare la portata al valore desiderato (Giustolisi et al. 2012)¹⁸.

Tale schema, evitando espedienti numerici euristici, permette di trattare in maniera analoga anche valvole unidirezionali di non inversione del flusso. È da evidenziare che l’analisi topologica integrata all’analisi idraulica in WDN_{et}XL-WDN_{et}GIS permette di poter eseguire simulazioni a *topologia variabile*, ovvero di determinare lo *stato idraulico* del sistema identificando la rete ancora connessa a fronte della possibile chiusura delle suddette valvole durante simulazioni di periodo esteso, ad esempio giornaliero.

d) Valvole di controllo della pressione (PCV): controllo locale e remoto

Le valvole di controllo (riduzione o sostegno) della pressione possono rappresentare un elemento determinante nella strategia di “asset management”, sia con riferimento all’obiettivo di ridurre le perdite volumetriche che rispetto al mantenimento di adeguate condizioni pressorie di servizio per la fornitura idrica. La progettazione classica delle PCV utilizza valvole di riduzione a controllo idraulico, che mantengono una pressione assegnata in sede di settaggio subito a valle del dispositivo. Negli ultimi anni sono state proposte valvole a controllo elettrico di tipo RRTC (*Remote Real-Time Controlled*) che sono controllate attraverso un nodo idraulicamente critico (sentinella) interno alla rete.

¹⁸ Giustolisi, O., Berardi, L., & Laucelli, D. 2012a Accounting for directional devices in WDN modeling. J. Hydr. Eng., 138(10), 858-869

Con riferimento alla riduzione delle perdite, lo schema di controllo RRTC permette di ottimizzare la riduzione delle perdite, richiedendo un minor numero di installazioni e riducendo le possibili interferenze fra dispositivi dovute della variabilità nel funzionamento idraulico durante il ciclo operativo.

Il *nodo sentinella* è un infatti indicatore del funzionamento del sistema rispetto alla variazione temporale delle richieste idriche ed il controllo di pressione, con riferimento a tale nodo, richiede l'indicazione di un unico valore di pressione di controllo (*almeno pari alla pressione di corretto servizio*). Le valvole classiche, invece, richiederebbero, per avere uguale efficienza, un valore di pressione di controllo variabile con la richiesta idrica, per esempio orario. Il software di calcolo utilizzato WDNNetXL-WDNNetGIS permette di definire le PCV indicando la pressione target (P^{set}) in qualsiasi nodo di controllo in rete, sia con valore unico che variabile nel tempo.

La figura 38 mostra il controllo di pressione mediante una PCV installata in una piccola rete idrica, *Apulian*, lungo il tronco che alimenta la rete dal serbatoio e controllata per mantenere una pressione $P^{set} = 13m$ nel nodo sentinella remoto, ovvero simulando uno schema RRTC con passo temporale orario. Si osservi che la simulazione restituisce l'andamento delle pressioni nel nodo N1; tali valori di pressioni sarebbero quelli da settare, per ogni ora, subito a valle della valvola nel caso di controllo idraulico (classico). Pertanto, il modello idraulico in WDNNetXL-WDNNetGIS permette di analizzare lo scenario di funzionamento ottimale (RRTC) fornendo altresì indicazione sul pattern di P^{set} come riferimento per il controllo classico, laddove, ad esempio, sia già presente una PCV anche con un numero limitato di set-point.

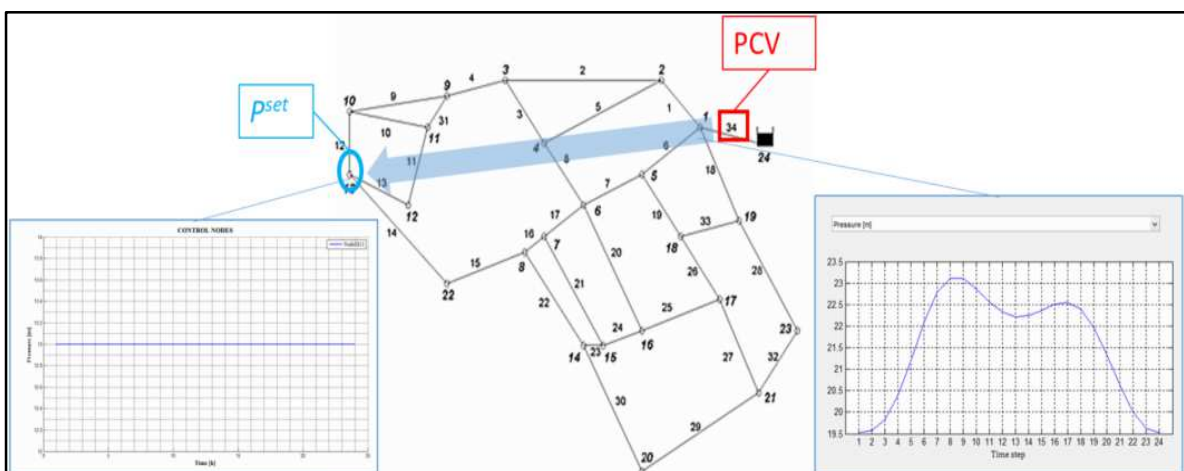


Fig.38. Simulazione di una valvola di controllo di pressione con nodo di controllo remoto.

e) Controllo temporizzato delle valvole di regolazione

Laddove siano definite valvole di regolazione comandate con pattern temporali del grado di chiusura, la piattaforma WNetXL-WNetGIS permette di definire il medesimo pattern con riferimento al coefficiente di perdita di carico concentrata che le stesse valvole realizzano nel sistema.

Oltre a supportare il settaggio delle valvole secondo un approccio *trial-and-error*, WNetXL-WNetGIS consente, ad esempio, di simulare scenari di regolazione ottimale delle valvole mediante l'analisi idraulica in uno schema RRTC e di ricavare dalla stessa simulazione il pattern temporale di perdita di carico concentrata sulla valvola da utilizzare nel controllo temporizzato.

3.9. MODELLAZIONE DI SERBATOI A LIVELLO VARIABILE (TANKS)

I serbatoi a livello variabile (*comunemente noti come “tanks”*), come ad esempio serbatoi di compenso urbani, vengono implementati dal modello attraverso un algoritmo che supera le note instabilità di EPANET e di tutti i software basati sul medesimo solutore idraulico (Giustolisi et. al, 2012)¹⁹.

La differenza tra i serbatoi “*tank*” e le riserve “*reservoir*” dal punto di vista della modellazione idraulica è la seguente:

- ✓ Serbatoi “*tank*” sono serbatoi di compenso, o di testata, rappresentati nel modello attraverso nodi con capacità di stoccaggio dell'acqua ed in cui il livello può variare durante le simulazioni;
- ✓ “*reservoir*” sono nodi rappresentanti una riserva infinita per la rete. Possono essere ad esempio laghi, fiumi, sorgenti o falde sotterranee.

La stabilità dell'algoritmo in WNetXL-WNetGIS consente, altresì, di simulare il funzionamento di reti in cui siano presenti solo serbatoi a livello variabile, ovvero senza la necessità di definire alcun “*reservoir*” a livello noto.

Possono essere inoltre rappresentati gli schemi di alimentazione di serbatoi “*tank*” che, pur essendo molto comuni nelle reti idriche, non possono essere rappresentati in altri software commerciali a meno dell'introduzione di artifici euristici (*ad esempio “regole” o*

¹⁹ Giustolisi, O., Berardi, L., Laucelli, D. 2014 Modeling local water storages delivering customer-demands in WDN models, J. Hydr. Eng., 140(1), 89-104

“controlli”) che, tuttavia, possono comprometterne la stabilità del calcolo inducendo a risultati fuorvianti ai fini gestionali.

a) **Modellazione di serbatoi urbani con alimentazione da condotte esterne**

In WNetXL-WNetGIS è possibile definire per i nodi con i serbatoi “tank” anche un’alimentazione esterna, ovvero idraulicamente indipendente dal funzionamento della rete, come schematizzato in figura 39. Inoltre, è possibile definire nello stesso nodo la domanda di utenza, sia per analisi *demand-driven* che *pressure-driven*.

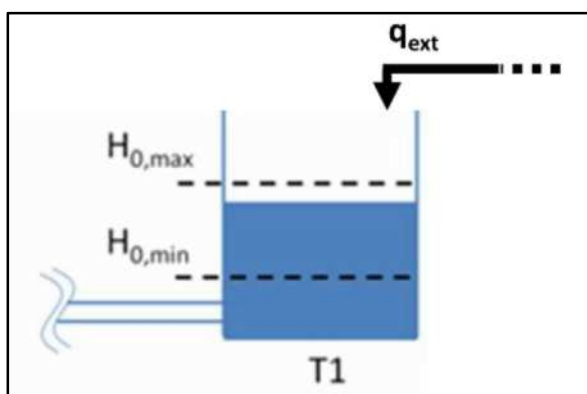


Fig.39. Schema serbatoio (tank) alimentato dall’esterno della rete.

La figura 40 mostra il caso della “rete test Apulian” in cui tutti i nodi sono sostituiti con serbatoi a livello variabile alimentati da condotta esterna. Nonostante la ridotta resistenza idraulica delle condotte tra i serbatoi, che in altri software indurrebbe condizioni di instabilità della simulazione, il risultato mostra che la variazione del battente nei serbatoi è modellata con comportamento stabile, anche in assenza di serbatoi a livello fisso (*reservoirs*).

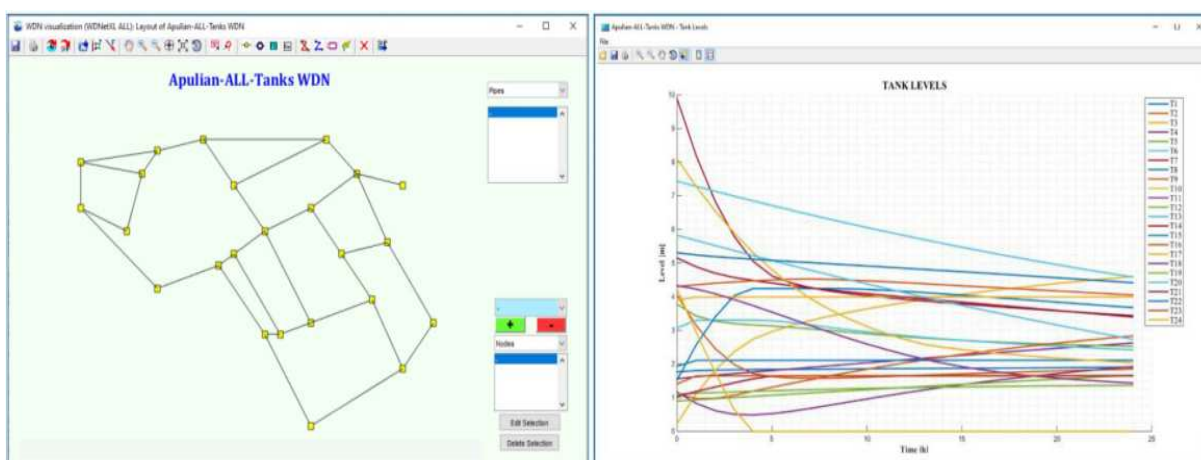


Fig.40. Simulazione della rete test Apulian con soli serbatoi a livello variabile: layout della rete senza reservoir (sinistra), variazione del battente idrico nei singoli serbatoi (destra).

b) Modellazione ai serbatoi urbani con alimentazione dall'alto (disconnessione idraulica)

In molti schemi di acquedotto i “tank” rappresentano serbatoi di compenso alimentati dalla stessa rete mediante un ugello ad efflusso libero dall'alto che, quindi, introduce una disconnessione idraulica, come rappresentato nello schema in figura 41.

In questo caso il modello in WDNNetXL-WDNNetGIS permette di rappresentare l'alimentazione da un nodo interno alla rete (*N101 in figura*), per il quale va definito il coefficiente di efflusso di un ugello libero, e di associare tale nodo al serbatoio *tank*.

Questa possibilità permette di definire tali elementi nel software senza fare ricorso a “regole” o “controlli”, né ad artifici numerici di sorta, con evidenti vantaggi di stabilità nel calcolo.

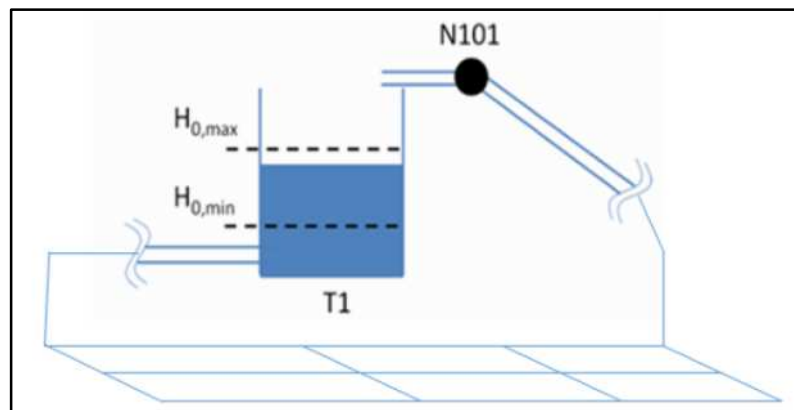


Fig.41. Schema serbatoio (tank) alimentato con disconnessione idraulica da un nodo della rete.

c) Definizione di serbatoi urbani tronco-conici

La piattaforma WDNNetXL-WDNNetGIS consente inoltre la definizione e modellizzazione di serbatoi “*tank*” non cilindrici (vedi figura 42) ed, in particolare, tronco-conici.

Anche per questo aspetto, il paradigma di sviluppo della piattaforma WDNNetXL-WDNNetGIS l'implementazione di qualsiasi ulteriore modifica legata ad esigenze specifiche nella definizione di questi elementi.

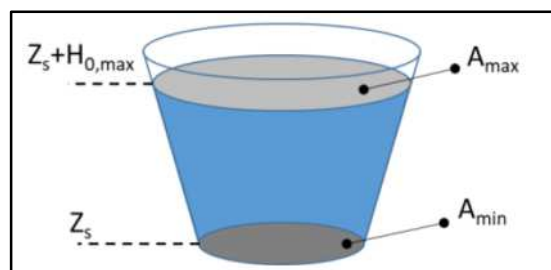


Fig.42. Modellazione di tank non cilindrici su WDNNetXL

3.10. IMPIANTI DI POMPAGGIO

La piattaforma WNetXL permette di determinare i parametri delle curve caratteristiche portata-prevalenza e portata-efficienza sia automaticamente, durante l'importazione dei dati da ".inp" file di EPANET, sia manualmente utilizzando le funzionalità di MS-Excel® a partire dai dati registrati dagli impianti stessi.

A questo proposito si sottolinea che, a differenza di EPANET o di altri software basati sullo stesso solutore, le suddette curve sono definite come funzioni continue e mai a tratti; ciò permette di superare problemi di natura numerica a favore della stabilità del calcolo e della robustezza dei risultati. La possibilità di visualizzare in MS-Excel® le stesse curve e modificarne i parametri manualmente offre, inoltre, la possibilità di verifica immediata ed, eventualmente, di rettifica da parte dell'utente dei dati di calcolo.

La figura 43 mostra la visualizzazione in MS-Excel® delle curve caratteristiche delle pompe utilizzate nel solutore idraulico.

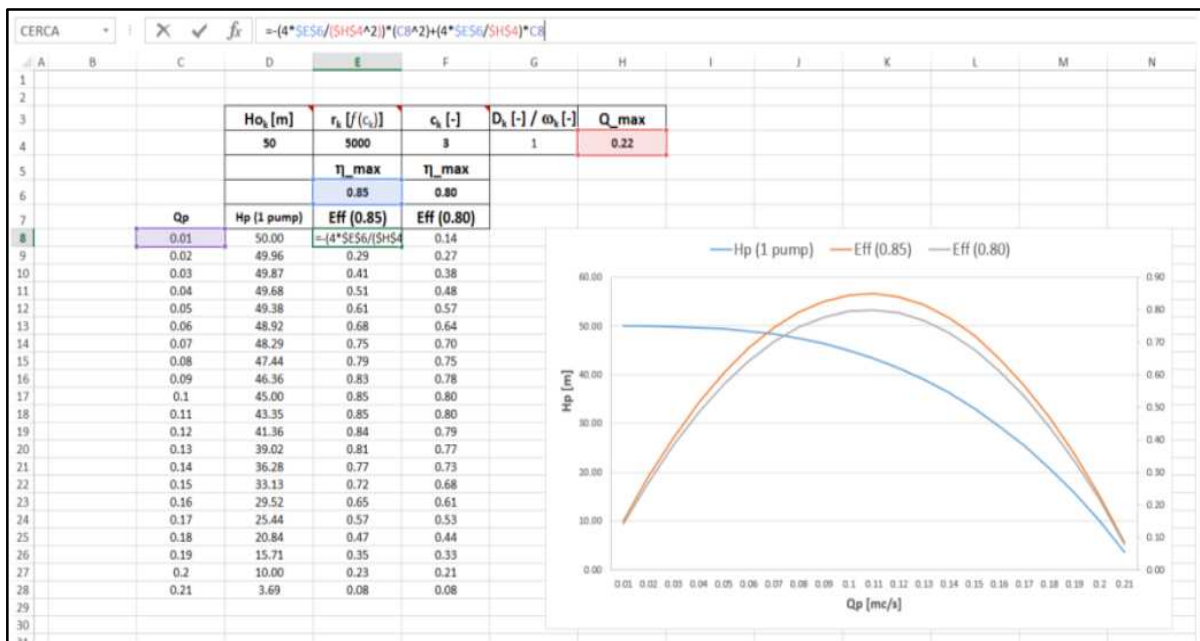


Fig.43. Verifica delle curve caratteristiche di pompe in WNetXL-WNetGIS.

a) Pompe a giri variabili (VSP): controllo locale e remoto

Nel caso di pompe a velocità variabile mediante inverter (VSP), la piattaforma WNetXL-WNetGIS permette di analizzare in MS-Excel® le relative curve di funzionamento come riportato in figura 44.

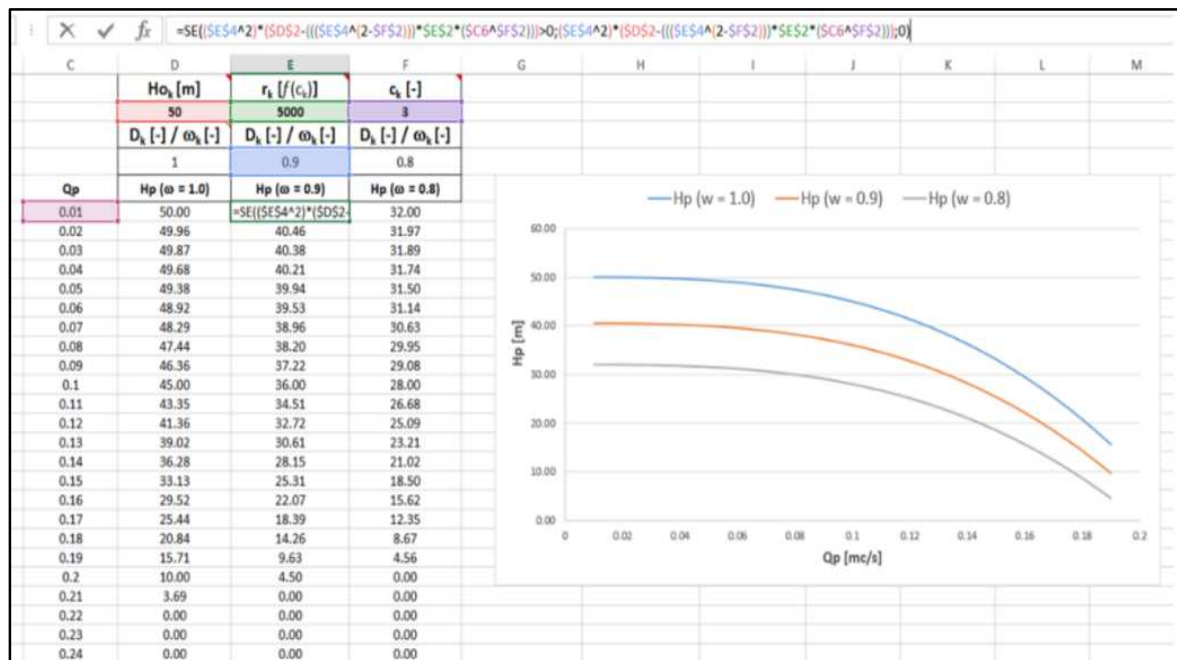


Fig.44. Verifica delle curve caratteristiche di pompe a velocità variabile in WDNNetXL-WDNNetGIS.

È possibile eseguire le seguenti simulazioni:

- VSP con pattern temporale del coefficiente di velocità (speed factor) assegnato: simulazione analoga a quella consentita in EPANET;
- VSP controllate dalla pressione in un nodo qualsiasi della rete (Remote Real Time Control, RRTC): la simulazione restituisce il pattern degli speed factors necessari a garantire la pressione target nel nodo sentinella. È possibile definire una pressione target fissa o variabile nel tempo.

La simulazione di uno schema RRTC consente di valutare a livello modellistico l'efficacia e l'efficienza di una soluzione di controllo remoto dell'inverter, prima di sostenere l'onere dell'installazione.

La figura 45 riporta, a titolo di esempio, il caso di elettropompa VSP installata sul tronco di alimentazione della rete idrica test "Apulian", il cui comportamento è legato alla pressione di controllo di un nodo sentinella interno alla rete (nodo 10).

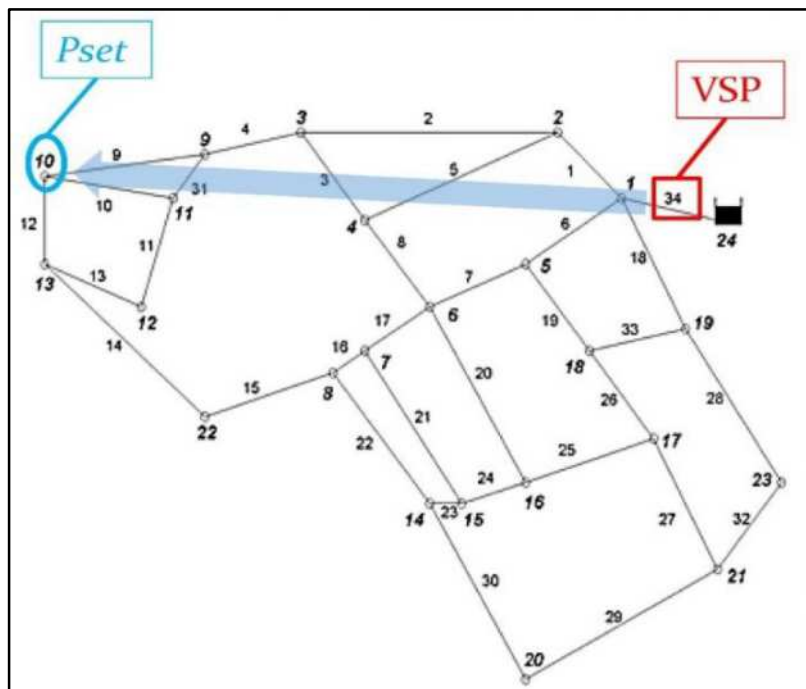


Fig.45. Rete Apulian: VSP sul tronco 34; pressione di controllo nel nodo sentinella.

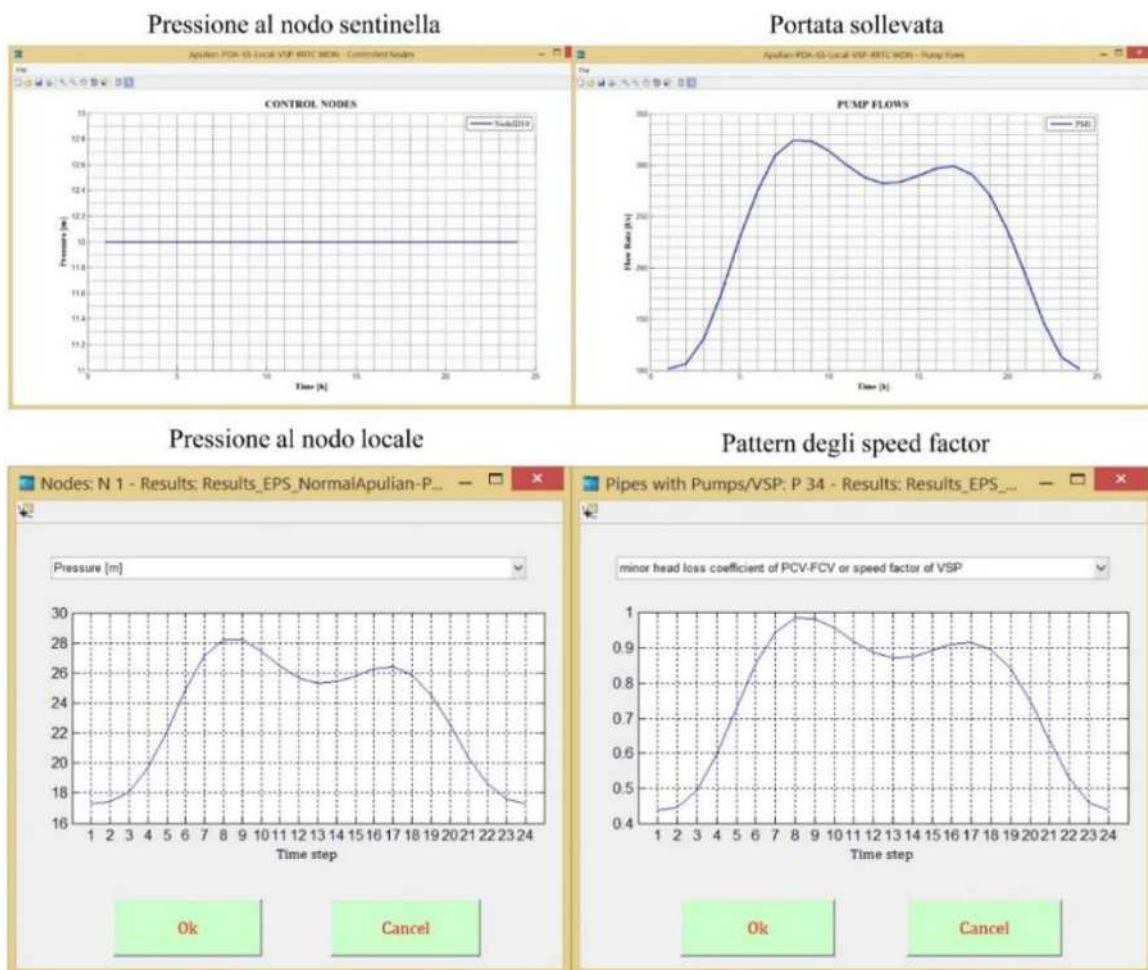


Fig.46. Pressione al nodo sentinella, portata sollevata, pressione al nodo locale e pattern degli speed factor per la configurazione adottata in Fig.45.

La figura 46 mostra la pressione al nodo sentinella e la portata sollevata, ma anche la pressione al nodo locale (N1) nonché il pattern degli *speed factor* (numero di giri) della VSP calcolato da WDNNetXL-WDNNetGIS per mantenere costante la pressione al nodo sentinella. Tale pattern degli speed factor potrebbe essere utilizzato come base per la regolazione delle stesse VSP, in assenza di un apparato di controllo remoto in “real-time”.

3.11. INSERIMENTO DATI RELATIVI A POZZI

I pozzi, oltre ad essere rappresentabili come impianti di “pompe” collegate a riserve idriche di capacità “infinita” e carico idrico costate (comunemente noti come “reservoirs”), possono essere rappresentati come pompe collegate a serbatoi a livello variabile, permettendo di simulare la variazione di livello all’interno dei pozzi, ovvero possibili effetti sul livello di falda. È inoltre possibile definire curve specifiche per le perdite di carico interne all’acquifero a partire dal livello indisturbato di falda, sulla base di prove di campo.

La figura 47 mostra il risultato della simulazione del pompaggio da un campo pozzi, ciascuno rappresentato da un “tank” (in giallo): a sinistra si riporta la portata totale ed a destra il livello nel pozzo.

Le stesse figure riportano, nei due grafici in basso, i risultati ottenuti eseguendo la medesima simulazione con EPANET in cui è evidente che l’instabilità nella simulazione del livello nei serbatoi si riflette nell’instabilità della portata totale estratta, ovvero nell’inattendibilità del risultato modellistico per supportare qualsiasi indicazione gestionale.

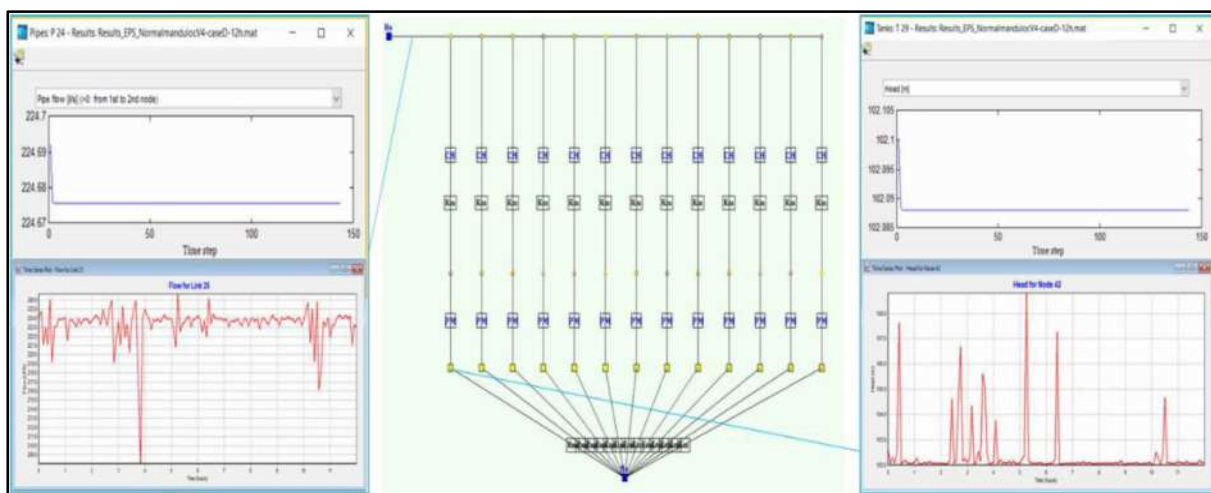


Fig.47. Confronto della simulazione del pompaggio da pozzi in WDNNetXL-WDNNetGIS ed EPANET.

3.12. VALUTAZIONE DELL'IMPORTANZA IDRAULICA DELLE SINGOLE TUBAZIONI

La valutazione preliminare dell'importanza idraulica delle singole tubazioni della rete acquedotto è eseguita utilizzando la classica *Edge Betweenness* (Girvan and Newman, 2002)²⁰, una delle metriche di centralità più appropriate per lo studio di sistemi infrastrutturali di distribuzione, adattata da Giustolisi et al. (2019)²¹ alle specifiche peculiarità delle reti acquedottistiche. La metrica proposta è utile all'analisi del comportamento idraulico di acquedotti al fine di valutare la relativa importanza delle singole tubazioni, cioè il comportamento idraulico emergente della rete (Simone et al.; 2019)²².

La metodologia permette di analizzare il “*dominio topologico*” dei sistemi acquedottistici in modo da comprenderne il ruolo rispetto al comportamento idraulico emergente, che funge da *supporto per attività di pianificazione e gestione*. La nuova metrica di centralità proposta nella piattaforma WNetXL presenta le seguenti peculiarità:

- a) considera il differente ruolo dei nodi all'interno della rete (serbatoi, nodi domanda, etc.);
- b) assegna un peso alle varie tubazioni, generalmente corrispondente alle caratteristiche di asset (per esempio lunghezza, diametro, resistenza idraulica, etc.) in modo tale da includere nell'analisi le caratteristiche del dominio;
- c) considera la presenza di dispositivi idraulici in termini di informazioni sulle direzioni del flusso.

Tale analisi consente pertanto di classificare la rilevanza dei tubi e di poter valutare in anticipo l'importanza di chiudere o aggiungere una tubazione nella struttura connettiva della rete in base alla posizione topologica (ed alle caratteristiche idrauliche), qualora richiesto.

La piattaforma WNetXL permette quindi di identificare preliminarmente le tubazioni con i valori più elevati della metrica di centralità nota come *Edge Betweenness*.

Queste tubazioni normalmente indicano, con una correlazione di oltre il 70%, quelle più rilevanti per l'idraulica del sistema in termini di portata simulata dal modello.

La figura 48 mostra le condotte con il 20% più elevato dei valori di *Edge Betweenness* per la rete di Reggio Calabria.

²⁰ Girvan, M. & Newman, M., 2002, Community structure in social and biological networks. Proceedings of the National Academy of Sciences 99 (12), 7821–7826

²¹ Giustolisi, O., Ridolfi, L., Simone, A. (2019). “Tailoring Centrality Metrics for Water Distribution Networks.” Water Resource Research, USA., 55, 2348–2369

²² Simone A., Ciliberti F.G., Laucelli D.B., Berardi L., Giustolisi O. (2020) Edge between-ness for water distribution networks domain analysis. Journal of Hydroinformatics, IWA-IAHR, UK, 22 (1): 121–131

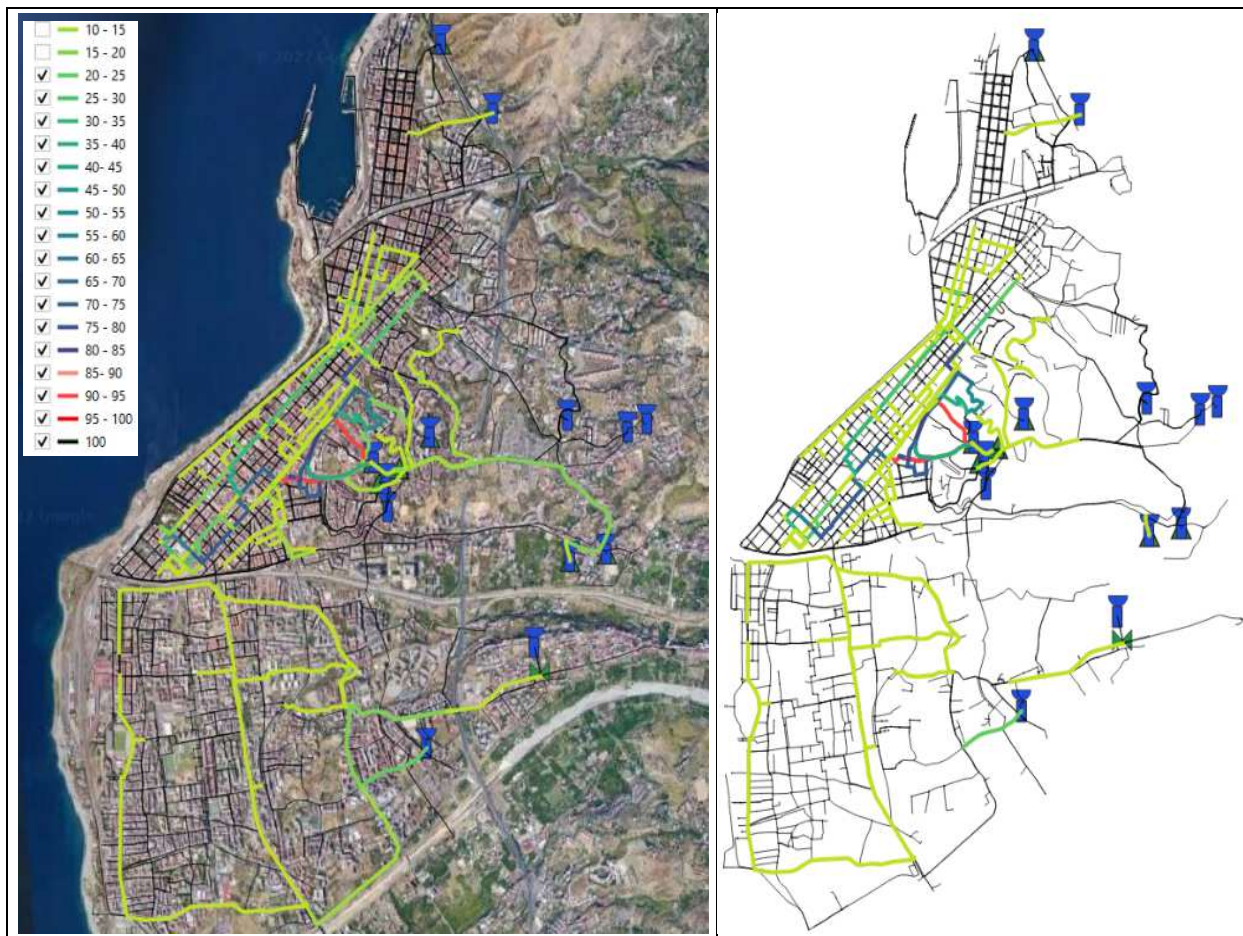


Fig.48. Analisi di rilevanza idraulica per la rete: Città di Reggio Calabria

3.13. ANALISI DEI DISTRETTI DI MONITORAGGIO (DMA)

La distrettualizzazione è una operazione di divisione della struttura a rete di un acquedotto in distretti per migliorarne la gestione.

La distrettualizzazione è intesa classicamente rispetto al monitoraggio dei bilanci idrici o di massa finalizzato, principalmente, all'identificazione delle perdite idriche e, per questo motivo, la tradizione tecnica parla di District Metered Areas (DMA). In verità, la distrettualizzazione è intesa anche con riferimento al monitoraggio delle pressioni in rete, finalizzato sia a conoscere lo stato pressorio in diverse parti del sistema per la gestione che a supporto della modellazione idraulica per la calibrazione dei parametri dei modelli, identificando in tal modo distretti di pressione.

La distrettualizzazione, pertanto, si configura come un'operazione basata sull'analisi topologica della rete, ovvero sull'identificazione dei distretti separati al bordo da dispositivi di misura (di pressione o di portata) o di sezionamento, installati all'interno di pozzetti. Nota la posizione dei

dispositivi in rete, così come definiti in precedenza, la funzione di analisi dei distretti di monitoraggio (DMA) in WDNNetXL-WDNNetGIS permette di:

- Identificare i moduli/segmenti assumendo i tagli “concettuali” in corrispondenza dei tronchi che possano ospitare dispositivi come proprietà dell’oggetto link;
- Identificare i DMA ottenuti dall’installazione di misuratori di portata o valvole di sezionamento per la specifica configurazione di distrettualizzazione;
- Identificare i distretti di pressione, definiti da misuratori di pressione al bordo.

Le figure seguenti mostrano l’analisi dei DMA progettati nella presente tesi per la Città di Reggio Calabria:

- *Segmentazione della struttura topologica a rete dell’acquedotto*: finalizzata a identificare i moduli/segmenti separati da tagli “concettuali”, in cui possano essere installati misuratori di portata o valvole di sezionamento; poiché non tutti i “tagli concettuali” ospiteranno dispositivi o valvole, i segmenti/moduli identificati rappresentano il numero massimo di possibili DMA;
- *Distrettualizzazione idraulica*: identificazione dei DMA per i bilanci di massa, mediante la posizione delle valvole di sezionamento e dei misuratori di portata (58 in figura 50);
- *Distretti di pressione*: identificazione dei distretti di pressione, ipotizzando nell’esempio di installare misuratori di pressione sia al bordo che all’interno di ciascun DMA per i bilanci di massa.

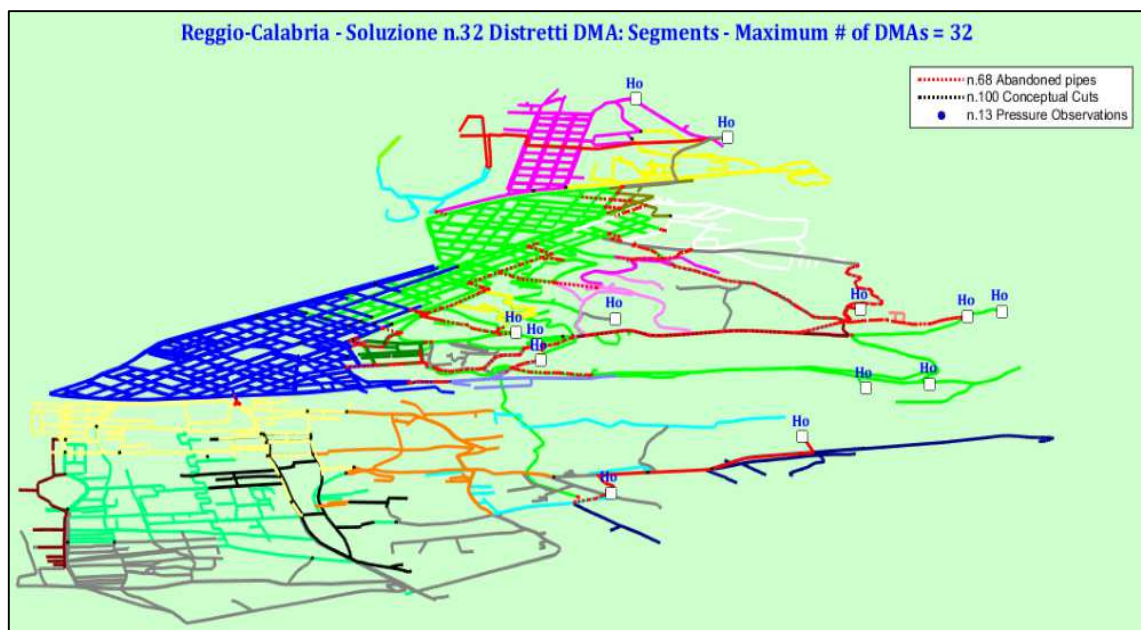


Fig.49. Analisi dei DMA – Numero di DMA di progetto per la rete acquedotto

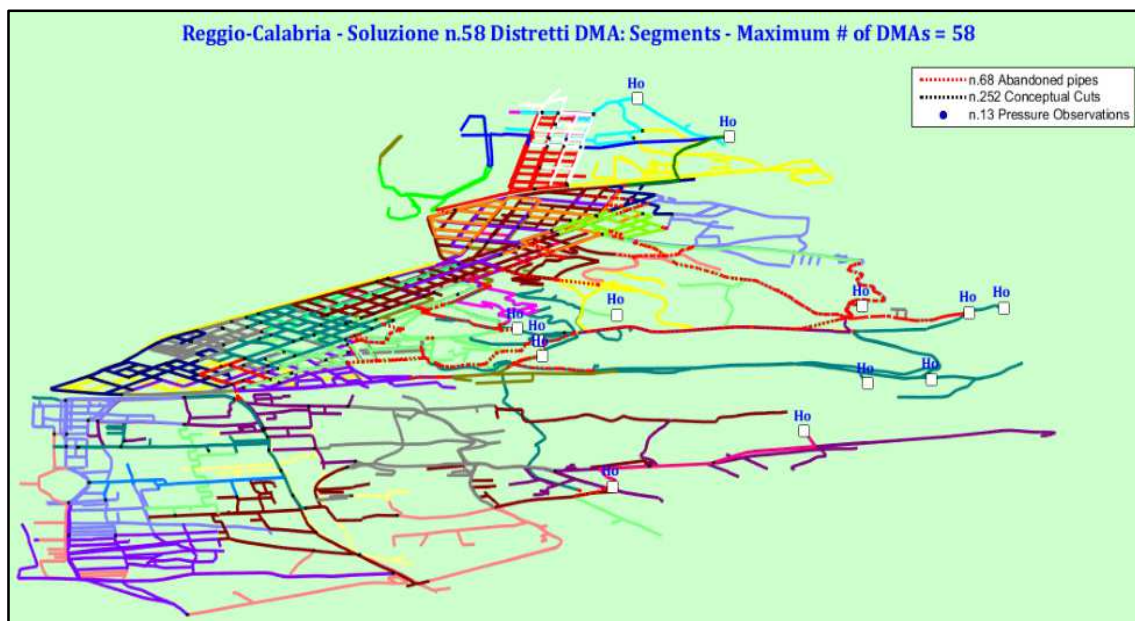


Fig.50. Analisi dei DMA – Numero massimo di DMA (n.58) per la rete acquedotto

3.14. ANALISI DI SCENARI DI FUNZIONAMENTO ANOMALI

Eventi di scoppio di condotte sono studiati come fenomeni casuali, associabili a cause interne o esterne al sistema ma, statisticamente correlate al livello di perdita ovvero al deterioramento della rete. La simulazione idraulica *pressure-driven* in WDNNetXL-WDNNetGIS permette di analizzare il funzionamento della rete in condizioni anomale, ovvero tali da indurre il rischio di possibili deficit di pressione e di erogazione alle utenze.

In particolare, nelle sue funzionalità di analisi idraulica è possibile valutare gli effetti di eventi di rottura (*bursts*) sia prima dell'intervento che durante i lavori di manutenzione che richiedono la chiusura di valvole di isolamento.

Si sottolinea che l'analisi di tali scenari, offrendo la possibilità di valutare l'impatto sull'erogazione alle utenze, sia totale (per isolamento della parte di rete interessata dai lavori) che parziale (per possibile deficit in alcune ore del ciclo operativo giornaliero), è determinante per valutare l'affidabilità del sistema, coerentemente con quanto indicato da ARERA con il macro-indicatore M2.

a) Modellazione di eventi di rottura (*bursts*)

La presenza di *burst* può avere effetti significativi sulla capacità di erogare il servizio in rete e sulla possibilità di eseguire un'analisi accurata (funzione *burst analysis* in WDNNetXL-

WNetGIS), che tenga anche conto della domanda erogata alle utenze e delle perdite volumetriche allo stesso tempo, elemento indispensabile per eseguire valutazioni di affidabilità del sistema.

La figura 51 riporta, a titolo di esempio, i risultati della “burst analysis” per la rete test “Apulian” in cui si assume una rottura nel tronco segnato in rosso.

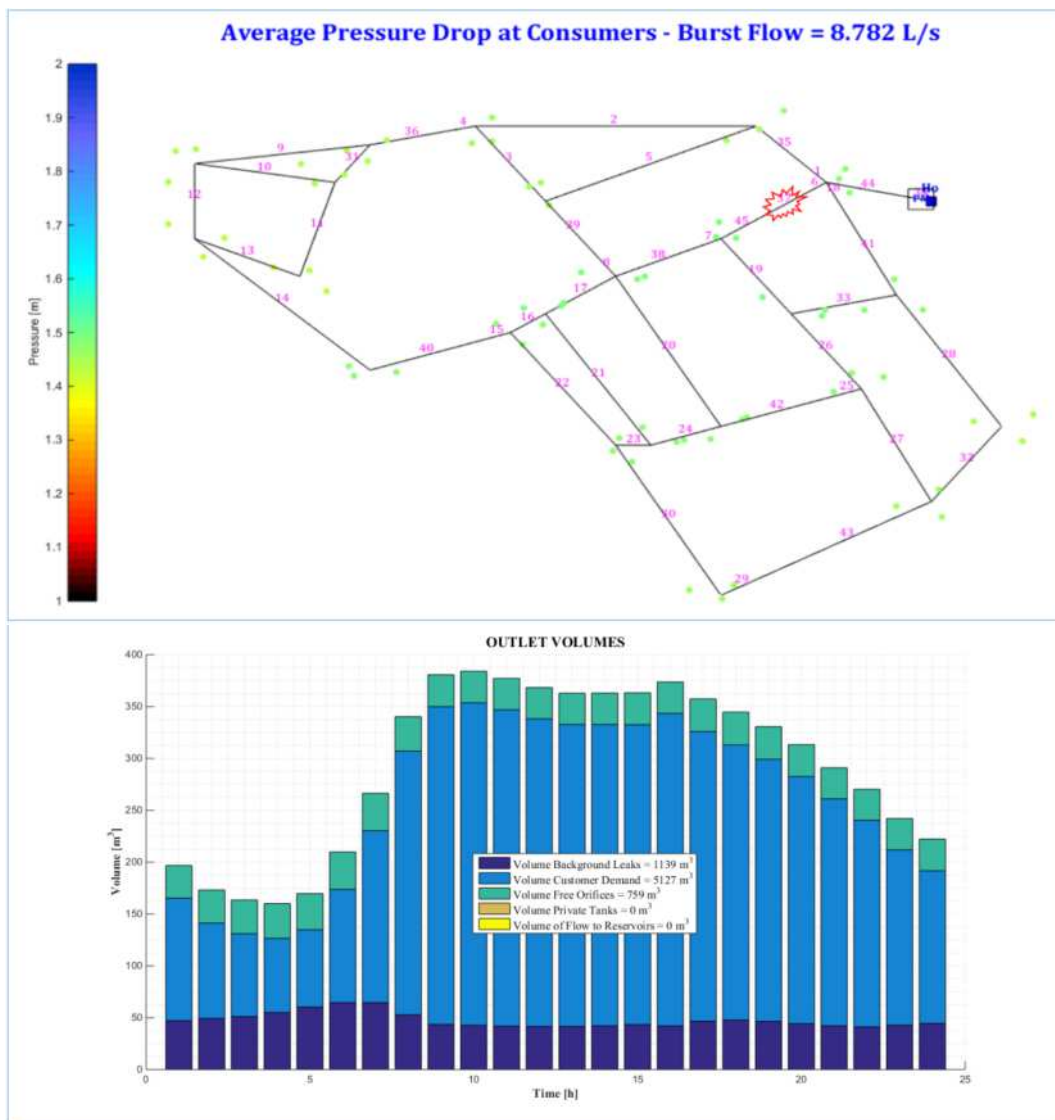


Fig.51. Analisi di uno scenario di rottura per la rete test “Apulian”

b) Modellizzazione idraulica con sezionamenti

La modellazione delle valvole chiuse di sezionamento dei DMA avviene considerando le reali variazioni topologiche della rete.

Come detto nel paragrafo 3.7 “Rappresentazione dei dispositivi idraulici e delle valvole come proprietà dell’oggetto link” la piattaforma WNetXL associa automaticamente alla valvola di

sezionamento un “tronchetto” localizzato nelle adiacenze del nodo laddove essa è realmente presente.

Ogni tipo di “simulazione” considera pertanto la chiusura di tale “tronchetto” e non di tutta la linea della tubazione. Stessa associazione automatica viene fatta per le valvole di isolamento, utili a separare porzioni di rete in concomitanza di interventi di manutenzione programmata o non programmata.

Si riporta a seguire l’esempio di come funzionano “topologicamente” le valvole di isolamento al fine di esemplificare anche il funzionamento topologico-idraulico delle valvole di sezionamento dei DMA.

La differenza fra *valvole di isolamento* e *sezionamento* risiede nel fatto che:

- le *valvole di isolamento* sono normalmente aperte e durante le analisi di fallanza isolano la porzione di rete interessata da lavori di manutenzione;
- le *valvole di sezionamento* sono sempre chiuse per configurare idraulicamente i diversi distretti.

La figura 52 mostra la divisione in segmenti per l’analisi del SVI e consente di scrivere su file MS-Excel® i dati che associano ad ogni segmento le valvole di isolamento da chiudere per isolarlo.

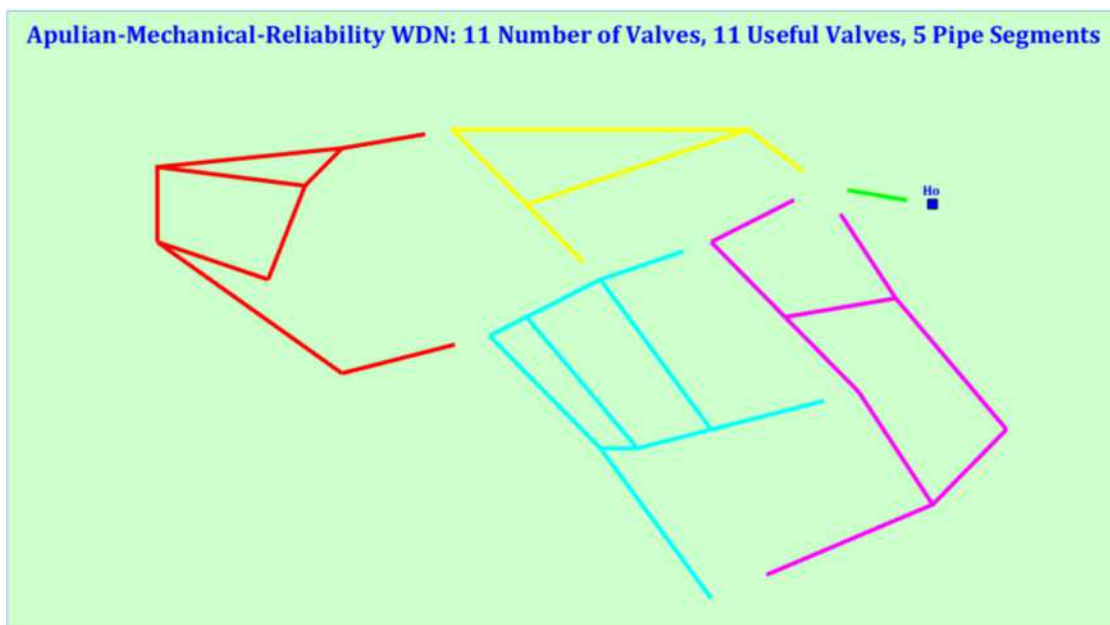


Fig.52. Divisione della rete in segmenti (colorati) a seguito della chiusura di valvole di isolamento (SVI).

Nell’ipotesi di guasto di un tronco che richieda la chiusura del distretto magenta, la simulazione idraulica automaticamente riconosce la porzione di rete da isolare e tutte le altre porzioni

eventualmente disconnesse non intenzionalmente, ovvero non più connesse a pompe o serbatoi. Il risultato della simulazione, in termini di pressioni è riportato in figura 53.

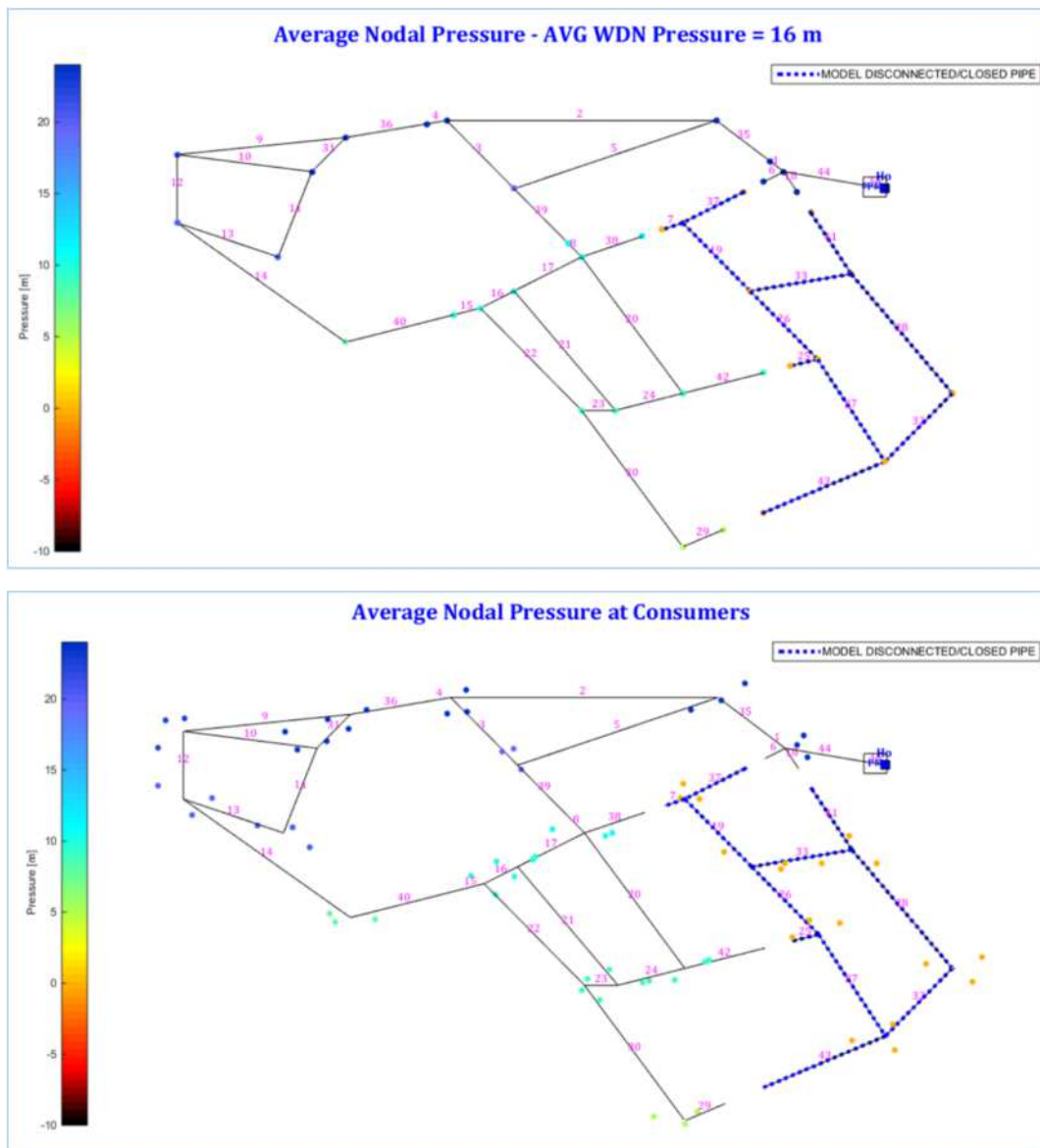


Fig.53. Analisi di uno scenario con interruzione di un segmento: pressioni nei nodi del modello e nei nodi utenza

CAPITOLO 4

APPROCCIO METODOLOGICO PER L'ASSET MANAGEMENT A SUPPORTO DELLA GESTIONE DEGLI ACQUEDOTTI

4.1. STRATEGIA DI ASSET MANAGEMENT - PREMESSA

Le attività oggetto della presente tesi di dottorato sono finalizzate ad implementare una strategia di “*asset management*” mirata ad un’ottimizzazione delle attività di gestione degli acquedotti urbani ed alla riduzione delle perdite idriche reali (perdite volumetriche), quale componente rilevante del consumo idrico, che è parte integrante della più generale attività di *efficientamento ed ottimizzazione* delle reti idriche di distribuzione.

La strategia che si andrà ad esporre puntualmente nei prossimi paragrafi è stata applicata al *caso studio* della rete acquedotto di distribuzione della zona centro della **Città di Reggio Calabria**.

L’obiettivo di “*asset management*” proposto verrà realizzato attraverso una ingegnerizzazione della rappresentazione del “sistema acquedotto” e delle attività di distrettualizzazione, controllo delle pressioni e monitoraggio delle grandezze idrauliche principali nelle reti di distribuzione idrica.

Nei paragrafi a seguire verrà illustrata una procedura razionale ed integrata per la modellizzazione idraulica, la distrettualizzazione, il monitoraggio delle grandezze idrauliche, il controllo delle pressioni, la riduzione delle perdite idriche volumetriche (diffuse) e la ricerca delle perdite idriche puntuali. A tale scopo verranno utilizzati i più recenti sviluppi della ricerca tecnico-scientifica integrata con i più moderni sistemi riferibili all’ampio campo della cosiddetta “*Artificial Intelligence*” per la gestione e valorizzazione dei dati e con i più recenti sviluppi della teoria delle reti complesse²³ per la gestione e valorizzazione dei dati già esistenti nella disponibilità del “gestore” relativi alla consistenza fisica degli acquedotti e la georeferenziazione dei contatori di utenza.

La procedura si caratterizza per essere razionale, replicabile ed integrata in quanto affronta contemporaneamente più problematiche tecniche a cui restituisce soluzioni ottime; tale

²³ Giustolisi, O., Ridolfi, L., Simone, A. (2020). Embedding the intrinsic relevance of vertices in network analysis: the case of centrality metrics. *Nature Scientific Reports*, 10, 3297.

metodo è stato concepito come supporto flessibile, efficace ed efficiente sia alla progettazione e gestione delle reti acquedottistiche sia alle attività di campo. La natura strutturata della procedura e la sua applicazione è stata già comprovata in contesti tecnici diversi, italiani e stranieri (Norvegia), offrendo garanzia di qualità di spesa nonché di rilevanza gestionale di prospettiva anche di lungo termine.

Un approccio razionale ai temi della gestione degli acquedotti e delle perdite idriche, infatti, non esclude il forte nesso idraulico e gestionale esistente tra la progettazione e la realizzazione della distrettualizzazione, la pianificazione dei sistemi di misura delle grandezze idrauliche, il controllo delle pressioni e la riabilitazione di sistema (sostituzione dei tronchi ammalorati o vetusti) ai fini della riduzione delle perdite idriche; tale approccio rappresenta piuttosto un incremento dell'affidabilità gestionale, da cui dipende strettamente la complessità del problema ingegneristico.

La gestione razionale del sistema idrico, inoltre, ha necessità di fondarsi sui più moderni paradigmi, approcci e strumenti di pianificazione e progettazione degli Acquedotti.

A titolo di esempio si può affermare che la *distrettualizzazione* degli acquedotti offre la possibilità di modificare l'assetto del sistema idrico, riconfigurandone i flussi, per ridurre le *perdite idriche* ed attinge sia dalla simulazione idraulica "avanzata" che dalla *teoria delle reti complesse* per la divisione ottimale "topologica" della rete acquedottistica. Pertanto, i più recenti paradigmi e strumenti idraulici e di ottimizzazione consentono pertanto di cogliere questa opportunità tecnica già normalmente utilizzata dagli operatori di campo (fontanieri etc.), anche se in modo empirico e non strutturato per la limitatezza di strumenti decisionali di supporto del passato.

La *razionalità* gestionale consente inoltre la *scalabilità e replicabilità* delle attività del gestore della rete ai diversi contesti urbani di varia scala nonché *l'integrazione* tra le diverse attività di pianificazione e progettazione. La *razionalità* gestionale rappresenta, pertanto, un requisito irrinunciabile per raggiungere l'*efficienza* gestionale dal punto di vista costi/benefici sia sul singolo acquedotto che sull'intero sistema, nonché l'*efficacia* rispetto a qualsiasi requisito tecnico o di servizio specifico o generale.

L'*integrazione* permette inoltre grande flessibilità nella realizzazione delle varie fasi di pianificazione e progettazione delle soluzioni tecniche ai diversi problemi gestionali,

favorendo la sinergia con le attività di campo. A titolo di esempio, la progettazione dei *distretti di misura per il monitoraggio dei bilanci idrici* (DMA o attività di distrettualizzazione), oltre a fornire indicazioni sulla progressiva realizzazione di misure, permette di affinare dinamicamente la *calibrazione del modello idraulico*, quale elemento metodologico imprescindibile, e consente di ottenere maggiore efficienza nella attività di ricerca delle perdite idriche “puntuali”.

D'altro canto, trattando alcuni aspetti del problema idraulico-gestionale in maniera separata da altri, si aumenta il rischio di ottenere soluzioni incoerenti rispetto ad una o più finalità pianificatorie/gestionali. Per esempio, allorquando si cerca di ridurre le perdite idriche volumetriche con il *controllo delle pressioni* e la *progettazione di DMA*, la *pianificazione della riabilitazione* può andare in senso opposto poiché la sostituzione delle tubazioni vetuste con quelle nuove ha come effetto l'aumento della capacità idraulica di sistema (causata anche dall'aumento della conduttanza delle tubazioni nuove) che fa aumentare proporzionalmente le pressioni nel sistema acquedottistico ed, in definitiva, le perdite idriche stesse che si aveva la finalità di ridurre.

La strategia proposta nella presente tesi affronta pertanto la complessità del problema tecnico attraverso l'utilizzo della modellizzazione idraulica avanzata unitamente ai più moderni paradigmi e strumenti per l'ottimizzazione integrata e multi-obiettivo ed all'analisi topologica delle reti. Tale strategia di ottimizzazione è in grado di disegnare soluzioni tecniche dotate di caratteristiche di flessibilità capaci di supportare in modo robusto le scelte di pianificazione, progettuali e gestionali ed anche le attività di campo, il tutto in senso di *efficacia* ed *efficienza*.

L'obiettivo di *asset management* attraverso la riduzione delle perdite idriche, è stato sviluppato pertanto mediante una strategia di progettazione integrata della distrettualizzazione, controllo delle pressioni, monitoraggio idraulico e riabilitazione. Nella strategia proposta risulta fondamentale una ottimale modellizzazione fenomenologica avanzata del comportamento idraulico dei singoli acquedotti da realizzarsi attraverso un modello di progetto che rivolge particolare attenzione alle componenti che determinano i bilanci idrici o di massa integrando nelle analisi idrauliche le perdite idriche reali che hanno effetti volumetrici (perdite idriche volumetriche) in funzione delle pressioni.

Tale modellizzazione idraulica è un supporto irrinunciabile per la progettazione integrata del sistema che sia allo stesso tempo:

- ✓ **Efficiente:** con l'obiettivo di raggiungere la qualità dell'investimento attraverso la minimizzazione dei costi rispetto al risultato;
- ✓ **Efficace:** rispetto a qualsiasi vincolo tecnico imposto, così come delineato dalla Deliberazione dell'ARERA.

L'utilizzo di procedure di ottimizzazione vincolate e multi-obiettivo consente pertanto di ottenere soluzioni progettuali *efficienti* (costi/benefici) ed *efficaci* (vincolate alle specificità delle scelte ingegneristiche rispetto all'acquedotto oggetto di studio), che rappresentano un supporto alla decisione per il progettista, ma anche utili al gestore nelle prospettive gestionali della rete.

Quanto sopra esposto può rappresentare una linea guida strategica finalizzata ad una gestione moderna degli acquedotti, coerentemente al cambiamento gestionale in atto in Italia ed a quanto delineato dall'Agenzia di Regolazione per Energia Reti ed Ambiente (ARERA) con l'introduzione degli indicatori per la qualità tecnica degli acquedotti: *perdite idriche (M1)*, *interruzione del servizio (M2)* e *qualità dell'acqua (M3)*.

Il presente documento riporta tutte le fasi di studio, analisi e verifica idraulica delle reti acquedotto di supporto alle attività progettuali e gestionali fondate su una metodologia di "asset management" strutturata per essere *razionale, replicabile, scalabile, efficiente, robusta e flessibile*.

L'ingegnerizzazione dei sistemi acquedotto proposta si basa su una *modellizzazione ed analisi idraulica avanzata*, sulla *distrettualizzazione e controllo ottimale delle pressioni*, e sulla riabilitazione dei sistemi attraverso piani ottimi di sostituzione delle tubazioni, il tutto finalizzato ad ottenere una efficace gestione e riduzione delle perdite idriche reali.

La metodologia proposta consente di valutare la riduzione delle perdite idriche reali per le varie tipologie di ciclo operativo scelto (estivo, invernale, festivo, feriale, etc.) attraverso il macro-indicatore M1a (perdite lineari) di ARERA. Tutte le analisi e le ottimizzazioni di sistema inglobano infatti tali informazioni e riescono ad integrarle nello studio della variabilità del controllo delle pressioni e delle perdite idriche nel funzionamento globale della rete.

In particolare, al fine di poter valutare per ogni possibile soluzione tecnica le relative perdite idriche reali in funzione della specifica domanda di utenza complessiva e dello specifico pattern, vengono scelti un numero adeguato di cicli operativi giornalieri ritenuti rilevanti per la fase di gestione e la caratterizzazione del sistema idraulico. La scelta dei cicli operativi delle reti è sempre influenzata dalla disponibilità di misure di portata e pressione sincrone dei sistemi acquedotto oggetto di studio.

La stima della riduzione delle perdite idriche così ottenuta risulta robusta rispetto ad una proiezione annuale e cautelativa poiché integra informazioni sui cicli operativi più critici, cioè generalmente caratterizzati dalle domande di utenza maggiori (*ad esempio 5 cicli giornalieri di cui 4 invernali ed uno estivo*).

La riduzione delle perdite idriche reali può essere ottenuta attraverso l'integrazione del controllo della pressione e della distrettualizzazione, in relazione allo stato di fatto in cui si trova lo specifico acquedotto oggetto di studio. Nella metodologia razionale proposta, per i motivi tecnico-idraulici riportati in modo approfondito nei paragrafi a seguire, la riabilitazione ottima di sistema deve essere implementata a valle del controllo di pressione della rete integrato con la distrettualizzazione dell'intero sistema. La riabilitazione è infatti un'attività che, seppur di aiuto nel recupero delle perdite idriche reali, ha una finalità di orizzonte strategico per l'asset management.

Le attività di analisi e di supporto alla gestione degli acquedotti discusse nel presente capitolo sono:

- **Analisi del dominio topologico** della rete finalizzata alla identificazione dei percorsi di alimentazione e distribuzione idrica principali all'interno delle reti;
- **Calibrazione innovativa del modello** di *perdite idriche reali (volumetriche)*;
- Studio di interventi di miglioramento funzionale e gestionale utili alle attività di *asset management*;
- **Pianificazione della distrettualizzazione idraulica** integrata con il controllo delle pressioni, in uno schema di ottimizzazione *bi-obiettivo* finalizzato a minimizzare il numero di misure di portata per i bilanci idrici di distretto e massimizzare la riduzione delle *perdite volumetriche*, garantendo i requisiti minimi di servizio per l'erogazione alle utenze;

- **Pianificazione degli interventi di riabilitazione della rete distrettualizzata** che *minimizzino* il costo di sostituzione e *massimizzino* la riduzione delle perdite volumetriche.

Per ciascun intervento proposto, inoltre, verranno messi in evidenza gli elementi tecnici e gestionali a supporto del Gestore nelle diverse fasi del processo.

Le attività precedenti, infatti, si sostanziano con la realizzazione di un sistema di supporto alla decisione per tutte le scelte progettuali e gestionali che andrebbero realizzate ed ottimizzate sempre di concerto con il Gestore in funzione del budget a disposizione.

4.2. NUOVO APPROCCIO ED ITER METODOLOGICO PER L'ASSET MANAGEMENT A SUPPORTO DELLA GESTIONE DELL'ACQUEDOTTO

Per raggiungere l'obiettivo di *asset management* attraverso la riduzione delle *perdite volumetriche*, è stata sviluppata una *strategia basata sui presupposti metodologici riportati* a seguire e necessari per il supporto alla progettazione della *distrettualizzazione, controllo delle pressioni, monitoraggio idraulico e riabilitazione* che ha come legante la modellizzazione *avanzata* del comportamento idraulico dei singoli acquedotti ovvero la *calibrazione di un modello di progetto* con un paradigma innovativo basato sui bilanci idrici, integrando nelle analisi idrauliche le *perdite volumetriche in funzione delle pressioni*.

Tale *modellizzazione fenomenologica avanzata del comportamento dei singoli acquedotti* riveste il ruolo di *strumento metodologico* di supporto alle diverse attività di progettazione. Vengono in tal modo superati i limiti della *modellazione classica*, di EPANET e dei software package commerciali basati su tale motore idraulico, consentendo in modo unico di considerare le *perdite volumetriche* in funzione della pressione media, a livello dei singoli tronchi ed, in generale, il funzionamento più realistico del sistema. Possono ad esempio essere considerate le differenti tipologie di utenza presenti nella rete acquedotto (autoclavi con serbatoi privati, reali altezze geodetiche dei singoli contatori georeferenziati, etc.) ovvero le condizioni di pressione insufficiente per il corretto servizio alle utenze stesse.

L'utilizzo di procedure di ottimizzazione multi-obiettivo e vincolate ha consentito, basandosi su analisi idrauliche avanzate con particolare attenzione alle componenti che determinano i bilanci idrici di massa, di poter ottenere soluzioni progettuali *efficienti* (nel

rapporto costi/benefici) ed *efficaci* (vincolate alle specificità dei singoli acquedotti), ma anche *robuste* e *flessibili* nell'applicazione, di supporto sia alle scelte progettuali che in prospettiva gestionale per il gestore.

I dati topologici, valorizzati integrando le informazioni provenienti dal SIT aziendale con i modelli idraulici esistenti rappresentano la base per l'analisi del dominio topologico e per la segmentazione topologica in *distretti virtuali* ovvero per l'identificazione delle postazioni candidate ad ospitare dispositivi idraulici, indicando postazioni note a priori del sistema (es. all'ingresso della rete e al serbatoio). Le soluzioni vengono successivamente elaborate in *post-processing* in prospettiva per la successiva progettazione dei distretti DMA.

Gli stessi dati topologici, unitamente ai dati idraulici relativi ai consumi delle singole utenze e alle misure delle grandezze idrauliche monitorate dal Gestore (in particolare della portata totale immessa nelle reti), vengono successivamente utilizzati per eseguire la calibrazione innovativa del sistema acquedotto. Al fine di ottenere un modello robusto a supporto delle attività gestionali e di pianificazione, la calibrazione viene condotta sulla base di un numero minimo di cinque cicli giornalieri reali rappresentativi di diversi stati di funzionamento tipici del sistema. Tale condizione permette di poter definire il pattern di domanda caratteristico e le relative domande medie giornaliere, nonché i parametri del modello delle *perdite volumetriche* e le resistenze idrauliche delle linee di alimentazione principali. La stessa calibrazione consente in tal modo di poter valutare i volumi di perdite idriche della rete oggetto di studio per il periodo considerato.

In parallelo la strategia di asset management proposta prevede l'esecuzione della *segmentazione* della rete, ovvero l'identificazione di *distretti virtuali* basati sulla sola informazione topologica della rete di distribuzione.

Tutte le attività suddette concorrono a rappresentare gli elementi caratterizzanti del funzionamento della rete mediante il modello idraulico gestionale, propedeutico alla successiva progettazione ed alla pianificazione della riabilitazione della rete.

L'approccio di asset management e l'iter metodologico proposto nella presente tesi è stato concepito al fine di aumentare la robustezza dell'iter decisionale e progettuale, con particolare riferimento alla distrettualizzazione della rete.

La figura n.54 di seguito riportata schematizza il *flow-chart* dell'iter metodologico utilizzato e proposto nei paragrafi a seguire:

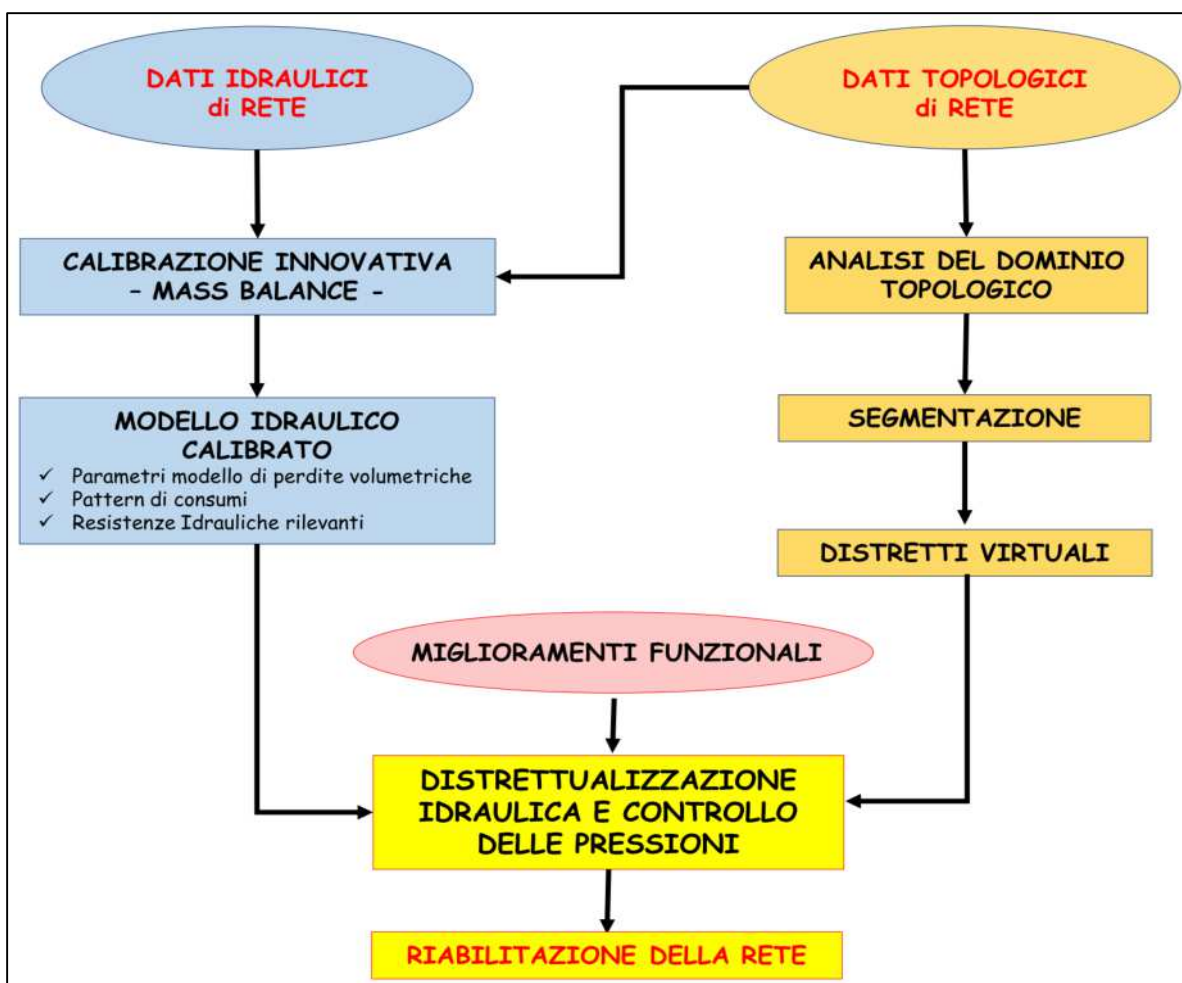


Fig.54. Flow-Chart dell'iter metodologico innovativo proposto per la gestione degli acquedotti urbani in Calabria.

Alla base dell'iter metodologico proposto vi è pertanto la modellazione idraulica avanzata della rete acquedotto oggetto di studio che, nella presente tesi di dottorato, è stata effettuata utilizzando i servizi di Digital Water attraverso la modellazione del gemello digitale (Digital Twin) della rete reale, generato dalla piattaforma WNetXL.

Il Digital Twin della rete acquedotto studiata fornisce una rappresentazione digitale della topologia e del comportamento idraulico del sistema, integrata in ambiente GIS con georeferenziazione di qualsiasi elemento del sistema, inclusi i contatori di utenza attivi e non attivi, utile per le finalità progettuali e gestionali.

Questo avviene in analogia alla comune esperienza digitale sulle “applicazioni” (App) di uno smartphone che rispondono a specifiche richieste dell'utente in modo immediato pur

utilizzando tecnologie sofisticate di analisi dei dati. I servizi di Digital Water riescono a fornire analogamente una risposta tecnica immediata a supporto delle diverse attività gestionali riuscendo a dare risposte immediate ai tecnici (del Gestore e/o dell'Ente proprietario della rete acquedotto) a supporto delle diverse attività di rilevanza sia progettuale che gestionale, integrando *in modo opportuno* la *modellazione idraulica avanzata*, le *tecniche di intelligenza artificiale*, la *complex network theory* e l'ottimizzazione *information-based* o *evolutiva*.

I servizi di *Digital Water* utilizzati nell'ambito della presente tesi vengono di seguito sommariamente descritti:

- ***DigitalWaterDomain_Analyzer***: Utilizzato per l'analisi del dominio topologico del sistema. Esso identifica il funzionamento idraulico della rete mediante indicatori derivati dalla teoria delle reti complesse (*complex network theory - CNT*) opportunamente riformulati per le reti di acquedotto.

L'analisi permette di identificare i percorsi principali ed i nodi più rilevanti nelle reti prima di eseguire la modellazione idraulica del sistema. Tali informazioni sono di supporto a diverse fasi della metodologia adottata ed in particolare:

- 1) per la calibrazione delle resistenze idrauliche dei tronchi principali nell'ambito di una strategia innovativa di calibrazione del modello idraulico basata sui bilanci di massa;
- 2) per la progettazione di interventi di miglioramento funzionale;
- 3) a supporto della fase di segmentazione topologica preliminare alla distrettualizzazione idraulica.

La visualizzazione in GIS delle analisi effettuate consente di avere una preliminare ed immediata visione delle proprietà topologiche della rete che ne condizionano il funzionamento idraulico. Tale funzione è utile ai tecnici per poter identificare i percorsi rispetto ai quali porre maggiore attenzione e per guidare le successive scelte progettuali.

- ***DigitalWaterMass_Calibration***: Utilizzata per la calibrazione dei modelli con approccio innovativo basato sul concetto di "*bilancio di massa*" ovvero mediante la separazione della componente stocastica di efflusso, dovuta ai consumi di utenza, da

quella deterministica delle perdite idriche reali rappresentate nella modellazione idraulica avanzata.

Tale approccio utilizza le misure ed i dati di consumo alle singole utenze forniti dal Gestore della rete per l'anno di riferimento al fine di poter calibrare il modello di *perdite volumetriche* delle singole tubazioni insieme all'identificazione dei pattern di consumo. Vengono in tal modo considerate nella calibrazione sia la propensione alla perdita di ciascuna condotta, modellata con tecniche di intelligenza artificiale, sia la variabilità della domanda idrica durante più cicli operativi giornalieri reali corrispondenti al campionamento di differenti stati idraulici rappresentativi del funzionamento della rete.

- ***DigitalWaterVirtualDMA*** e ***DigitalWaterSegment_Viewer***: Utilizzata per l'ottimizzazione e la visualizzazione delle soluzioni di *segmentazione topologica* che identificano diverse configurazioni in termini di numero di *distretti virtuali* (concettuali) *versus* postazioni (pozzetti) candidate ad ospitare i dispositivi di seguito sommariamente riportati:
 - postazioni per inserimento “*valvole di sezionamento*” per confinare i distretti e riconfigurare i flussi idrici in rete;
 - postazioni per inserimento “*misuratori di portata*”;
 - postazioni per inserimento “*valvole di riduzione della pressione*”.

La visualizzazione in GIS delle soluzioni ottenute, integrabili con le informazioni derivanti dall'analisi del dominio topologico della rete, consente di poter modificare la posizione delle postazioni candidate (pozzetti), per esempio nel rispetto di interferenze esistenti o per eventuali vincoli di varia natura (urbanistici, ambientali, archeologici etc.), prima di passare alla successiva fase di distrettualizzazione vera e propria (ovvero idraulica).

- ***DigitalWaterDMA_Design*** e ***DigitalWaterDMA_Analyzer***: Utilizzato per la pianificazione ottima e per la visualizzazione di diverse soluzioni di *distrettualizzazione idraulica*, ovvero dei distretti di misura (*DMA*).

La pianificazione ottima dei distretti attribuisce alle postazioni di cui al precedente punto le valvole di sezionamento o le misure di portata, ottimizzando

contemporaneamente i set-point delle valvole di riduzione della pressione, laddove previste.

Il servizio di analisi, invece, permette di poter confrontare e scegliere in modo ottimale in ambiente GIS la configurazione dei DMA, utile anche nella fase di concertazione con il Gestore e/o durante l'esecuzione dei lavori.

Il servizio consente di identificare sia le postazioni di misura da attivare prioritariamente dal Gestore in funzione del budget a disposizione, sia quelle di prospettiva, predisposte all'attivazione futura di DMA ovvero utili per l'esecuzione di step test all'interno dei DMA in progetto senza la necessità di scegliere successivamente la posizione delle ulteriori chiusure. Lo stesso servizio di visualizzazione consente, inoltre, valutazioni di carattere metrologico di supporto alla scelta dei misuratori di portata.

- **DigitalWaterRehabilitation:** Utilizzata quale supporto alla scelta dei piani di riabilitazione delle condotte di rete. Il servizio consente una valutazione preventiva degli interventi di sostituzione di tronchi, utile nelle fasi di interlocuzione con il Gestore, in termini di riduzione attesa delle *perdite volumetriche*, investimento richiesto ed ulteriori diversi indicatori di efficienza. Il tecnico può indicare direttamente i tronchi pianificati per la sostituzione, ad esempio in base al valore di M1a del singolo tronco, oppure utilizzare piani di riabilitazione esistenti, come quelli ottimali generati dal modulo *WNetXL Design*.

Per come già esposto al Capitolo n.3 della presente tesi, il sistema utilizzato per l'elaborazione del modello e per le diverse attività di supporto alla progettazione è **WNetXL**, frutto della ricerca-tecnico-scientifica italiana ed in particolare del Politecnico di Bari. Esso si basa sulla modellizzazione idraulica avanzata degli acquedotti che consente l'analisi del funzionamento realistico di sistema per le diverse attività di pianificazione, progettazione e gestione sempre maggiormente importanti ai nostri giorni, come, ad esempio:

- 1) la valutazione delle perdite volumetriche a livello di singole condotte in funzione dello stato pressorio;
- 2) la valutazione delle condizioni di pressione insufficiente per il corretto servizio all'utenza;

3) la simulazione dei sistemi di autoclavi; ecc.

Nella fase di costruzione del modello, i dati idraulici e fiscali relativi ai singoli contatori di utenza presenti nel SIT vengono acquisiti dal data-base del Gestore ed importati e resi disponibili nel modello in WDNNetXL come database separato. Ciò permette di poter considerare ciascuna utenza singolarmente durante le simulazioni idrauliche, senza la necessità di aggregazione delle domande idriche nei nodi del modello.

Questo consente altresì di poter separare le utenze attive da quelle non attive (pur mantenendo l'informazione di queste ultime) e di poter specificare per ciascuna utenza la tipologia di contratto. È importante evidenziare che la possibilità di indicare le utenze attive risulta di particolare rilevanza nel caso di reti stagionali (come quelle calabresi) in cui esistono utenze domestiche di tipo non residenziale che concorrono al consumo idrico solo durante il periodo estivo ed utenze domestiche residenziali che variano la domanda in funzione della stagione. Tali informazioni, quindi, permettono di poter modificare agevolmente lo scenario dei consumi nel modello idraulico.

4.3. CALIBRAZIONE BASATA SUL CONCETTO DI MASSA ED ANALISI IDRAULICA DEI RISULTATI SUL MODELLO IDRAULICO CALIBRATO

La *calibrazione* del modello idraulico avanzato, che include le perdite volumetriche a livello di singola tubazione in funzione della pressione, è stata eseguita utilizzando un approccio innovativo basato sul concetto di “bilancio di massa”.

La strategia adottata si prefigge principalmente l'identificazione:

- dei parametri del modello di perdita idrica volumetrica;
- del *pattern* di domanda dell'utenza insieme alla variabilità della domanda media giornaliera con riferimento ai cicli operativi scelti.

La calibrazione del modello idraulico permette di separare, nella portata immessa complessiva, la componente “*statistica*” della domanda, ovvero quella legata ai consumi di utenza, da quella “*deterministica*” delle perdite idriche volumetriche, ovvero funzione delle pressioni medie nelle tubazioni.

A tal fine, dopo aver caratterizzato le tipologie di utenze, almeno nei loro valori medi di richiesta idrica in un ciclo operativo giornaliero o settimanale, devono essere misurate le portate immesse in rete dalle sorgenti idriche, dai serbatoi e dai sistemi di pompaggio.

La calibrazione dei modelli idraulici è pertanto fortemente influenzata dai “*pattern di domanda*” che vengono determinati nei modelli *steady-state* (stazionari) di moto uniforme tecnico, come integrazione alla scala temporale stazionaria degli impulsi alla scala reale di utilizzo dell'acqua. Viene pertanto assegnato lo stesso *pattern di domanda* a gruppi omogenei di *tipologia di utenza*, alla scala di acquedotto o di sottoreti o, anche, a quella minore di *District Metering Areas* (DMAs) laddove siano attivate misure di bilancio idrico nello specifico sistema acquedottistico.

Dal punto di vista statistico gli impulsi, alla scala reale di utilizzo della risorsa idrica, seguono la *distribuzione di Poisson*; tali impulsi, integrati nel tempo e nello spazio considerando gruppi omogenei di tipologia di utenza, definiscono la statistica Gaussiana della domanda alla scala del modello.

I fattori dei *pattern di domanda*, quindi, moltiplicati per la domanda di base (*media giornaliera*), forniscono i valori medi “stazionari” alla scala definita nel modello che, usualmente, va da qualche minuto ad un'ora.

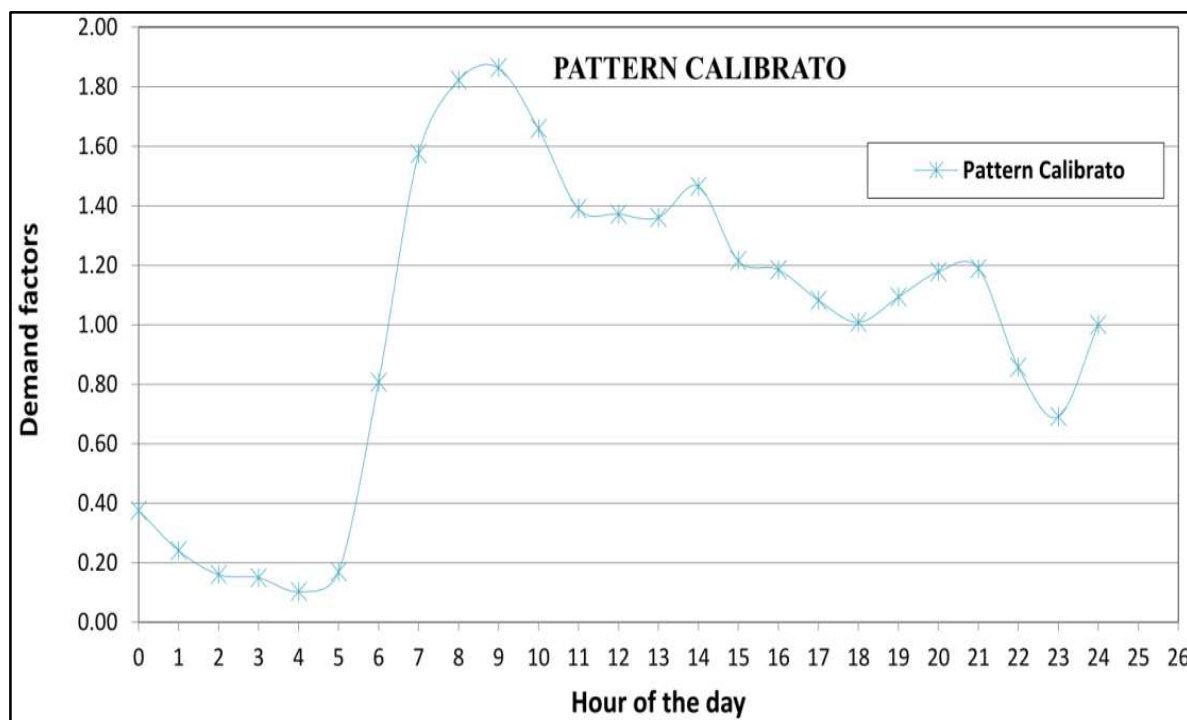


Fig.55. Pattern di domanda sulle 24 ore del modello idraulico – Caso Studio Città di Reggio Calabria

La variabilità giornaliera dei *pattern di domanda* si ripercuote sui valori di pressione media alla *scala del modello*. La misura della pressione, inoltre, non essendo una variabile di stato rappresentativa dei fenomeni di massa che caratterizzano l'acquedotto, è fortemente variabile alla scala dei secondi in quanto influenzata dalla richiesta idrica ad impulsi e dal “naturale” moto vario sempre presente nei sistemi acquedottistici.

La *calibrazione di un modello stazionario* deve considerare, pertanto, quanto sopra riportato al fine di essere utilizzata a “*livello gestionale*” per l'interpretazione corretta della fenomenologia del reale funzionamento dell'acquedotto.

La variabilità giornaliera dell'immesso in rete, che si traduce nei *patterns di domanda* del sistema, riveste un ruolo determinante nella calibrazione idraulica del modello.

Pertanto, la calibrazione di un “*modello robusto*”, a supporto delle attività gestionali delle reti acquedotto e di pianificazione della riabilitazione delle condotte, deve partire da indagini sulle modalità di funzionamento dell'acquedotto nel ciclo socioeconomico giornaliero, ovvero dall'approfondimento dei “*pattern giornalieri*” caratteristici all'interno di una annualità, che contenga al suo interno anche tutte le tipologie di festività e stagionalità.

Le perdite volumetriche e la domanda, infatti, variano nei cicli operativi scelti; la calibrazione ha la finalità pertanto di definire, da un lato il modello delle perdite volumetriche e, dall'altro, i *pattern di domanda* caratteristici delle differenti tipologie di giorni (festivo, feriale, invernale, estivo, Natale, Pasqua, etc.).

Questo può avvenire attraverso le misure di immesso nella rete acquedottistica e, laddove siano attivati DMA, attraverso le misure di portata ai bordi del sistema. Avendo a disposizione tali dati la calibrazione consente anche la definizione dei *pattern di domanda* e del *modello di perdite volumetriche* in sottopozioni di sistema a vantaggio, ad esempio, delle scelte di riabilitazione.

In questo quadro la calibrazione delle resistenze idrauliche e l'uso della pressione media alla scala temporale rivestono un aspetto di complementarità nel processo. Infatti, le pressioni nei nodi all'estremo delle poche condotte che fungono da elementi di trasporto dell'acqua nel sistema (condotte di avvicinamento dai serbatoi/pozzi alla rete di

distribuzione) sono utili a specificarne, in modo più accurato, le relative resistenze idrauliche e, soprattutto, vengono utilizzate come verifica dello stato idraulico del sistema.

Le pressioni interne all'insieme di condotte in una determinata zona della rete, invece, sono utili a determinare i "livelli" generali di pressione delle aree specifiche essendo il loro andamento determinato dalla "stocastica spaziale" della domanda.

Tali valori di pressione interna possono essere inoltre anche un utile indicatore di anomalie nel sistema come, ad esempio, indice dell'esistenza di valvole parzialmente o totalmente chiuse ovvero di perdite volumetriche rilevanti anche se non individuate.

A tal proposito si osserva che ogni ipotesi effettuata a priori su *pattern* di alcune tipologie di utenza (es. commerciale, industriale, pubblico), laddove non supportate da misure di dettaglio per tali utenze, rappresentano un elemento di distorsione nell'identificazione del "pattern di domanda dominante" osservabile dalle misure di portata in ingresso alla porzione di sistema in esame. Pertanto, l'identificazione di un *pattern*, ad esempio industriale, sarà possibile esclusivamente per quelle porzioni di rete in cui esso è *dominante* (es. zone industriali) e per le quali sia disponibile la relativa misurazione della portata in ingresso.

Con riferimento alle attività oggetto della presente tesi di dottorato l'obiettivo, quindi, è stato quello di calibrare per stati diversi, raccogliendo abbastanza informazioni sul comportamento della rete al fine di ottenere un modello robusto e predisposto a tutte le possibilità di funzionamento cui la rete potrebbe essere soggetta.

La figura 56 mostra in modo semplice le diverse componenti del *pattern di misura delle portate in ingresso* ottenuto dalla separazione delle due componenti principali che determinano il bilancio di massa nel sistema acquedottistico, a partire dai pattern di misura delle portate in ingresso al sistema.

La separazione delle due diverse componenti del *pattern di domanda* non può fare a meno della valutazione delle pressioni medie in rete e, quindi, della calibrazione delle scabrezze, ovvero delle resistenze idrauliche delle tubazioni.

Tale calibrazione viene così effettuata al fine di ottenere *valori calibrati* di β il più realistici ed accurati possibile rispetto all'informazione a disposizione.

La *calibrazione per fini gestionali* è, pertanto, operativamente parte di un processo dinamico che parte assumendo una distribuzione iniziale dei valori di β . Tale distribuzione può derivare dalla elaborazione del dato di perdita riportato in modelli esistenti in base a monitoraggio pregresso del sistema, ovvero in funzione di caratteristiche infrastrutturali specifiche della rete come, per esempio, i diametri oppure l'età delle tubazioni ed il numero di connessioni alle singole condotte.

Analisi effettuate nel tempo su molteplici reti acquedottistiche hanno dimostrato che la variazione del parametro β non altera le pressioni in rete ma, piuttosto, fa variare la distribuzione delle perdite tra i diversi tronchi.

Le misure di pressione effettuate in rete, pertanto, per quanto utili alla verifica dello stato pressorio restituito dal modello idraulico in diverse zone del sistema, sono necessarie in misura minore rispetto alla calibrazione dei “modelli classici”, in quanto non rappresentative dei fenomeni di massa che si sviluppano all'interno della rete.

Quanto detto, peraltro, rende la calibrazione basata su “*concetti di massa*” maggiormente robusta rispetto al rilievo della pressione in rete che, come noto, varia con la domanda e può risentire pertanto di effetti di disturbo locali.

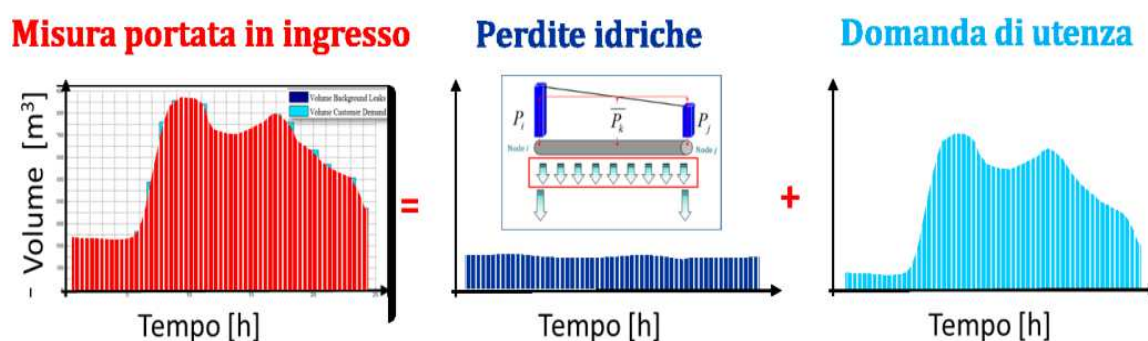


Fig.56. Componenti del pattern di misura della portata in ingresso (perdite volumetriche e domanda di utenze).

Inoltre, per il sistema oggetto di studio, la stessa procedura integra la calibrazione delle resistenze idrauliche delle tubazioni idraulicamente più rilevanti. Per la calibrazione del modello sono stati selezionati *cinque cicli operativi giornalieri caratteristici*, ovvero combinazione di condizioni feriali/festive, con l'aggiunta di giorni particolarmente singolari, compatibilmente con la disponibilità di misure sincrone.

La calibrazione suddetta è condotta mediante il servizio *DigitalWaterMass_Calibration*.

4.4. ANALISI DEL DOMINIO TOPOLOGICO DEL SISTEMA

L'analisi del dominio topologico delle reti si basa sulla valutazione di metriche di centralità derivate dalla *Complex Network Theory* (CNT) e riformulate per l'analisi degli acquedotti come sistemi infrastrutturali spaziali.

L'analisi del dominio topologico mediante le metriche della CNT permette di supportare, in particolare, le seguenti fasi dell'iter metodologico proposto:

- **Identificazione delle linee principali di alimentazione** la cui resistenza idraulica determina lo “stato pressorio in ingresso” alla rete di distribuzione e la conseguente identificazione della componente di efflusso legata alle perdite idriche nel processo di calibrazione innovativa basata sui bilanci di massa.
In questo contesto, la minore rilevanza identificata per alcuni tratti all'interno della rete di distribuzione è dovuta all'esistenza di un numero maggiore di percorsi idrici “alternativi” che ne rendono impossibile la calibrazione puntuale con le misure normalmente disponibili;
- **Supporto alla progettazione** per il miglioramento del funzionamento idraulico del sistema, ad esempio indicando linee da intercettare o collegare per riconfigurare i flussi in rete;
- **Supporto alla segmentazione topologica**, indirizzando la successiva distrettualizzazione idraulica verso configurazioni idraulicamente coerenti con il funzionamento robusto del sistema.

L'analisi del dominio topologico della rete acquedotto è condotta mediante il servizio *DigitalWaterDomain_Analyzer* che permette di eseguire uno screening topologico del sistema e di identificare i tronchi che condizionano maggiormente il funzionamento idraulico delle reti.

La figura 57 esemplifica il risultato dell'analisi di dominio ottenuto per il caso-studio oggetto della presente tesi ed inerente la rete acquedotto della Città di Reggio Calabria con l'identificazione delle tubazioni più importanti.

L'*analisi di dominio topologico* non sostituisce pertanto lo studio idraulico del sistema ma offre intrinsecamente importanti aspetti di complementarietà necessari ad ottimizzare il supporto alla gestione delle reti acquedotto.

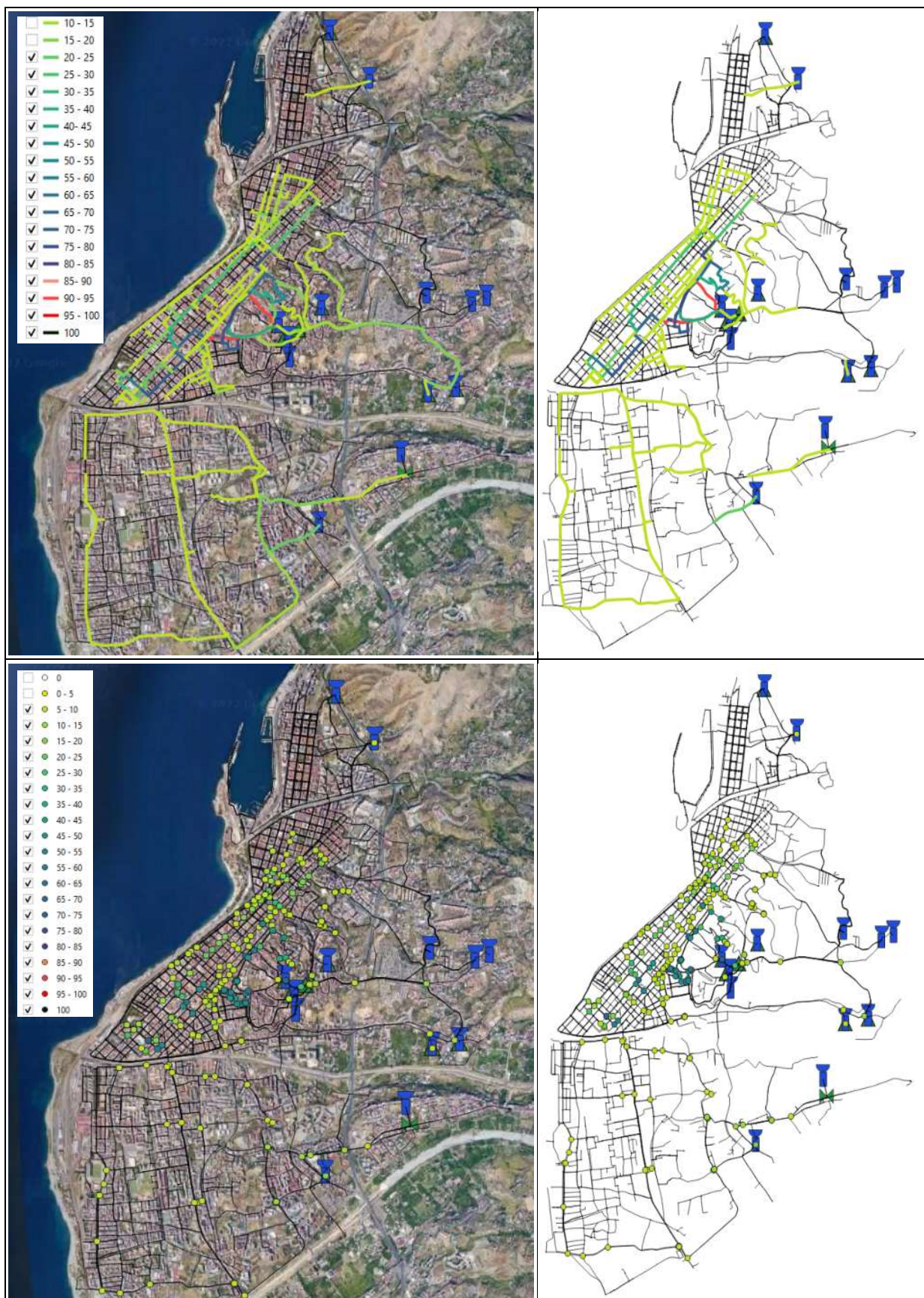


Fig.57. Analisi di rilevanza idraulica delle condotte (in alto) e dei nodi (in basso) di rete: Reggio Calabria

La figura 57 (in alto) mostra le condotte con il 20% più elevato dei valori di “Edge Betweenness” per la rete di Reggio Calabria. La “Edge Betweenness” rappresenta l'indicatore più importante e comprensibile, oltrechè quello che restituisce i risultati maggiormente coerenti con l'idraulica delle reti di acquedotto ai fini gestionali.

La figura 57 (in basso) mostra invece i nodi di rete con il 10% più elevato dei valori di “Nodes Betweenness” per la rete di Reggio Calabria.

4.5. METODOLOGIA DI DISTRETTUALIZZAZIONE: SEGMENTAZIONE TOPOLOGICA E DISTRETTI VIRTUALI

La distrettualizzazione è una operazione di divisione della struttura a rete di un acquedotto in diversi *distretti* (sottoreti della rete globale) al fine di migliorarne la gestione, intesa classicamente, rispetto al *monitoraggio dei bilanci idrici o di massa* e, per questo motivo, la tradizione tecnica li definisce DMA (*District Metering Areas*).

La progettazione della distrettualizzazione è un'operazione normalmente definita “*trial and error*” attraverso la quale, in modo *empirico*, il tecnico divide la rete acquedotto immaginando l'inserimento di valvole di sezionamento chiuse e misure di portata che ne configurino *distretti* di monitoraggio; l'obiettivo è quello di identificare all'interno di ogni distretto un andamento altimetrico simile, uguale materiale e vetustà delle condotte, diametro, ecc.

La progettazione della distrettualizzazione tiene naturalmente conto anche di vincoli tecnici e di considerazioni di carattere gestionale delle reti acquedotto quali:

- Vulnerabilità del sistema, in particolar modo in relazione alle condotte principali di trasferimento dell'acqua;
- Pressioni di esercizio in relazione all'altezza degli edifici;
- Tipologie di utenze ecc.

La *distrettualizzazione classica* rinuncia, pertanto, sia ad un processo razionale di progettazione ottimizzata, efficiente oltre che efficace, sia alla replicabilità delle scelte progettuali.

La *progettazione classica dei DMA* non valuta inoltre le opportunità di controllo delle pressioni in rete, attraverso la riconfigurazione dei flussi idrici conseguente alla chiusura di

valvole di sezionamento. Tale condizione può avere infatti come effetto la riduzione delle pressioni e, quindi, delle sollecitazioni sull'infrastruttura, riducendo così sia la probabilità di errore dei componenti del sistema (*burst leakages*), sia le perdite volumetriche.

La distrettualizzazione classica non integra, infine, la progettazione del controllo di pressione attraverso valvole di riduzione mediante il “disegno” delle stesse all'interno del modello idraulico avanzato della rete.

Con il fine di adottare una strategia razionale, efficiente ed efficace, guidata anche dalle esigenze di riduzione delle perdite volumetriche, la metodologia proposta utilizza una procedura di distrettualizzazione avanzata articolata in due diverse fasi:

- a) ***Segmentazione topologica;***
- b) ***Distrettualizzazione idraulica.***

La ***segmentazione topologica*** viene formulata come ottimizzazione a due diversi obiettivi:

- *Massimizzazione dell'indice di modularità quale misura dell'efficienza della divisione topologica in segmenti/moduli*
- *Massimizzazione del numero di tagli concettuali che separano tra loro i segmenti/moduli della rete acquedotto.*

La ***distrettualizzazione idraulica***, ovvero la progettazione reale dei DMA, ha la finalità invece di ottenere la “*selezione ottima*”, in ciascuno dei tagli concettuali acquisiti dalla *segmentazione* della rete, dei seguenti dispositivi:

- *Valvole di sezionamento chiuse: finalizzate a riconfigurare i flussi idrici in rete;*
- *Misuratori di portata, nel numero minimo possibile, al fine di creare distretti di misura;*
- *Set Point (anche variabili) delle valvole di riduzione di pressione eventualmente previste all'interno del sistema.*

La motivazione della divisione in due fasi della procedura di distrettualizzazione è collegata al reale funzionamento idraulico delle reti acquedotto che sono *condizionate in modo dominante dalla struttura connettiva topologica della rete stessa.*

La ***segmentazione*** è pertanto un processo di *ottimizzazione costi/benefici* necessario per la divisione virtuale della topologia della rete acquedotto con tagli concettuali da impostare

vicino ai nodi al fine di ottenere segmenti o moduli che rispettino obiettivi e vincoli esistenti nel sistema reale.

La **distrettualizzazione** idraulica è invece un processo di ottimizzazione idraulica costi/benefici finalizzato all'installazione di valvole di sezionamento o misuratori di portata nei tagli concettuali ottenuti dalla fase precedente di segmentazione della rete.

La finalità tecnica di tale iter procedimentale è quella di *riconfigurare i flussi idrici* interni alla rete riducendo le *perdite volumetriche* come effetto della riduzione delle pressioni e con il vincolo di rispettare, con adeguati margini di sicurezza, le pressioni di esercizio richieste per le diverse utenze durante il ciclo operativo di sistema, per esempio giornaliero.

La **modellizzazione idraulica avanzata** della rete acquedotto consente, inoltre, anche la pianificazione dell'inserimento a sistema delle valvole idrauliche di riduzione della pressione con controllo della pressione subito a valle del dispositivo, oppure, simulando il controllo remoto mediante un nodo "sentinella" utile per supportare la successiva identificazione di *set-point* variabili per la stessa valvola, anche per diversi cicli operativi caratteristici.

Mentre la distrettualizzazione è un processo *globale* di riconfigurazione strutturale della rete, infatti, una valvola di riduzione delle pressioni (PRV) introduce un *controllo delle pressioni attraverso una perdita di carico localizzata variabile nel tempo*.

La **modellizzazione idraulica avanzata**, combinando la *distrettualizzazione* e l'installazione mirata di valvole di riduzione delle pressioni, richiede un numero minore di valvole, a parità di effetto complessivo sulle *perdite volumetriche*.

Ciò garantisce una maggiore affidabilità complessiva del sistema e lo rende più affidabile rispetto alle reciproche interferenze fra valvole, specialmente se ogni distretto non viene configurato in modo idoneo per evitare tali disturbi (cosa molto difficile considerando l'elevata "magliatura" delle reti di distribuzione).

4.5.1. SEGMENTAZIONE TOPOLOGICA – DISTRETTI VIRTUALI

La *segmentazione*, come detto, è la prima fase *topologica* di *divisione virtuale* della rete in segmenti/moduli attraverso tagli concettuali da attuarsi vicino ai nodi e che rappresentano

posizioni *candidate* per l'inserimento di valvole di sezionamento o misuratori di portata durante la successiva fase di *distrettualizzazione idraulica* della rete acquedotto.

La *segmentazione topologica* viene ottenuta minimizzando il numero di *tagli concettuali* e, contemporaneamente, massimizzando un *indice di modularità* (metrica di efficienza della divisione mutuata dalla *teoria delle reti complesse* applicata ai sistemi infrastrutturali).

La procedura così attuata risulta essere molto più *efficiente* ed *efficace* di qualsiasi altra procedura *empirica* per qualunque scelta di obiettivi o vincoli.

La procedura seguita si presta, inoltre, a poter considerare l'eventuale distrettualizzazione esistente nelle reti reali oggetto di studio. In questo caso le misure di portata e di pressione disponibili possono essere utilizzate nella fase di calibrazione del modello idraulico.

La procedura consente, inoltre, di mantenere laddove richiesto dal Gestore elementi della distrettualizzazione esistente come vincoli (*priors*) da imporre per la nuova distrettualizzazione che viene, pertanto, razionalizzata ed affinata sulla base di quella reale esistente.

La procedura di ottimizzazione risolve, inoltre, un problema combinatorio (ogni tubazione ha 2 potenziali posizioni per il *taglio concettuale*) non affrontabile in modo efficace ed efficiente con il solo giudizio esperto dell'ingegnere già per reti idriche caratterizzate da poche migliaia di tronchi, specialmente se molto "magliate", come quelle Calabresi.

La metodologia di segmentazione proposta restituisce un *fronte paretiano* di soluzioni ottime, *costi* (numero di *tagli concettuali*) vs. *benefici* (valore dell'indice di modularità), ovvero configurazioni di divisione della rete in *segmenti* al variare del loro numero e di quello dei *tagli concettuali*.

Il risultato che si ottiene attraverso l'utilizzo della citata procedura è un sistema di supporto decisionale a disposizione del Gestore della rete acquedotto costituito da una serie di configurazioni di divisione della rete che possono essere scelte in qualsiasi fase progettuale e/o gestionale come base del monitoraggio del sistema idraulico.

Ognuna di tali soluzioni/configurazioni è *annidata* in tutte quelle con un maggior numero di *segmenti* consentendo in tal modo di avere una importante flessibilità decisionale.

La circostanza che la segmentazione produca un sistema flessibile di supporto alla suddivisione topologica della rete è rilevante in particolar modo per gli *aspetti gestionali*. Infatti, per la successiva fase di *distrettualizzazione idraulica* della rete acquedotto viene utilizzata la configurazione al fine di avere il massimo numero di *tagli concettuali* per avere la massima *efficacia* ed *efficienza* nella riconfigurazione dei flussi idrici dell'acquedotto.

L'identificazione delle alternative di segmentazione è ottenuta utilizzando il servizio *DigitalWaterVirtualDMA*. La scelta della configurazione di *segmentazione topologica* da utilizzare come base per la successiva *distrettualizzazione idraulica*, ovvero l'identificazione dei pozzetti candidati ad ospitare dispositivi di controllo o di misura, è supportata dal servizio di *Digital Water* chiamato *DigitalWaterSegment_Viewer*, e permette altresì il post-processing delle soluzioni finalizzato a modificare, secondo il giudizio tecnico, la posizione dei pozzetti candidati all'installazione dei dispositivi idraulici dovuti, ad esempio, all'esistenza di vincoli urbanistici, ambientali, etc.

4.5.2. DISTRETTUALIZZAZIONE IDRAULICA - DISTRETTI DI MISURA (DMA)

La distrettualizzazione vera e propria della rete acquedotto è concepita come un processo di ottimizzazione *idraulica* vincolato da esigenze tecniche (generalmente impostando il massimo diametro delle condotte dove è possibile inserire valvole di sezionamento) attraverso l'utilizzo della modellizzazione idraulica calibrata *pressure-driven*, massimizzando la riduzione delle *perdite volumetriche* e, contemporaneamente, minimizzando il *numero di misure di portata* tra i distretti. La condizione essenziale che viene imposta è che in qualsiasi punto del sistema idraulico venga rispettata la pressione per il corretto servizio, specifica per le diverse tipologie di utenza, da soddisfarsi con un grado di sicurezza legato alle incertezze modellistiche dell'analisi del sistema.

La procedura di distrettualizzazione idraulica fornisce diverse configurazioni dei distretti della rete acquedotto, ottime rispetto alla riduzione delle perdite volumetriche *versus* il numero di misure di portata. Ognuna di tali configurazioni soddisfa i vincoli ingegneristici imposti come dati di input e non intacca il corretto servizio alle diverse tipologie di utenza durante l'intero ciclo operativo dell'acquedotto con un adeguato margine di sicurezza.

Tale condizione avviene *riconfigurando* in modo razionale ed ingegneristicamente vincolato *i flussi idrici* con la finalità di ridurre lo stato pressorio (quindi le perdite) nelle aree a pressione medio-elevate rispetto ai requisiti imposti per un corretto servizio alle utenze.

L'analisi topologica, integrata alla simulazione idraulica nel sistema WNetXL, permette di escludere la disconnessione di qualsiasi parte del sistema idraulico allorquando venga ipotizzato l'inserimento di valvole di sezionamento chiuse all'interno del sistema.

È da evidenziare il fatto che la chiusura di valvole di sezionamento all'interno della rete acquedotto non riduce l'affidabilità del sistema poiché non coincide con l'apertura "ad albero" della rete, essendo possibile in qualsiasi momento riaprire il sistema a fronte di scenari di funzionamento anormale.

La progettazione della distrettualizzazione secondo uno schema razionale e controllato in tutte le sue fasi non ha inoltre come effetto secondario una riduzione della qualità dell'acqua e non riduce neanche l'affidabilità di sistema dal punto di vista meccanico ed idraulico.

Dal punto di vista tecnico-economico la procedura di distrettualizzazione idraulica, concepita come ottimizzazione topologica e idraulica, consente di ottenere, a parità di condizioni, obiettivi e vincoli, una distrettualizzazione *più efficace* (rispetto a vincoli tecnici assegnati) *ed efficiente* (minor costo di installazione a parità di obiettivi, per esempio numero di distretti e riduzione delle perdite) rispetto a qualsiasi procedura empirica.

La razionalità della **metodologia strutturata**, peraltro, diviene esperienza replicabile nei diversi sistemi idrici del medesimo Gestore, circostanza rilevante per l'*asset management* in una visione di scala gestionale aziendale.

Dopo aver installato le valvole di sezionamento che consentono la riconfigurazione dei flussi idrici in rete, può essere scelto il numero di distretti da monitorare in modo ottimo (costi/benefici), lasciando la possibilità di poter integrare in qualsiasi momento il sistema con l'inserimento di misuratori di portata che consentirebbero l'attivazione di distretti annidati, ad esempio, durante l'esecuzione di *step-test*, già predisposti in modo

topologicamente efficiente dalle valvole di isolamento installate con la distrettualizzazione idraulica.

4.5.3. PROGETTAZIONE INTEGRATA DELLA DISTRETTUALIZZAZIONE E VALVOLE DI CONTROLLO DELLA PRESSIONE

L'integrazione delle valvole PRV all'interno della procedura più generale di distrettualizzazione adottata permette di introdurre un ulteriore elemento di robustezza rispetto alle incertezze di sistema presenti al momento della progettazione nonché diventa garanzia di flessibilità nella conduzione delle reti a fronte di scenari di funzionamento futuri.

La *distrettualizzazione* ha l'obiettivo di ridisegnare in modo razionale e ingegneristicamente vincolato i flussi idrici per ridurre lo stato pressorio (quindi le perdite) nelle aree a pressione medio-elevate rispetto ai requisiti per un corretto servizio riducendo le perdite.

Essa va intesa, pertanto, come un intervento di controllo globale delle pressioni (ovvero mediante l'inserimento a sistema di valvole di sezionamento) che, per tale motivo, interessano il funzionamento dell'intero sistema idraulico.

Le valvole di riduzione della pressione (PRV), inserite nei punti di origine della distribuzione urbana (ODU) permettono, invece, di regolare il carico idraulico nei nodi di alimentazione della rete durante il ciclo operativo, al fine di ridurre le pressioni compatibilmente con le esigenze di servizio.

La procedura di *distrettualizzazione* ottima adottata, formulata come massimizzazione della *riduzione delle perdite volumetriche* e, contemporaneamente, *minimizzazione del numero di misure di portata* tra i distretti, include tra le variabili decisionali che possono essere forniti al Gestore, anche i set-point fissi di PRV a controllo locale.

È da evidenziare ancora una volta che l'analisi modellistica avanzata degli stessi schemi di controllo delle PRV al nodo *sentinella (RRTC)* è finalizzata a supportare la programmazione di controllo temporizzato ottimale delle stesse PRV anche con riferimento a cicli operativi caratteristici, ad esempio festivo/feriale o stagionale.

La pianificazione dei distretti realizzata secondo la metodologia proposta è, pertanto, *razionale, efficiente, efficace e robusta* oltre che guidata dalle esigenze di riduzione delle perdite volumetriche.

Una volta fissata la posizione delle *valvole di sezionamento chiuse* che permettono la riduzione delle *perdite volumetriche* mediante la riconfigurazione dei flussi idrici, è possibile scegliere il numero di DMA da monitorare in modo ottimo (costi/benefici) lasciando alle future decisioni gestionali, magari in relazione al sistema regolatorio, la possibilità d'integrazione del monitoraggio di portata che "attiverebbe" i distretti *annidati* all'interno dei DMA esistenti.

Tali distretti sono, infatti, già predisposti in modo "topologicamente" efficiente rispetto alle valvole di isolamento determinate nella fase di *distrettualizzazione idraulica*.

La metodologia proposta sviluppa, pertanto, uno schema di supporto alla distrettualizzazione che, fissate il numero e la posizione delle *valvole di sezionamento*, permette di:

- Disegnare i DMA e le relative *postazioni di misura di portata fisse* al bordo degli stessi DMA per il monitoraggio dei bilanci idrici, nel rispetto di vincoli tecnico-gestionali;
- Identificare le *postazioni di misura di portata di prospettiva*, interne ai DMA progettati.

Tale strategia razionale e flessibile di supporto alla distrettualizzazione, si presta alle esigenze di pianificazione future del Gestore ed anche al supporto dell'esecuzione dei lavori conseguenti alla scelta dei "piani di riabilitazione" ottimali per la rete acquedotto.

In particolare, la strategia permette di adottare diversi criteri di scelta integrabili tra loro e non esclusivi:

- *scelta "esperta"*, ovvero basata sul giudizio dei tecnici del Gestore, funzione della conoscenza del sistema nonché di valutazioni di fattibilità tecnica delle installazioni;
- *scelta "metrologica"*, ovvero basata sull'analisi preliminare di portate/velocità attese nelle posizioni in cui saranno installati i misuratori di portata, rispetto alle caratteristiche tecniche degli stessi e all'obiettivo di ridurre incertezze sui bilanci idrici di distretto.

4.5.4. MONITORAGGIO DELLE GRANDEZZE IDRAULICHE E TIPOLOGIE DI POSTAZIONI DI MISURA

Il monitoraggio di pressioni e delle portate nelle reti acquedotto è legato alla necessità di misurare le pressioni nei nodi e le portate nei tronchi al fine di poter “osservare” i cambiamenti del comportamento del sistema idraulico durante il ciclo operativo, almeno settimanale, ovvero al variare di condizioni al contorno del sistema in funzione delle richieste idriche delle utenze, del funzionamento dei dispositivi idraulici e dei livelli dei serbatoi, delle resistenze idrauliche delle condotte, dell’evoluzione dei burst leakages, etc. anche considerando i nodi maggiormente sensibili alle variazioni di comportamento idraulico del sistema.

Si tratta, quindi, di scegliere la localizzazione delle postazioni per le misure di portata e pressione in modo da rendere il sistema “*osservabile*” rispetto al monitoraggio scelto.

La strategia di distrettualizzazione proposta nella presente tesi permette la disposizione di tre diverse tipologie di postazioni di misura da installarsi all’interno di un pozzetto (tagli concettuali della segmentazione della rete), ciascuna delle quali potrà essere equipaggiata in base alle migliori tecnologie di monitoraggio e trasmissione del dato:

Tipo 1) Valvola di sezionamento con n.2 misuratori di pressione, ciascuno relativo ad uno dei due distretti separati dalla valvola stessa. Questa postazione si riferisce ai tagli concettuali che possono ospitare “*valvole di sezionamento chiuse*” atte a riconfigurare i flussi idrici in rete. L’installazione dei due misuratori di pressione permette di verificare la tenuta idraulica della chiusura, fornendo al tempo stesso la pressione al bordo dei distretti DMA, migliorandone l’osservabilità, ad esempio nell’identificazione di nuovi burst leakages (leakage detection).

Tipo 2) n.1 misuratore di portata fisso e n.1 misuratore di pressione. Questa postazione si riferisce ai tagli concettuali (pozzetti) che possono ospitare “*postazioni di misura di portata fisse*” scelti sulla base della strategia di distrettualizzazione idraulica. L’installazione del misuratore di portata al confine tra due DMA offre anche l’opportunità di installare un misuratore di pressione, meno oneroso e con ridotti vincoli tecnici rispetto a quello di portata, migliorando l’osservabilità in una posizione topologicamente e idraulicamente rilevante.

Tipo 3) Predisposizione di una postazione di misura di portata di prospettiva utilizzabile anche con dispositivi portatili e n.1 misuratore di pressione. Questa

postazione si riferisce ai tagli concettuali che possono ospitare “*postazioni di misura di portata di prospettiva*” scelti sulla base della strategia di distrettualizzazione. Ai fini della presente procedura, questo tipo di postazione non definirà un DMA di bilancio idrico fisso, ma potrà essere utilizzata per “attivare” DMA di bilancio idrico temporanei, ad esempio, durante l’esecuzione di step-test. La predisposizione di tali postazioni di misura offre l’opportunità di poter installare un misuratore di pressione, meno oneroso e con ridotti vincoli tecnici rispetto a quelli di portata, migliorando l’osservabilità in una posizione topologicamente e idraulicamente rilevante.

È da evidenziare che la procedura di distrettualizzazione ottima restituisce il massimo numero di misure di portata e pressione che, tuttavia, potranno essere ridotti mediante i criteri di scelta già indicati al capitolo n.2, ovvero sulla base di valutazioni tecnico-economico del Gestore della rete.

La predisposizione strutturata di nuovi misuratori permette inoltre di poter ottimizzare e strutturare il flusso di dati che saranno trasmessi al centro di controllo aziendale, predisponendo altresì il sistema acquedotto alla possibilità di acquisizione degli stessi mediante rete fissa (*ad es. reti 5G, Sigfox, LoRaWAN, Narrowband IoT (NB-IoT)*).

4.6. MIGLIORAMENTO FUNZIONALE DELLA RETE

Una strategia di “asset management” che sia supportata da strumenti avanzati della transizione digitale, da applicarsi nel settore idraulico per lo studio e la gestione delle reti di acquedotto, non può prescindere da una preventiva “analisi di dominio” e da una “calibrazione” della rete, basata sul concetto di massa, a partire dai dati idraulici del sistema. La strategia di “asset management” è finalizzata a mettere in campo soluzioni progettuali e gestionali ottimali che siano valutabili e verificabili, ante-operam, attraverso la simulazione del comportamento idraulico del sistema effettuata sul gemello digitale della rete (Digital Twin).

I miglioramenti funzionali e la reingegnerizzazione della rete dipendono infatti dalla specificità dell’acquedotto e sono in grado di risolvere alcune problematiche del sistema dovute, ad esempio, alla stratificazione delle condotte avvenuta nel tempo per risolvere problematiche contingenti e specifiche (inserimento di by-pass, modifica dei percorsi di

rete etc.). In una gestione “classica” dell’acquedotto queste azioni vengono effettuate senza una preventiva verifica della rete che risulta essere, invece, necessaria al fine di poter valutare tutti gli scenari possibili ed individuare tra questi la soluzione ottimale per la risoluzione del problema idraulico.

Nella pratica gestionale “classica” ci si affida spesso alla conoscenza di campo ed all’esperienza dei tecnici e dei “fontanieri” del Gestore. Le soluzioni che vengono trovate con questo *modus operandi* sono “soluzioni efficaci”, in quanto risolvono il problema idraulico contingente nell’immediatezza, ma non sempre “efficienti” in quanto non può essere valutato preventivamente il comportamento idraulico globale della rete.

Soluzioni tecniche che tendono a sovradimensionare le condotte di una rete acquedottistica a causa di scelte non fondate su una preventiva analisi idraulica del sistema nel suo complesso comporta, generalmente, una *riduzione delle perdite di carico* ed un mantenimento di *pressioni alte* in rete, maggiori delle pressioni di esercizio necessarie alle utenze e, pertanto, *espone il sistema ad un aumento generalizzato delle perdite ed al conseguente deterioramento rapido del sistema*.

Al fine di poter ottenere la soluzione tecnica ottimale è pertanto necessario effettuare una simulazione degli interventi di progetto sul modello digitale (*Digital Twin*) della rete eseguendo una verifica sul modello idraulico calibrato.

La strategia di *asset management* connessa alla transizione digitale supporta il progettista ed il gestore della rete, attraverso la verifica globale del sistema con l’utilizzo del modello idraulico calibrato “*digital twin*”, alla scelta del *diametro minimo utile di progetto* con il quale ottimizzare il funzionamento idraulico della rete nel rispetto delle pressioni minime di esercizio. L’obiettivo è quello di minimizzare le perdite di rete e dotare il sistema di tutta una serie di controlli e monitoraggi in grado di segnalare in tempo reale eventuali anomalie del sistema acquedotto.

4.7. PIANI DI RIABILITAZIONE - SUPPORTO ALLA SCELTA

La riabilitazione non rappresenta un’opzione gestionale di riduzione “massiva” delle *perdite volumetriche* poiché gli interventi di sostituzione interessano, per motivi economici, solo una piccola percentuale del sistema acquedottistico.

Di contro, le reti acquedotto sono comunemente caratterizzate da un deterioramento diffuso in relazione all'età media delle condotte dalle quali sono composte.

A tale proposito è necessario rilevare che se esistessero tubazioni o porzioni di rete responsabili della stragrande maggioranza delle perdite di rete non relazionate a livelli di pressione particolarmente elevati, gli effetti localizzati di tali perdite sarebbero evidenti in termini di “*anomale riduzioni*” delle pressioni in rete e, pertanto, sarebbero di impatto sul corretto servizio all'utenza (condizione tipica dei *burst leakages*).

In questo quadro, la sostituzione dei tronchi vetusti ed ammalorati deve essere effettuata ottimizzando il costo di investimento, ma anche avendo come **obiettivo la riduzione delle perdite volumetriche**, come indicatore gestionale, in quanto segnalatore degli effetti complessivi della riabilitazione sull'acquedotto.

Tale obiettivo non può essere raggiunto con una “*visione locale*”, ovvero valutando la riduzione delle perdite volumetriche rispetto ai soli tronchi sostituiti, ma con una “*visione globale*”, ovvero valutando le conseguenze idrauliche *estese* di tali sostituzioni e la *riduzione globale* delle perdite volumetriche sul complesso del sistema a rete.

Tale condizione è necessaria al fine di evitare l'effetto contrastante di aumento delle perdite volumetriche, causato dalla significativa maggior conduttanza idraulica delle nuove tubazioni che incrementa le pressioni di esercizio nelle porzioni di sistema idraulicamente a valle delle stesse.

Le considerazioni tecnico idrauliche che hanno portato alla consapevolezza nel mondo tecnico, ma anche nella letteratura tecnico-scientifica, che la riabilitazione delle reti acquedotto basata su un approccio metodologico superficiale possa diventare elemento globalmente negativo per il sistema idraulico, anche se positivo localmente per le condotte sostituite.

Per questo motivo, la progettazione della sostituzione dei tronchi vetusti ed ammalorati deve essere eseguita considerando in modo complessivo gli effetti sopra riportati al fine di renderla efficiente dal punto di vista globale del sistema idraulico, ovvero dal punto di vista della sua gestione e non, esclusivamente, considerando la riduzione dell'età media dell'acquedotto.

In coerenza con quanto appena rilevato, nella metodologia complessiva di “*asset management*” applicata per la presente procedura, *il supporto alla sostituzione di tronchi è*

subordinato alla scelta dei distretti di monitoraggio ed alla regolazione mediante PRV in ingresso alla rete.

La scelta dei tronchi da sostituire riferita al migliore rapporto costi/benefici, ovvero investimenti/riduzione delle perdite volumetriche, dipende infatti dal nuovo assetto idraulico ottenuto a seguito della riconfigurazione dei flussi.

Assegnata la soluzione ottima prescelta di *distrettualizzazione idraulica* della rete acquedotto, lo strumento di supporto alla riabilitazione permette di poter identificare i tronchi di rete che, per un dato limite di budget del Gestore, massimizzano un indice di efficienza dato dal rapporto tra la *riduzione di perdita attesa* a seguito della sostituzione e *il costo di intervento*.

La sostituzione di condotte idriche ottenuta considerando il solo parametro “vetustà”, infatti, può essere causa di incremento di sollecitazioni per altre tubazioni della rete, anch'esse vetuste, ma non sostituite per i *limiti fisiologici di budget*.

La pianificazione della riabilitazione deve essere finalizzata all'identificazione delle tubazioni da sostituire considerando gli anni di servizio (tronchi vetusti) attraverso un “*parametro di deterioramento*” ed utilizzando la simulazione idraulica avanzata.

Come detto, le perdite volumetriche sono un indicatore di *asset management*, attraverso l'utilizzo della seguente formula:

$$q_k^{leakage} = \beta_k (A_e, D, P_r, \dots) P_{k,t}^\alpha L_k$$

Le portate delle perdite volumetriche per unità di lunghezza, q_k/L_k , a livello di singolo tronco, k , sono funzione della variazione nel tempo della pressione media, $P_{k,t}$, tramite un parametro di deterioramento, β_k , ed un esponente α .

Studi internazionali hanno dimostrato che:

- ✓ Impostare $\alpha = 1$ è una buona assunzione tecnica specie a livello di modello di progetto;
- ✓ il parametro di deterioramento β_k è in realtà funzione della vetusta/età della condotta, A_e , del diametro, D , in relazione alla posa in opera e del numero di utenze/proprietà servite, P_r , dalla condotta come fattore di criticità delle giunzioni.

Per la definizione del parametro β_k sono stati riportati i fattori di *asset* più semplici da reperire a livello progettuale, anche se tale parametro è comunque funzione di altri fattori

di fatica legati alla vita del sistema come ad esempio stress termici, traffico, pressione, sollecitazioni di moto vario, etc., che, comunque, in qualche modo sono rappresentati, indirettamente, in quelli principali.

La riabilitazione proposta, quindi, è rappresentata da un processo di ottimizzazione che prevede la scelta dei tronchi da sostituire in modo da minimizzare il rapporto tra costo di sostituzione e beneficio della riduzione e quasi annullamento delle perdite q_k .

Per questo motivo β_k viene scelto proporzionale alla vetusta/età della condotta A_e e/o al numero di utenze/proprietà servite P_r ed inversamente proporzionale al diametro D in quanto è noto in letteratura tecnico-scientifica che i diametri più piccoli sono statisticamente più ammalorati, per condizioni di posa in opera e per il maggior numero di proprietà/utenze allacciate per metro lineare, coerentemente con la calibrazione del modello idraulico di progetto.

Si osserva inoltre che la dipendenza diretta tra β_k delle tubazioni e l'età delle stesse permette di selezionare preferenzialmente condotte più vetuste rispetto ad altre messe in opera più recentemente, qualificando altresì gli investimenti più recenti.

La riduzione della resistenza idraulica delle nuove tubazioni sostituite determina infatti un cambiamento dello stato pressorio (incremento) a valle della sostituzione, generalmente non compensato dall'effetto di riduzione delle perdite volumetriche q_k che può determinare. Questo determina un effetto contrario di incremento delle perdite volumetriche ed in conseguenza dei *burst leakages* dovuto alle maggior sollecitazioni pressorie che si sviluppano a valle della sostituzione. Per tale motivo il modello idraulico avanzato consente anche l'ottimizzazione topologica dei tubi da sostituire considerando le condizioni sia idrauliche che plano-altimetriche della rete.

La pianificazione della riabilitazione viene ottimizzata, infine, rispetto alla rete acquedotto già controllata nelle pressioni attraverso la distrettualizzazione e le valvole di riduzione della pressione, consentendo maggior affidabilità delle scelte gestionali.

In definitiva è dimostrabile che, seppur la riabilitazione di sistema deve avere come indicatore la riduzione delle perdite volumetriche rispetto al valore dell'investimento, essa non raggiunge *efficienze* (benefici/costi) simili alla strategia basata sulla riconfigurazione dei flussi idrici durante la pianificazione dei DMA perché, in quest'ultimo caso, si possono conseguire riduzioni di perdite molto maggiori ad un costo di investimento molto minore.

CAPITOLO 5

CASO STUDIO – RETE ACQUEDOTTO CITTÀ DI REGGIO CALABRIA

5.1. ITER METODOLOGICO STRUTTURATO DI “ASSET MANAGEMENT” APPLICATO ALLA RETE DI REGGIO CALABRIA – PREMESSE

Per raggiungere l’obiettivo di “*asset management*” attraverso la riduzione delle *perdite volumetriche* è stata sviluppata una strategia basata sui presupposti metodologici innovativi esplicitati puntualmente al paragrafo 4.2 della presente tesi.

Nella figura n.58 di seguito riportata viene schematizzato il *flow-chart* dell’iter metodologico proposto ed utilizzato per lo studio della rete acquedotto reale della Città di Reggio Calabria per come sviluppato nei paragrafi a seguire:

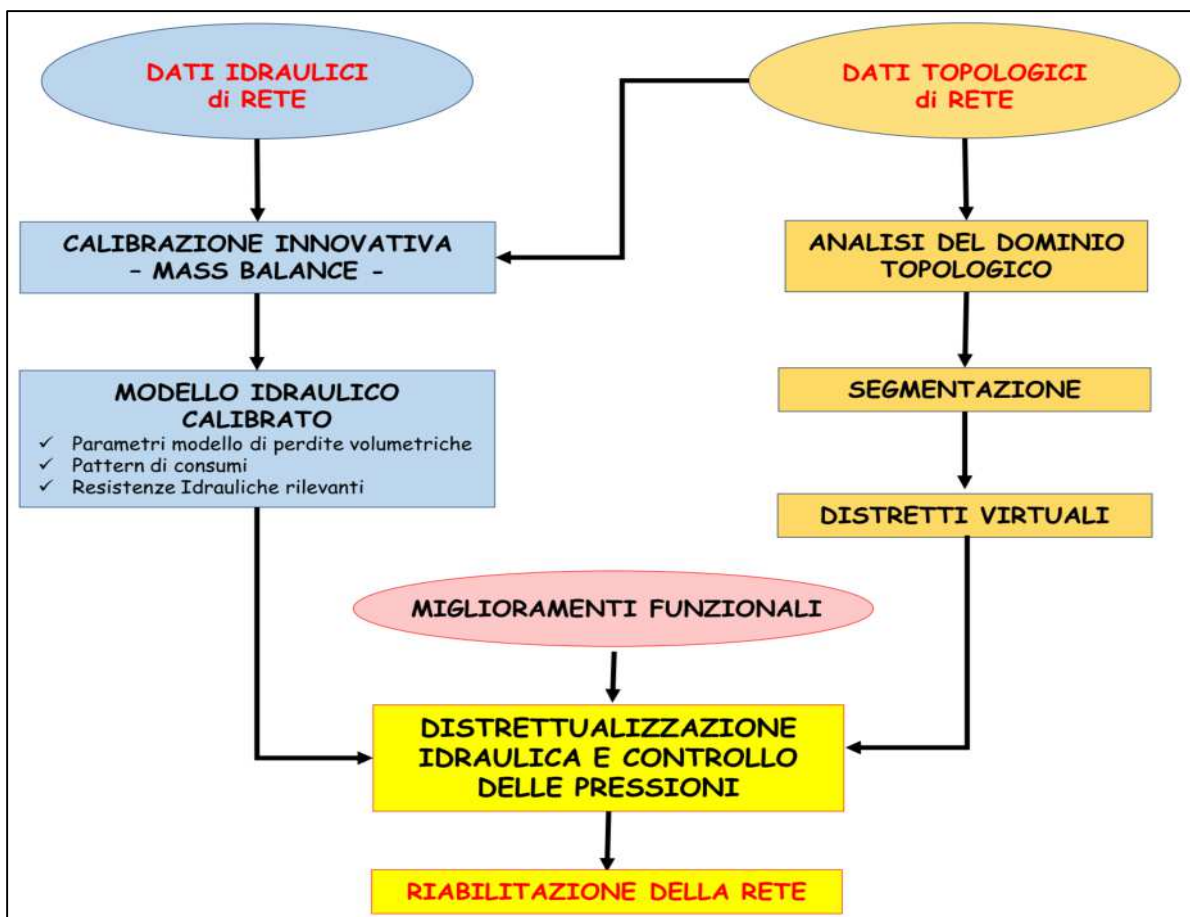


Fig.58. Flow-Chart dell’iter metodologico innovativo utilizzato per il caso-studio della rete di Reggio Calabria.

La modellizzazione ingegneristica *avanzata* del comportamento idraulico della rete acquedotto (*Digital Twin – Gemello Digitale della rete reale*), ottenuta mediante la

calibrazione basata sui bilanci idrici (*Mass Balance*) ed integrando nelle analisi idrauliche le *perdite volumetriche* in funzione delle pressioni, rappresenta il legante necessario al fine di ottenere un *efficace* ed *efficiente* supporto alla progettazione della *distrettualizzazione*, *controllo delle pressioni*, *monitoraggio idraulico* e *riabilitazione delle condotte*.

La *modellizzazione fenomenologica avanzata del comportamento della rete acquedotto reale* riveste, pertanto, il ruolo di *strumento metodologico* di supporto fondamentale alle diverse attività di gestione e progettazione della riabilitazione delle reti acquedotto.

Vengono in tal modo superati i limiti della *modellazione classica*, di EPANET e dei software package commerciali basati su tale motore di calcolo idraulico, consentendo di poter considerare le *perdite volumetriche* in funzione della pressione media, a livello dei singoli tronchi ed, in generale, il funzionamento più realistico del sistema.

Nel caso reale della rete di Reggio Calabria sono state considerate, ad esempio, le differenti tipologie di utenza presenti nella rete acquedotto (reali altezze geodetiche dei singoli contatori *georeferenziati*, autoclavi con serbatoi privati, etc.) ed anche le condizioni di *pressione insufficiente* per il corretto servizio alle utenze stesse.

L'utilizzo di procedure di ottimizzazione multi-obiettivo e vincolate ha consentito, basandosi su analisi idrauliche avanzate e con particolare attenzione alle componenti che determinano i bilanci idrici di massa, di poter ottenere soluzioni progettuali *efficienti* (nel rapporto costi/benefici) ed *efficaci* (vincolate alle specificità dei singoli acquedotti), ma anche *robuste* e *flessibili* nell'applicazione, di supporto sia alle scelte progettuali che in prospettiva gestionale per il Gestore. I **dati topologici** della rete, valorizzati integrando le informazioni acquisite dagli Enti territorialmente competenti (*Regione Calabria, SORICAL, Comune di Reggio Calabria*) con i modelli idraulici esistenti, hanno rappresentato la base per l'analisi del **dominio topologico** e per la **segmentazione topologica** della rete in **distretti virtuali**. Le soluzioni ottenute sono state successivamente elaborate in *post-processing* per la progettazione dei **distretti idraulici DMA** con la riconfigurazione dei flussi idrici in rete ed il controllo delle pressioni attuato mediante l'inserimento di n.3 valvole PCV.

I **dati topologici**, unitamente ai **dati idraulici** relativi ai consumi delle singole utenze georeferenziate ed alle misure delle grandezze idrauliche acquisite dal Gestore (*dato in forma aggregata di portata totale immessa in rete nell'anno 2021*), sono stati utilizzati per eseguire la **calibrazione innovativa** del sistema idrico.

Non avendo il Gestore della rete acquedotto di Reggio Calabria a disposizione i dati in continuo di portata erogata alle singole utenze, ma esclusivamente il dato aggregato di consumo annuale (fatturazione) riferito all'anno 2021, la *calibrazione* del modello è stata condotta utilizzando il *pattern calibrato* di domanda dell'utenza della Città di Bari (domanda media giornaliera riferita a n.1 ciclo operativo giornaliero caratteristico, combinazione di condizioni feriali/festivi). La scelta operativa di utilizzare il *pattern calibrato* della Città di Bari è dovuto al fatto che trattasi di “centro urbano” molto simile come conformazione plano-altimetrica e sviluppo socio-economico alla Città di Reggio Calabria. Una calibrazione condotta su dati orari “misurati” e sulla base di n.5 cicli operativi giornalieri rappresentativi di diversi stati di funzionamento tipici del sistema, avrebbe consentito di ottenere un modello maggiormente robusto a supporto delle attività gestionali e di pianificazione della riabilitazione.

La *calibrazione innovativa* (Mass Balance) ha permesso di poter definire i parametri del modello delle *perdite volumetriche*, le *resistenze idrauliche delle linee di alimentazione principali* e la valutazione dei *volumi di perdite idriche* della rete acquedotto di Reggio Calabria per il periodo di studio considerato (anno 2021).

In parallelo, seguendo l'iter metodologico proposto e rappresentato nella figura 58, la strategia di “*asset management*” ha previsto lo sviluppo della *segmentazione* della rete reale, ovvero l'identificazione di *distretti virtuali* basati sulla sola informazione topologica, e la successiva progettazione dei *distretti idraulici DMA*.

Tutte le attività suddette hanno rappresentato gli elementi caratterizzanti del funzionamento reale della rete di Reggio Calabria (*modello idraulico gestionale - Digital Twin - Gemello Digitale della rete reale*), propedeutico alla successiva progettazione del *controllo delle pressioni in rete* ed alla *pianificazione della riabilitazione delle condotte*.

L'approccio di *asset management* e l'iter metodologico proposto nella presente tesi è stato concepito al fine di aumentare la robustezza dell'iter decisionale e progettuale, con particolare riferimento alla distrettualizzazione della rete e ad una pianificazione ottimale della riabilitazione delle condotte.

Alla base dell'iter metodologico proposto vi è, pertanto, la modellazione idraulica avanzata della rete acquedotto che è stata effettuata utilizzando i servizi di Digital Water attraverso la modellazione del gemello digitale (Digital Twin) della rete reale, generato dalla piattaforma

WNetXL. Il *Digital Twin* della rete acquedotto studiata ha fornito una rappresentazione digitale della topologia e del comportamento idraulico del sistema, integrata in ambiente GIS con geo-referenziazione di tutti gli elementi del sistema, inclusi i contatori di utenza attivi e non attivi, utile per le finalità progettuali e gestionali.

Vengono di seguito riportate alcune considerazioni ed ipotesi di base utilizzate nello studio specifico della rete di Reggio Calabria per lo sviluppo delle diverse fasi dell'iter metodologico strutturato di “*asset management*”.

- 1) I dati acquisiti dagli Enti competenti sono stati resi disponibili in “forma aggregata”, cumulativi di tutti i ***volumi idrici in entrata ed in uscita dal sistema*** su base annua:
 - Dato annuo cumulativo di tutti i ***volumi idrici immessi*** nella rete acquedotto dalle diverse fonti di approvvigionamento (serbatoi e pozzi – anno 2021);
 - Dati di ***consumo annuo*** acquisiti come *database* su file MS-Excel® dalla *Hermes Servizi Metropolitani srl* – società *in house* del Comune di Reggio Calabria.

I dati acquisiti, riferiti all'annualità 2021, sono risultati necessari per la calibrazione del modello (Mass Balance) e per la stima del macroindicatore ARERA M1a. Al fine di poter ottimizzare ed approfondire maggiormente lo studio della rete acquedotto di Reggio Calabria sarebbe necessario, in futuro, effettuare delle *misurazioni orarie* dei *volumi immessi in rete* da serbatoi e pozzi al fine di poter valutare la variazione della portata in entrata al sistema, in risposta alla *domanda d'utenza georeferenziata* (anch'essa da misurare su base oraria) ed alle relative perdite idriche sviluppate in rete.

- 2) I ***dati geometrici e topologici*** sono stati acquisiti dalla Regione Calabria su file *.inp di EPANET. Dal punto di vista ingegneristico-idraulico va tuttavia sottolineato che i dati contenuti nel modello sono privi di informazioni specifiche sulle “*curve caratteristiche*” delle pompe inserite nei pozzi comunali e di “*misure di pressione*” in rete. Nell'analisi e validazione dei dati acquisiti è stata inoltre valutata la *possibile* inconsistenza di alcune informazioni topologiche riportate nel modello EPANET che rendono necessari, in futuro, diversi approfondimenti con rilievi specifici di campo al fine di verificare il funzionamento effettivo del sistema.
- 3) In base a quanto riportato nei punti precedenti la ***calibrazione*** del modello della rete acquedotto di Reggio Calabria è stata eseguita mediante la *metodologia avanzata* di separazione delle componenti di “*domanda di utenza*” dalle “*perdite idriche*” a livello di

singola condotta, utilizzando la modellazione avanzata del sistema WDNNetXL, ed imponendo le seguenti ipotesi:

- a) I “pozzi” sono stati inseriti nel modello idraulico come “*serbatoi equipaggiati con valvole di non ritorno*”. Il battente in tali “serbatoi” è stato assunto pari al valore della pressione risultante, negli stessi nodi, dall’esecuzione del modello idraulico sul file EPANET disponibile. A tale proposito si precisa che il modello EPANET acquisito dalla Regione Calabria non assume una portata entrante ai suddetti nodi “pozzo”, pertanto, il valore di pressione utilizzato risulta coerente con quello di semplici *nodi di domanda*. La mancanza di informazioni specifiche sui “pozzi” non ha consentito di poter effettuare ipotesi alternative.
 - b) In rete sono inserite n.2 “*valvole di controllo della pressione*” esistenti nel sistema reale e riportate nel modello EPANET. Delle n.2 valvole è stata mantenuta nella modellazione idraulica della rete solo quella denominata “Alta”, ovvero quella più distante dalla linea di costa, poiché quella denominata “Bassa”, localizzata a ridosso del centro storico abitato, da analisi idrauliche preliminari effettuate, ha presentato un funzionamento “*anomalo*” dovuto alla probabile mancanza, nel modello EPANET di base, della rappresentazione di alcune “chiusure” e/o “organi di regolazione” che ne impedissero il reflusso ed il funzionamento “non coerente” con l’idraulica del sistema reale.
 - c) Il serbatoio denominato “Trabocchetto” presenta n.4 collegamenti alla rete distributrice definiti nel modello EPANET come tronchi “*closed*”. Per quanto esplicitato nei punti precedenti si è ipotizzato il mantenimento di tale configurazione utile, dal punto di vista della modellazione idraulica del sistema, a preservare il dato EPANET sulla pressione nei nodi rappresentativi dei “pozzi”.
- 4) Al netto delle assunzioni e delle ipotesi di modellazione e di calcolo specificate nei punti precedenti, il valore del macroindicatore ARERA $M1a = 123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$, ricavato come risultato della modellazione e verifica della rete acquedotto di Reggio Calabria, risulta “idraulicamente” attendibile considerando l’assetto “*altimetrico*” della rete ed il “*dato aggregato di perdite idriche*” determinato in base ai dati acquisiti sui volumi idrici immessi in rete e quelli in uscita dovuti alle domande effettive delle utenze. Il valore del macroindicatore $M1a = 123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$, decisamente elevato, è infatti la diretta conseguenza della combinazione tra “*pressioni elevate*” e “*forte deterioramento della*

rete acquedotto”. A conferma di quanto sopra riportato le analisi effettuate a supporto della “*gestione*” del sistema mostrano ampi margini di recupero delle perdite da attuarsi mediante un “*controllo efficace delle pressioni*” seguito dalla “*sostituzione pianificata ed ottimizzata delle condotte*”.

Le analisi e le verifiche idrauliche effettuate all’interno della presente tesi di dottorato sulla rete acquedotto di Reggio Calabria rivestono, pertanto, il valore di un valido “caso reale” di studio “dimostrativo” della metodologia strutturata proposta. Da tale studio sono stati infatti ottenuti risultati idraulici verosimili rispetto alla configurazione nota della rete acquedotto. È comunque opportuno precisare che senza l’ausilio di ulteriori approfondimenti di campo inerenti la rete reale “*struttura topologica esistente*” e senza specifiche “*misure di portate e pressioni orarie*” da effettuarsi sui nodi della rete acquedotto, i risultati ottenuti non sono al momento completamente utilizzabili per supportare attività gestionale e/o progettuale del sistema.

5.2. ACQUISIZIONE TOPOLOGIA E PORTATE IMMESSE NELLA RETE DISTRIBUTTRICE - VALORIZZAZIONE DEI DATI

L’attività di modellazione idraulica avanzata della rete idrica reale della Città di Reggio Calabria ha comportato la necessità di acquisire i *dati geometrici e topologici* delle condotte, i *dati di portata in ingresso* alla rete di distribuzione provenienti dall’acquedotto esterno, i *dati georeferenziati delle utenze servite* e le relative *portate in uscita* dalla rete acquedotto ed i dati caratteristici del funzionamento del sistema (presenza di saracinesche, valvole di riduzione di pressione e relativo grado di apertura, pozzi etc.).

La raccolta e l’analisi delle informazioni di base, necessarie alla creazione del *modello idraulico avanzato*, e la loro successiva conversione in formati direttamente utilizzabili come *input* all’interno del *software* di modellazione, ha rappresentato un elemento di fondamentale importanza per la rappresentazione di un modello numerico (*ingegnerizzazione del sistema*) che riuscisse a riprodurre, con la maggiore accuratezza possibile, il reale funzionamento del sistema idrico nelle diverse condizioni di esercizio.

Nello sviluppo della modellazione numerica della rete esistente, al fine della corretta simulazione idraulica del funzionamento reale del sistema, ha rivestito pertanto un’importanza fondamentale la **fase preliminare di ricerca informazioni e raccolta dati**,

effettuata presso la Regione Calabria, la SORICAL ed il Comune di Reggio Calabria territorialmente competente, integrata da una serie di sopralluoghi di campo effettuati in zone specifiche del “sistema acquedotto” che maggiormente ne possono influenzare il funzionamento. I dati acquisiti, necessari per lo sviluppo dello “*schema idraulico*” della rete di distribuzione oggetto di studio, sono stati finalizzati all’elaborazione di un corretto ***bilancio idrico*** del sistema ed a un’ottimale rappresentazione della rete; si riporta a seguire una sintesi dei dati acquisiti:

- ✓ **Individuazione e rappresentazione plano-altimetrica e topologica in ambiente GIS** delle tubazioni che costituiscono la rete di distribuzione cittadina, primarie e secondarie, specificando per ogni condotta le seguenti caratteristiche topologiche principali (*Diametro, Tipologia materiale etc.*). La rete acquedotto rappresentata di Reggio Calabria ha una ***lunghezza complessiva di circa 318,91km*** di condotte;
- ✓ **Determinazione della fascia di alimentazione della rete idrica annessa ai diversi punti di immissione dei volumi idrici in rete (serbatoi e pozzi)**; ottenuta mediante la consultazione presso gli Enti territorialmente competenti di cartografie e schemi acquedottistici, nonché dall’effettuazione di sopralluoghi specifici sul territorio;
- ✓ **Dati delle portate immesse in rete** dai diversi serbatoi e pozzi di riferimento del sistema idrico della Città di Reggio Calabria con specifico riferimento alla “zona Centro” (*Regione Calabria, SORICAL, Comune di Reggio Calabria*).
- ✓ **Dati dei consumi di utenza** per l’annualità 2021 acquisiti come *database* separato su file MS-Excel® fornito dalla *Hermes Servizi Metropolitanari srl* – società *in house* del Comune di Reggio Calabria.

Al fine di una corretta riproduzione del comportamento del sistema reale ed a garanzia dell’affidabilità del risultato numerico ottenuto, **il modello idraulico è stato calibrato rispetto alla rete reale tramite i dati acquisiti presso i data base degli Enti competenti** con riferimento specifico all’annualità 2021 (*volume idrico immesso in rete dai singoli serbatoi e pozzi e volume fatturato alle singole utenze “georeferenziate” insistenti sulla rete oggetto di studio*).

L’acquisizione della topologia e le prime **verifiche topologiche** relative a *nodi e/o tubazioni isolate, porzioni di reti disconnesse, verifiche delle altezze geodetiche* attraverso DEM, della *coerenza idraulica dei diametri*, etc. sono state eseguite in fase di importazione

all'interno del sistema WNetXL dei dati del modello forniti dalla Regione Calabria in formato *.inp di EPANET. Tali verifiche, specificate in dettaglio nel seguito, hanno consentito di “valorizzare” il dato di origine sia rispetto alla *topologia* della rete sia con riferimento al *reale funzionamento* del sistema riprodotto dal *modello idraulico avanzato*, funzionale ad eseguire tutte le successive fasi di verifica idraulica.

Sono stati pertanto importati all'interno del sistema WNetXL i seguenti elementi:

- **Caratteristiche topologiche, materiali e geometrie dei tronchi** (file *.inp di EPANET). Su tale file sono state riscontrate incongruenze su informazioni relative ai diametri di tubazioni, in particolar modo di breve lunghezza, e sono state effettuate *correzioni* seguendo un *criterio di coerenza idraulica con i tronchi contigui*. Dal punto di vista ingegneristico-idraulico va tuttavia sottolineato che la mancanza di informazioni specifiche sulle “*curve caratteristiche*” delle pompe inserite nei pozzi, di “*misure di pressione*” in rete e la *possibile* inconsistenza di alcune informazioni topologiche riportate nel modello EPANET, rendono necessari, in futuro, diversi approfondimenti sul funzionamento effettivo del sistema (ad esempio sarebbero da verificare puntualmente con accertamenti di campo alcuni collegamenti idraulici che, da modello acquisito, risultano “chiusi” in corrispondenza del serbatoio denominato “Trabocchetto”);

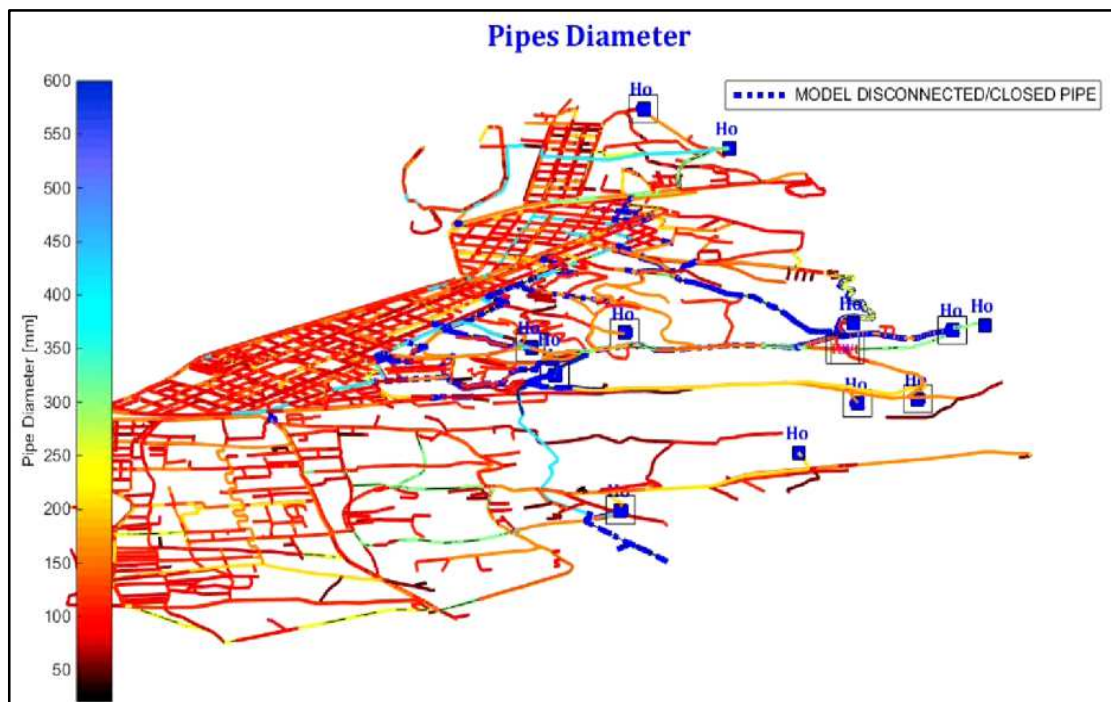


Fig.59. Modello Idraulico della Rete di Reggio Calabria con indicazione grafica “diametro condotte”

- **Diramazioni e sub-diramazioni:** verifica della congruità dei collegamenti tra serbatoi, partitori e pozzi, utilizzati per ricostruire gli schemi di alimentazione e la connettività delle reti suburbane;
- **Volumi idrici di immesso in rete** riferiti all'annualità 2021 e relativi dalle diverse fonti di approvvigionamento idrico alla rete distributrice (serbatoi e pozzi).



Fig.60. Immagine Satellitare Rete Acquedotto Reggio Calabria con identificazione Serbatoi e Pozzi

SERBATOIO		Portata [l/s]	Portata [mc/anno]
Codice Epanet	denominazione	anno 2021	anno 2021
SBR07	S. Caterina	64.74	2'041'640.64
SBR11	S. Sperato	45.44	1'432'995.84
SBR12	Modena	239.04	7'538'365.44
SBC19	Lazzaretto	38.01	1'198'683.36
SBC21	Trabocchetto	159.77	5'038'506.72
SBR08	Partitore Trabocchetto	22.00	693'792.00
SBC20	Condera	77.00	2'428'272.00
SBR02	Condera		
TOTALE			20'372'256.00

POZZO		Portata [l/s]	Portata [mc/anno]
Codice Epanet	denominazione	anno 2021	anno 2021
PZC19	Via S. Caterina	5.00	157'680.00
PZC20	Trabocchetto 1	10.00	315'360.00
PZC28	S. Antonio	4.00	126'144.00
PZC33	Trabocchetto 2	12.00	378'432.00
PZC35	via Mili	5.00	157'680.00
PZC95	S. Cristoforo	5.00	157'680.00
PZC96	S. Cristoforo	5.00	157'680.00
TOTALE			1'450'656.00

Fig.61. Tabella Portate Immesse in Rete Acquedotto Reggio Calabria – Anno 2021 - Serbatoi e Pozzi

- **Valvole installate in rete**, con indicazione dello specifico stato idraulico (*aperto/chiuso*). Nel modello acquisito sono rappresentate n.2 “*valvole di controllo della pressione*” esistenti nel sistema reale. Nella modellazione avanzata del sistema in WDNNetXL è stata tuttavia mantenuta in funzione solo n.1 valvola, denominata “Alta” in quanto con quota topografica più elevata e maggiormente distante dalla linea di costa. La seconda valvola denominata “Bassa”, localizzata a ridosso del centro storico abitato, da analisi idrauliche preliminari effettuate sul modello avanzato ha presentato infatti un funzionamento “*anomalo*” dovuto alla probabile mancanza, nel modello EPANET di base, della rappresentazione di ulteriori “*chiusure*” e/o “*organi di regolazione*” che ne impedissero il reflusso e la chiusura e rendessero realistico il suo funzionamento nel modello;

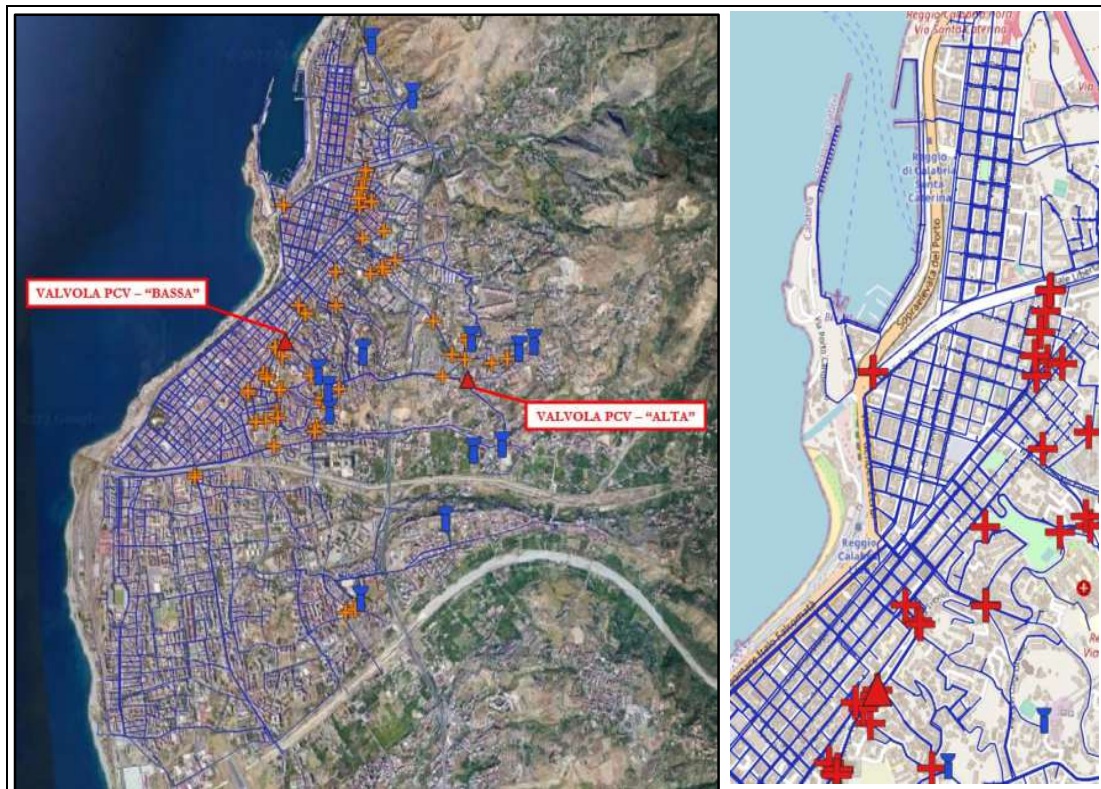


Fig.62. Immagine Satellitare Rete Acquedotto Reggio Calabria - identificazione Valvole PCV e chiusure

5.2.1. SEMPLIFICAZIONE TOPOLOGICA con riferimento a tronchi piccoli

Nell’importazione della rete acquedotto dal file *.inp di EPANET nel sistema WDNNetXL sono stati identificati ed eliminati tutti i *tronchi di lunghezza inferiore a 1,00mt* in quanto rappresentativi di elementi in serie all’interno di tratti più estesi di condotte e semplificando, pertanto, la topologia della rete in quanto:

- per come accennato al *capitolo 3* della presente tesi non si tratta di *elementi* necessari a definire la posizione dei *dispositivi* che in WDNNetGIS-WDNNetXL viene invece definita come proprietà degli elementi *link*;
- non aggiungono informazioni al modello idraulico fenomenologico della rete;
- introducono all'interno del modello della rete acquedotto delle condotte *non efficaci* alle successive fasi di *segmentazione* e, quindi, di *distrettualizzazione idraulica*.

5.3. ACQUISIZIONE ED IMPORTAZIONE DEI DATI DI CONSUMO ALLE SINGOLE UTENZE

Nella fase di costruzione del modello, i dati idraulici e fiscali relativi ai singoli contatori di utenza sono stati acquisiti e georeferenziati a partire dagli indirizzi delle utenze forniti come *database* separato su file MS-Excel® dalla *Hermes Servizi Metropolitani srl* – società in *house* del Comune di Reggio Calabria.

Nello sviluppo della tesi è stata, pertanto, eseguita la *georeferenziazione* di *ogni singola utenza* della rete acquedotto di Reggio Calabria utilizzando servizi esterni di “geocoding” (processo di conversione di un indirizzo di “utenza” in una posizione geografica “georeferenziata”) integrabili al sistema WDNNetGIS.

L'informazione sul numero di contatori associati a ciascun tronco è stata ulteriormente *valorizzata* utilizzandola come variabile che influenza il “*parametro di deterioramento*” delle condotte in sede di calibrazione del modello di perdite.

I dati idraulici e fiscali “*georeferenziati*” relativi ai singoli contatori (**54.704 utenze**) sono stati successivamente importati e resi disponibili all'interno del modello idraulico in WDNNetXL come *database* separato. Questa procedura ha permesso di poter considerare ciascuna utenza “singolarmente” durante le simulazioni idrauliche, senza la necessità di *aggregazione delle domande idriche nei nodi* del modello e consentendo, altresì, di separare le utenze *attive* da quelle *non attive* (pur mantenendo l'informazione di queste ultime) e di specificare per ciascuna la tipologia di contratto.

Tale rappresentazione dei consumi predispone il modello idraulico generato all'acquisizione di dati di dettaglio che potranno essere disponibili nel prossimo futuro come, ad esempio, l'altezza degli edifici da servire e il numero di piani o la presenza di volumi di accumulo privati (autoclavi).

In presenza di tali informazioni questa funzionalità innovativa di simulazione idraulica in WDNNetXL permetterà di poter valorizzare i dati disponibili anche per indicare eventuali utenze in “deficit” in funzione delle peculiari condizioni di fornitura (es. presenza di autoclavi o allaccio diretto di edifici multipiano).

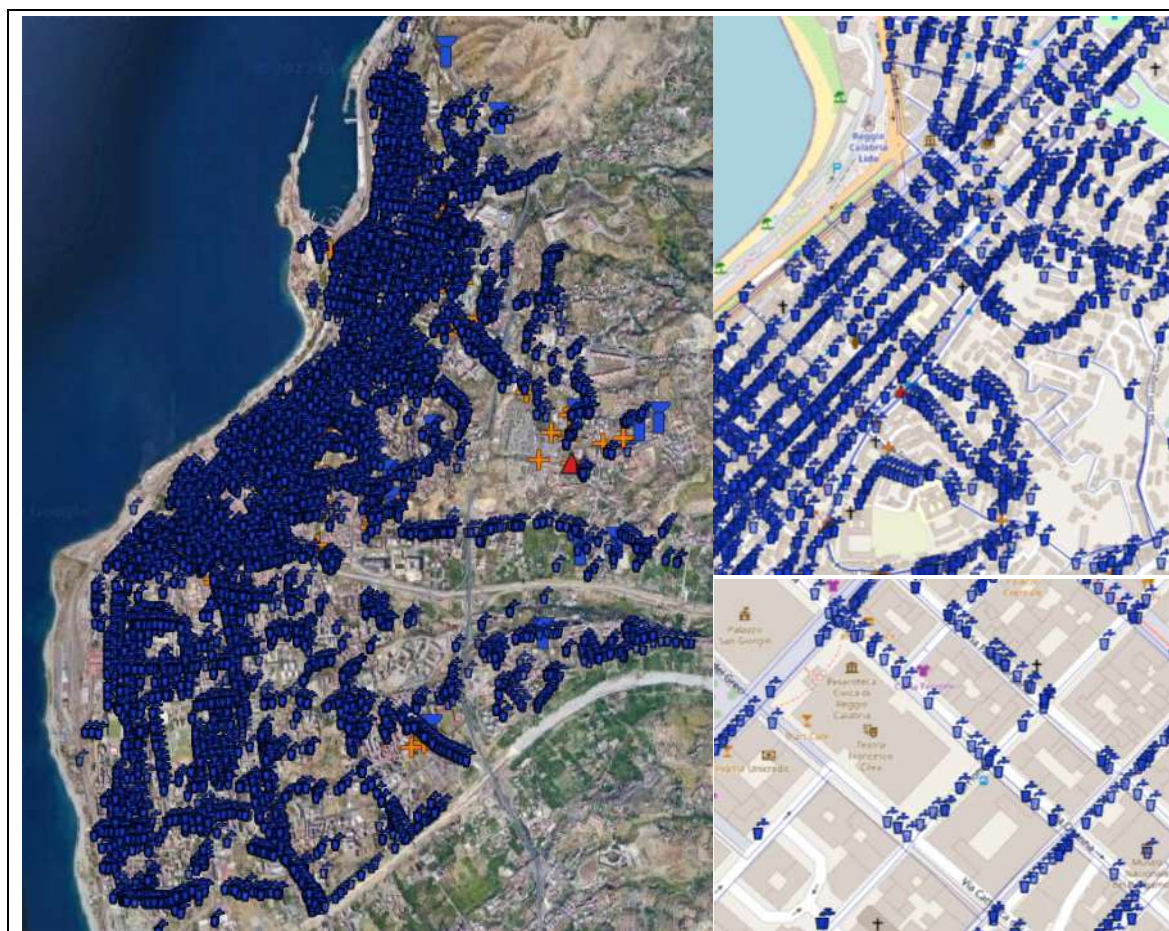


Fig.63. Rete Acquedotto Reggio Calabria con 53.704 Utenze/Contatori Georeferenziati

ANNO	CITTA'	INDIRIZZO	MATRICOLA CONTATORE	CONSUMO [mc/anno]	Coord. X [mt]	Coord. Y [mt]	Coord. Z [mt]
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA POLA 7 REGGIO DI CALABRIA	5014120/50	70	2577434.808	4220283.872	24.28521764
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA SALITA STAZIONE SANTA CATE 18 REGGIO DI CALABRIA	2562/50	154	2577433.262	4220135.303	20.2754624
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA SANTA CATERINA 138 REGGIO DI CALABRIA	16CA019633	114	2577646.267	4219611.939	33.2647304
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA ENOTRIA 18 REGGIO DI CALABRIA	06D048300/50	56	2577348.894	4220201.608	14.58823713
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA CARSO 5 REGGIO DI CALABRIA	3748916/50	347	2577435.273	4220282.555	24.31288957
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA ESPERIA 2 REGGIO DI CALABRIA	50566/90	152	2577290.733	4219747.689	17.62101536
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA ASCHENEZ PROLUNGAMENTO CEN 26 REGGIO DI CALABRIA	4344290/50	143	2577469.704	4220117.295	24.77386273
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA ESPERIA 17 REGGIO DI CALABRIA	011682/50	205	2577490.048	4219774.916	24.64287807
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA STRADELLA GIUFFRE 1 32 REGGIO DI CALABRIA	15221029	108	2577505.034	4219899.335	24.95694445
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA ITALIA 43 REGGIO DI CALABRIA	11681/50	98	2577637.818	4219715.741	32.51229019
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA SANTA CATERINA 185 REGGIO DI CALABRIA	52442/50	152	2577384.956	4220218.74	17.18706459
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA MONTEVERGINE PEITI 1 REGGIO DI CALABRIA	7261430/50	313	2576097.674	4217497.687	12.65213719
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA CARRERA II 36 REGGIO DI CALABRIA	D11CA034328/50	34	2577580.645	4219631.892	29.72740986
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA CARRERA II 16 REGGIO DI CALABRIA	95119015/50	64	2577666.033	4219840.886	34.99039417
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA STRADELLA GIUFFRE III 3 REGGIO DI CALABRIA	04B025312/50	114	2577666.033	4219840.886	34.99039417
2021	REGGIO DI CALABRIA	VIA STRADELLA GIUFFRE III 3 REGGIO DI CALABRIA	97126101/90	114	2577726.214	4219166.653	42.62700052

Fig.64. Rete Acquedotto Reggio Calabria – Stralcio Tabella Utenze/Contatori Georeferenziati

5.4. CALIBRAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO IN WDNETXL E VERIFICA FUNZIONAMENTO ACQUEDOTTO CITTÀ DI REGGIO CALABRIA

La *calibrazione* del modello idraulico avanzato, che include le perdite volumetriche a livello di singola tubazione in funzione della pressione, è stata eseguita utilizzando un approccio innovativo basato sul concetto di “bilancio di massa”. Sono stati pertanto identificati i parametri del modello di *perdita idrica volumetrica* ed in funzione del *pattern* di domanda dell’utenza unitamente alla variabilità della domanda media giornaliera con riferimento al ciclo operativo scelto.

La calibrazione del modello idraulico ha permesso di separare, nella portata immessa complessiva in rete, la componente “*statistica*” della *domanda*, ovvero quella legata ai consumi di utenza, da quella “*deterministica*” delle *perdite idriche volumetriche*, ovvero funzione delle pressioni medie nelle tubazioni.

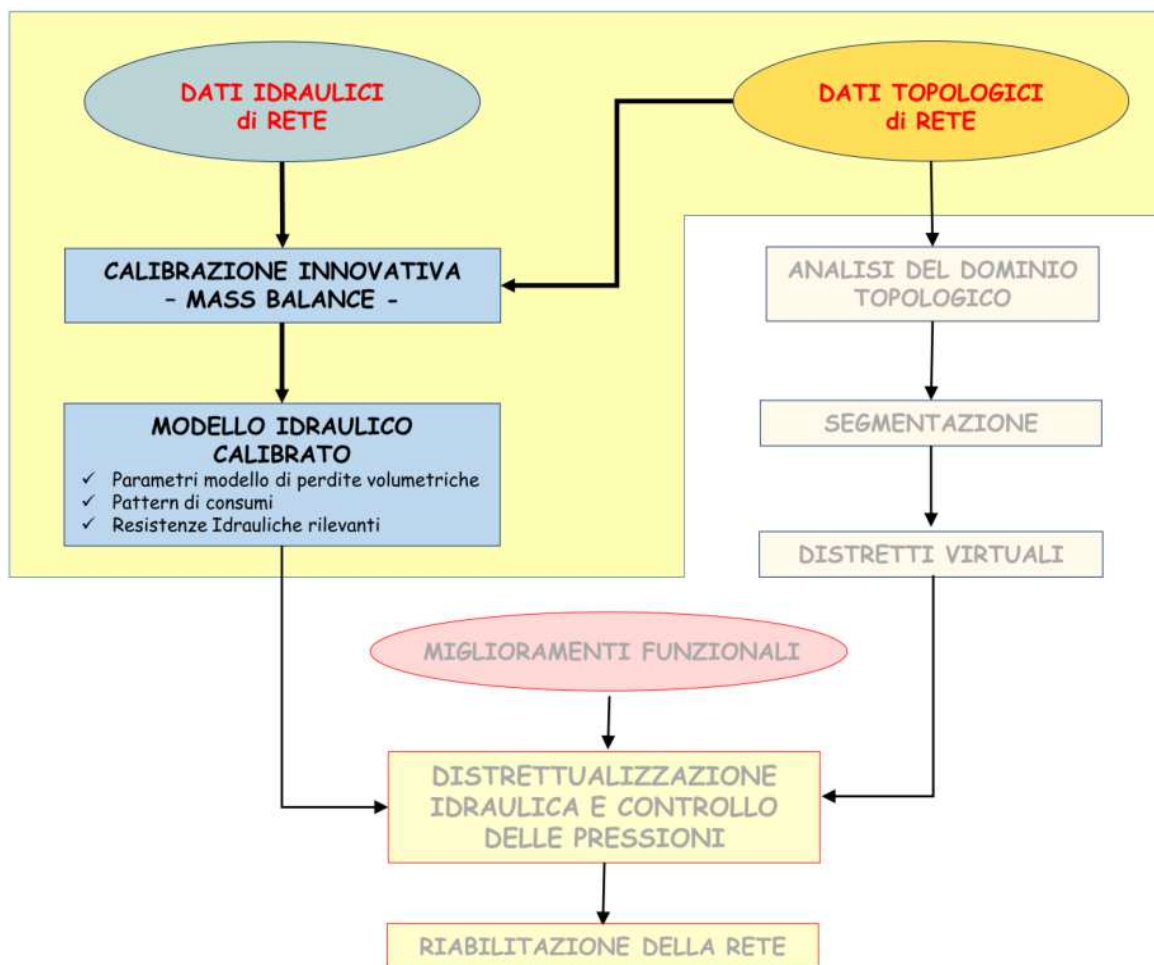


Fig.65. Flow-Chart iter metodologico – Fase Calibrazione Innovativa ed Analisi del modello idraulico calibrato

La calibrazione del modello idraulico della rete acquedotto di Reggio Calabria è stata, pertanto, effettuata sulla base di due aspetti essenziali:

- a) **Mass Balance**, approccio consistente con la separazione della portata idrica immessa complessiva in rete tra “domanda” e “perdite”;
- b) **Differenziazione della propensione alla perdita per ogni singola condotta di rete.**

La distribuzione delle perdite è stata determinata attraverso una “statistica” di propensione al guasto, calcolata per ogni singola condotta del sistema modello, che deriva dalla letteratura tecnico-scientifica internazionale. Il metodo utilizzato non è infatti legato necessariamente alla disponibilità di “dati” ma tende a massimizzare l’informazione di “propensione al guasto” delle condotte in funzione dei dati e delle diverse caratteristiche infrastrutturali a disposizione come, ad esempio, il numero di allacci, il diametro o la lunghezza delle condotte (*Propensione statistica alla perdita da Data-Modelling EPR-MOGA – Evolutionary Polynomial Regression*).

La **calibrazione innovativa** utilizzata ha permesso, pertanto, di poter definire i parametri del modello delle **perdite volumetriche**, le **resistenze idrauliche delle linee di alimentazione principali** e la valutazione dei **volumi di perdite idriche** della rete acquedotto di Reggio Calabria per il periodo di studio considerato (anno 2021).

Tale procedura ha permesso di ottenere **valori calibrati** del parametro β di deterioramento il più realistici ed accurati possibili rispetto all’informazione a disposizione. La **calibrazione per fini gestionali** è, pertanto, operativamente parte di un processo dinamico che parte assumendo una distribuzione iniziale dei valori di β .

Tale distribuzione può derivare dalla elaborazione del dato di perdita riportato in modelli esistenti in base a monitoraggio pregresso del sistema ovvero, come nel caso studio di Reggio Calabria, determinate in funzione di **caratteristiche infrastrutturali specifiche della rete** come i **diametri**, le **lunghezze** ed il **numero di connessioni delle utenze alle singole condotte**. Analisi effettuate nel tempo su molteplici reti acquedottistiche hanno dimostrato che la variazione del parametro di deterioramento β non altera le pressioni in rete ma, piuttosto, fa variare la distribuzione delle perdite tra i diversi tronchi.

Nel caso studio specifico della rete reale di Reggio Calabria, i dati e le caratteristiche “topologiche” infrastrutturali a disposizione utilizzate per ottenere **valori calibrati** del

parametro di deterioramento β e per la *calibrazione* del modello idraulico sono state:

- il **numero di allacci** presenti sulla singola condotta della rete acquedotto, ottenuto utilizzando un criterio di “prossimità” alle condotte del singolo contatore “georeferenziato”;
- il **diametro** della singola condotta della rete acquedotto;
- la **lunghezza** della singola condotta della rete acquedotto.

In base a quanto già riportato sinteticamente nel paragrafo 5.1 la *calibrazione* del modello della rete acquedotto di Reggio Calabria è stata eseguita utilizzando la modellazione avanzata del sistema WDNNetXL, ed imponendo le seguenti ipotesi di base:

- a) I “pozzi” sono stati inseriti nel modello idraulico come “*serbatoi equipaggiati con valvole di non ritorno*”. Il battente in tali “serbatoi” è stato assunto pari al valore della pressione risultante, negli stessi nodi, dall’esecuzione del modello idraulico sul file EPANET disponibile. A tale proposito si precisa che il modello EPANET acquisito dalla Regione Calabria non assume una portata entrante ai suddetti nodi “pozzo”, pertanto, il valore di pressione utilizzato risulta coerente con quello di semplici *nodi di domanda*. La mancanza di informazioni specifiche sui “pozzi” non ha consentito di poter effettuare ipotesi alternative.
- b) In rete sono inserite n.2 “*valvole di controllo della pressione*” esistenti nel sistema reale e riportate nel modello EPANET. Delle n.2 valvole è stata mantenuta nella modellazione idraulica della rete solo quella denominata “Alta”, ovvero quella più distante dalla linea di costa, poiché quella denominata “Bassa”, localizzata a ridosso del centro storico abitato, da analisi idrauliche preliminari effettuate, ha presentato un funzionamento “*anomalo*” dovuto alla probabile mancanza, nel modello EPANET di base, della rappresentazione di alcune “chiusure” e/o “organi di regolazione” che ne impedissero il reflusso ed il funzionamento “non coerente” con l’idraulica del sistema reale.
- c) Il serbatoio denominato “Trabocchetto” presenta n.4 collegamenti alla rete distributrice definiti nel modello EPANET come tronchi “*closed*”. Per quanto esplicitato nei punti precedenti si è ipotizzato il mantenimento di tale configurazione utile, dal punto di vista della modellazione idraulica del sistema, a preservare il dato EPANET sulla pressione nei nodi rappresentativi dei “pozzi”.

- d) Non avendo il Gestore della rete acquedotto di Reggio Calabria a disposizione i dati in continuo di portata erogata alle singole utenze, ma esclusivamente il dato aggregato di consumo annuale (fatturazione) riferito all'anno 2021, la *calibrazione* del modello è stata condotta utilizzando il *pattern calibrato* di domanda dell'utenza della Città di Bari (domanda media giornaliera riferita a n.1 ciclo operativo giornaliero caratteristico, combinazione di condizioni feriali/festivi). La scelta operativa di utilizzare il *pattern calibrato* della Città di Bari è dovuto al fatto che trattasi di “centro urbano” molto simile come conformazione plano-altimetrica e sviluppo socio-economico alla Città di Reggio Calabria.
- e) Sono stati inseriti in tutte le utenze georeferenziate del modello idraulico della rete i “serbatoi privati” (impianti autoclave), molto diffusi nella rete di Reggio Calabria. A tal fine è stato ipotizzato che il volume massimo di accumulo di ciascun serbatoio privato riesca a coprire n.6 ore della domanda di base della singola utenza. Si è inoltre ipotizzato che all'inizio del ciclo giornaliero di simulazione idraulica del sistema tutti i serbatoi privati siano pieni (ipotesi coerente con il reale funzionamento del sistema acquedotto, in quanto i serbatoi si riempiono tipicamente durante la notte ed erogano portata durante il giorno). La rete, pertanto, alimenta i serbatoi privati che, a loro volta, alimentano le singole utenze. Le ipotesi fatte sono realistiche e coerenti con il reale funzionamento idraulico della rete in quanto: in tutte le utenze che presentano pressioni al contatore maggiori della pressione di esercizio i serbatoi rimangono sempre pieni, mentre si verificherà uno svuotamento/riempimento dei serbatoi associati alle utenze che, in alcune ore della giornata, vanno in “deficit” di pressione rispetto alla pressione minima di esercizio.

Viene di seguito riportata la modellizzazione ingegneristica *avanzata* del comportamento idraulico della rete acquedotto di Reggio Calabria rappresentata sul *Gemello Digitale della rete reale - Digital Twin*.

I *risultati dello studio idraulico* della rete reale esistente, ottenuti a seguito della *calibrazione* del modello, risultano “idraulicamente” attendibili considerando l'assetto “*altimetrico*” della rete ed il “*dato aggregato di perdite idriche*” determinato in base ai dati acquisiti sui volumi idrici immessi in rete e quelli in uscita dovuti alle domande effettive delle utenze georeferenziate.

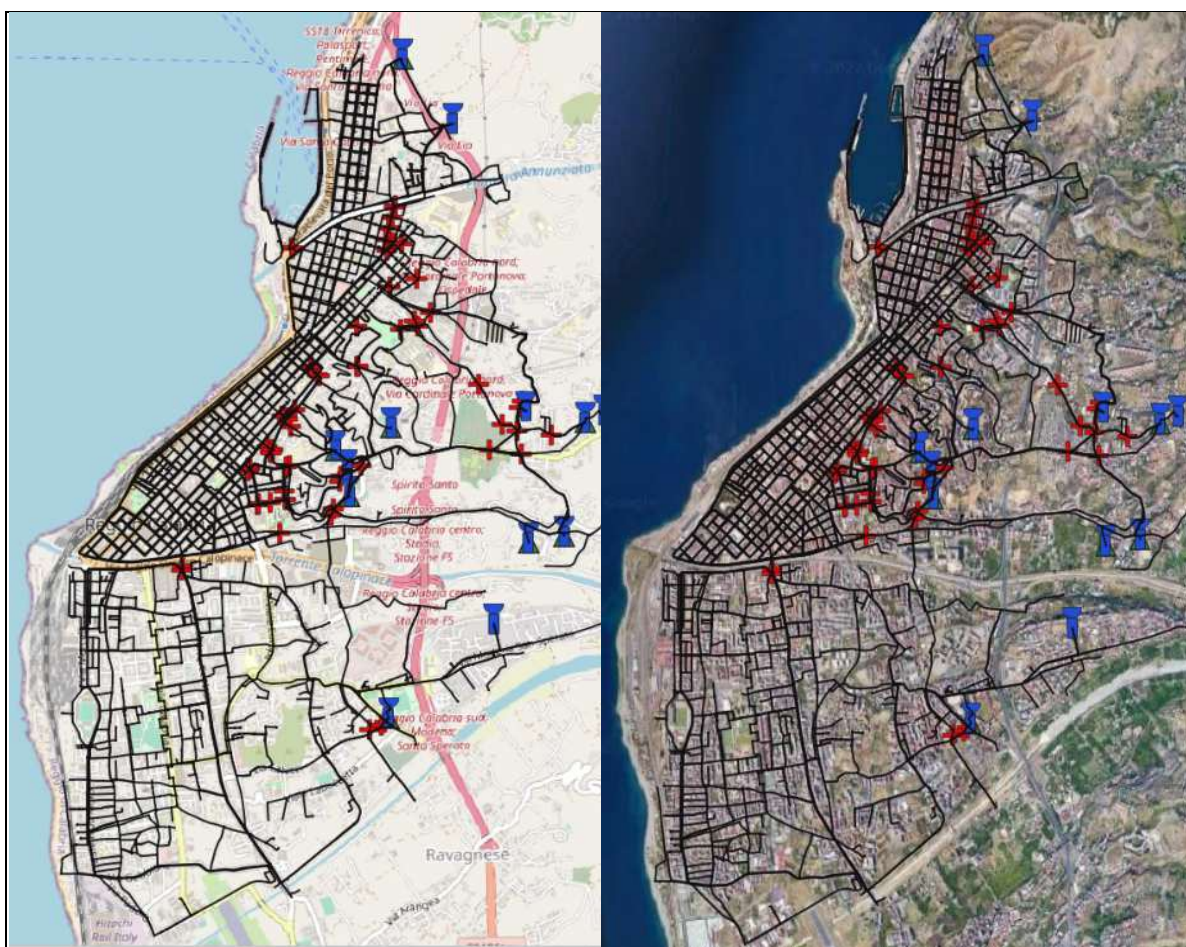


Fig.66. Rappresentazione in QGIS del Gemello Digitale (Digital Twin) della Rete Acquedotto Reggio Calabria

Nella figura n.67 viene riportato, in grafico, il **pattern di domanda** i cui fattori, moltiplicati per la domanda di base (*media giornaliera*), forniscono i valori medi “stazionari” alla scala definita nel modello. La variabilità giornaliera dell’impresso in rete, che si traduce nei *patterns di domanda* del sistema, riveste un ruolo determinante nella calibrazione idraulica del modello e si ripercuote sui valori di pressione media alla *scala del modello*.

Nella figura 68 vengono riportate in grafico le diverse componenti del **pattern delle portate in ingresso** al sistema, ottenuto dalla separazione delle componenti principali che determinano il bilancio di massa nel sistema acquedottistico, a partire dai dati acquisiti dalle portate complessive in ingresso alla rete ed in funzione del *pattern delle domande* delle utenze (figura n.67).

La separazione delle due diverse componenti del *pattern di domanda* non può fare a meno della valutazione delle *pressioni medie in rete* e, pertanto, della *calibrazione delle scabrezze*, ovvero delle *resistenze idrauliche delle tubazioni*.

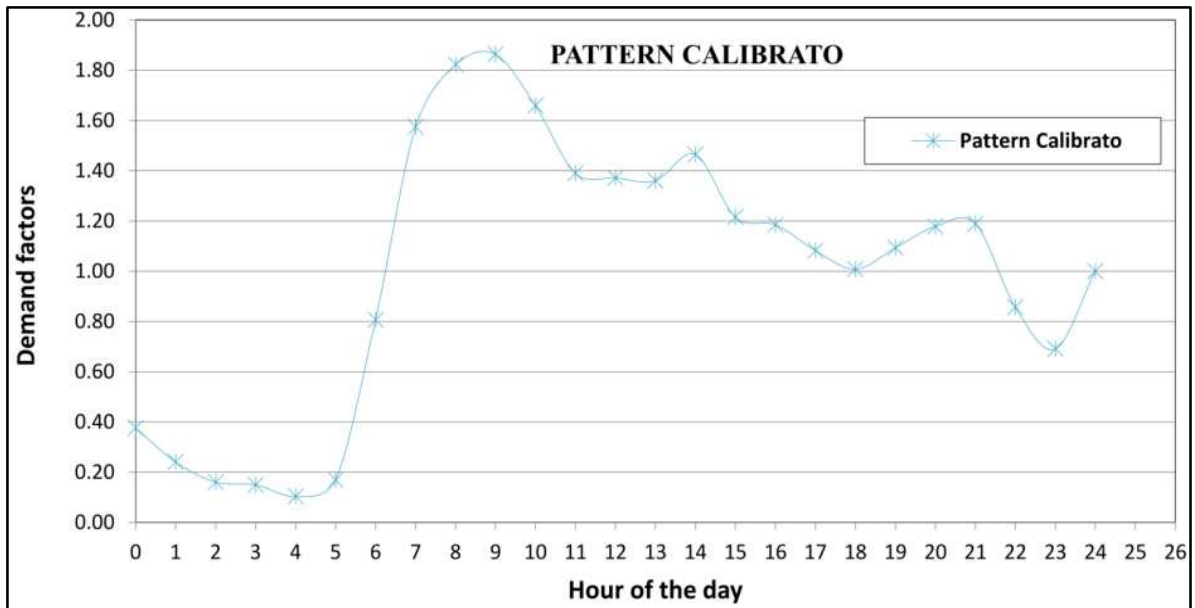


Fig.67. Pattern di Domanda su n.1 ciclo di 24 ore

Dal grafico in figura n.68 sono distinguibili i valori dei volumi idrici ottenuti per le diverse componenti del “*pattern di portata in ingresso*” considerate e nel quale viene valutate *Perdite Volumetriche (Volume Background Leaks) pari a circa 39.180 mc/giorno:*

- **Volume Background Leaks (Perdite Volumetriche) di rete:** 39.180 mc/giorno;
- **Volume Customer Demand (Domanda delle UtENZE):** 18.717 mc/giorno;
- **Volume Private Tanks (Domanda Serbatoi Provati delle UtENZE):** 18.638 mc/giorno.

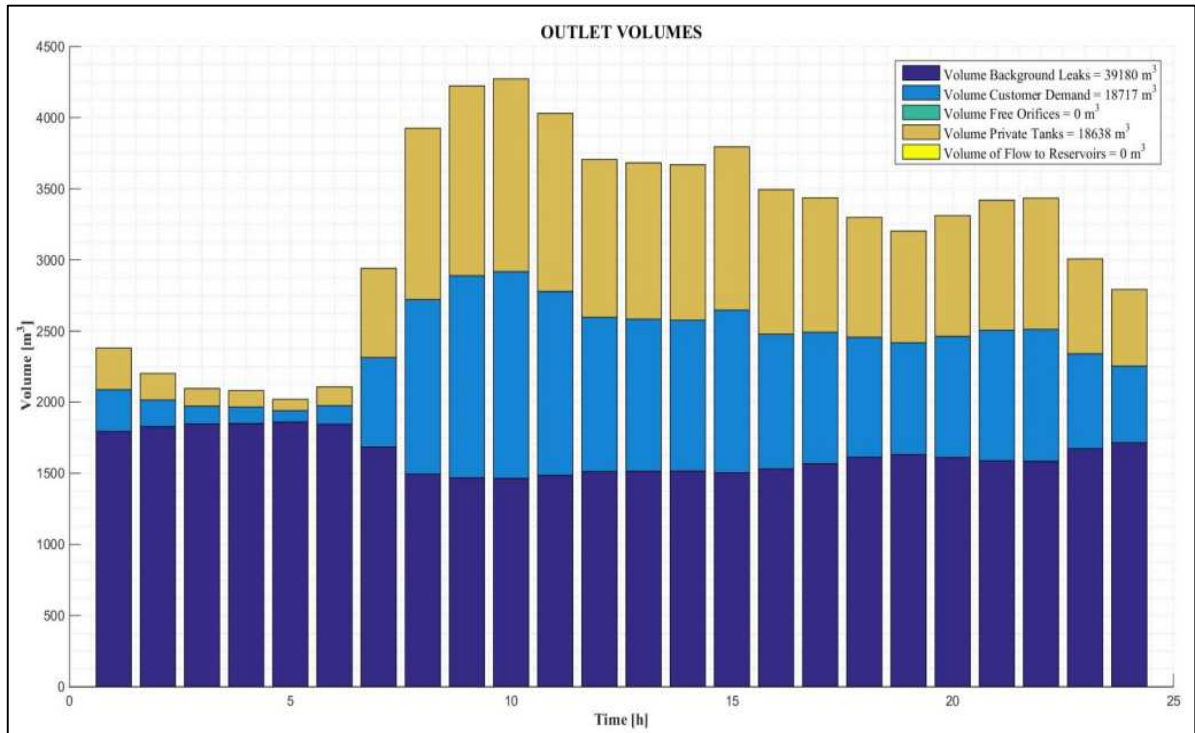


Fig.68. Componenti del pattern di della portata in ingresso (perdite volumetriche e domanda di utenze).

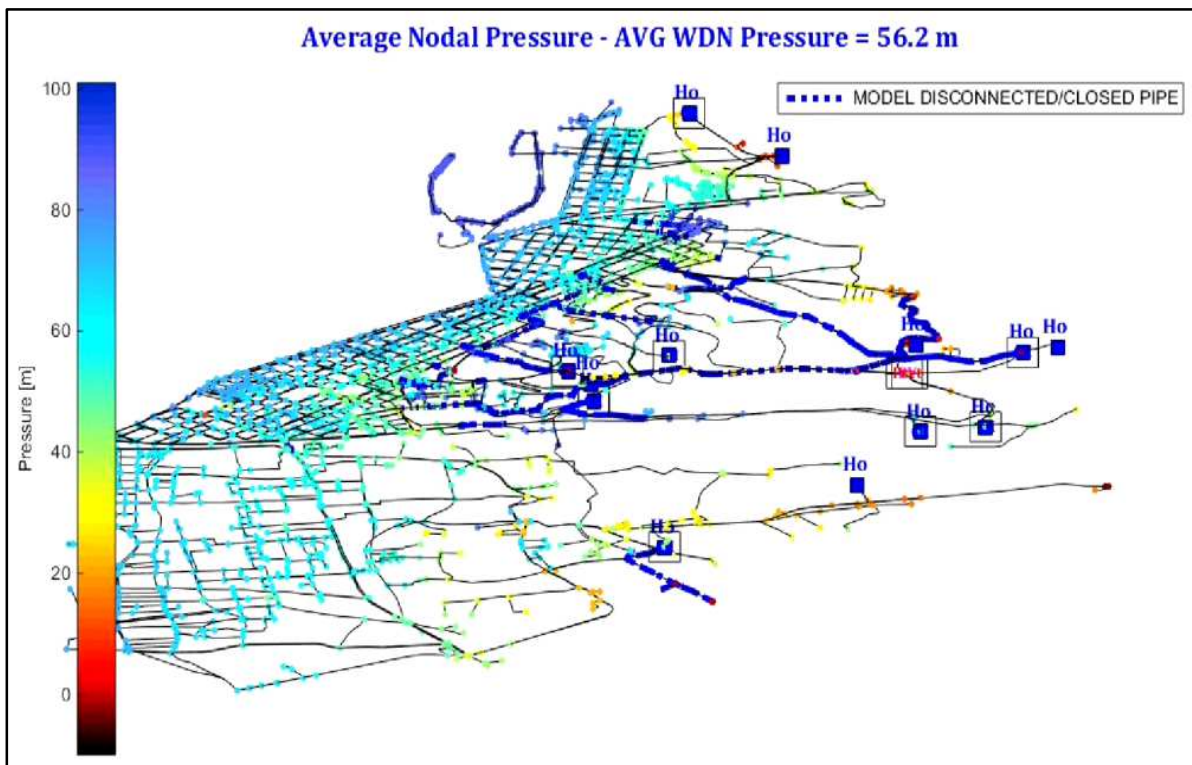


Fig.69. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria – Pressione Media 56,20mt

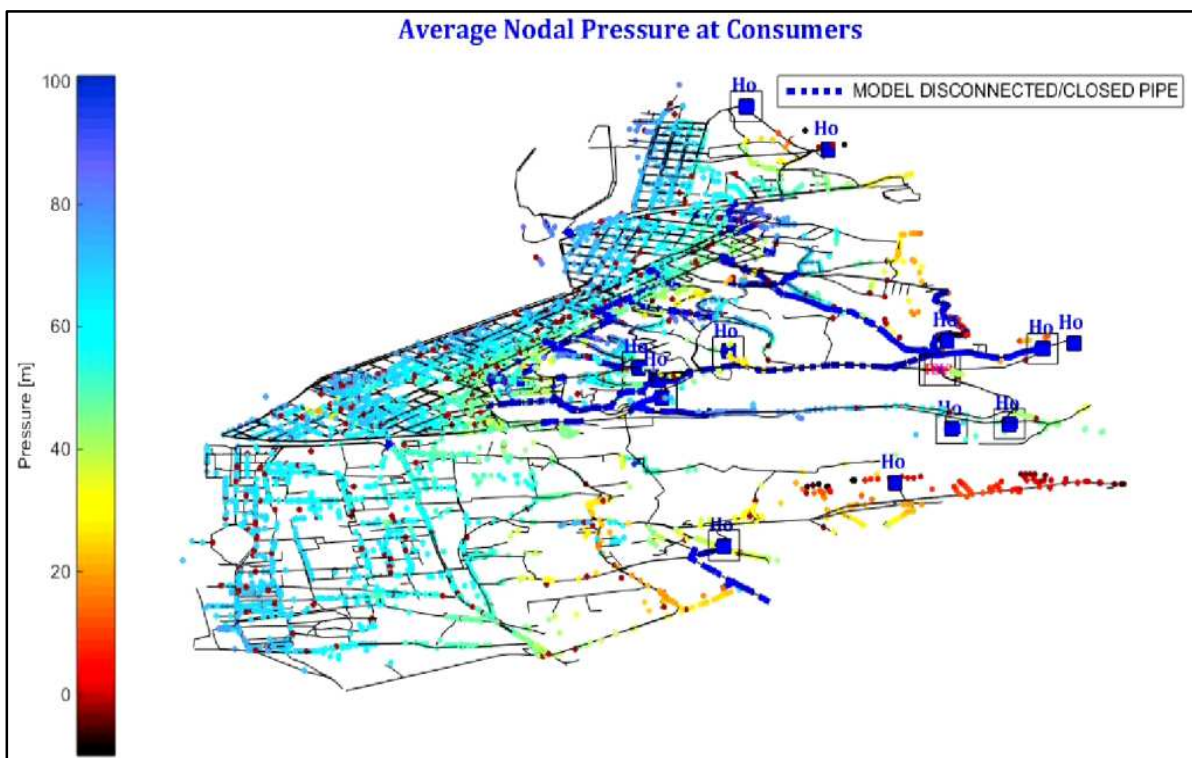


Fig.70. Distribuzione delle Pressioni medie nelle singole Utenze georeferenziate della rete di Reggio Calabria

I risultati ottenuti sulle *pressioni medie* a livello di nodo ed a livello di singole Utenze “georeferenziate” della rete acquedotto di Reggio Calabria risultano “idraulicamente” attendibili considerando l’assetto “altimetrico” del sistema idrico.

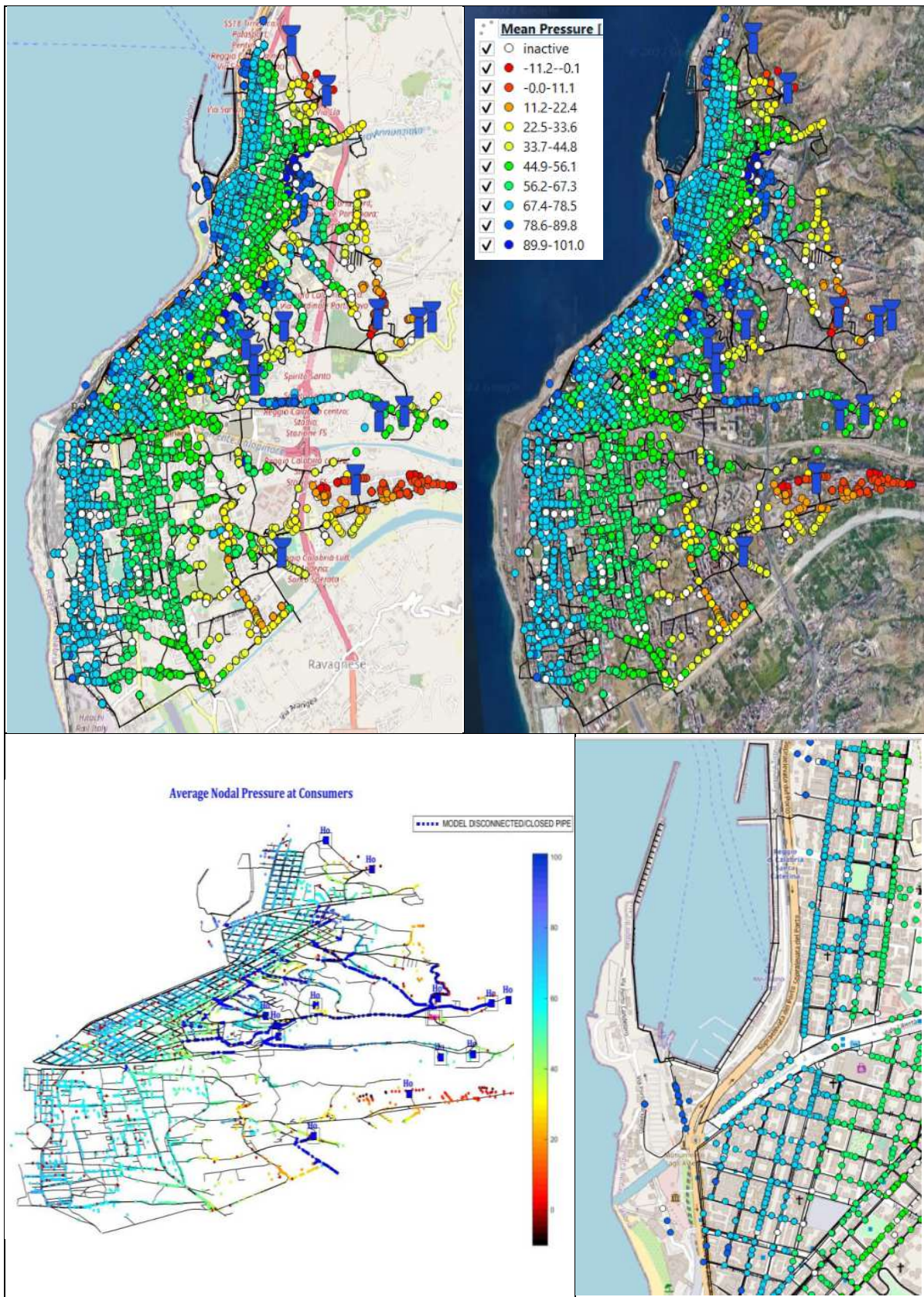


Fig.71. Distribuzione delle Pressioni medie nelle singole Utenze georeferenziate della rete si Reggio Calabria

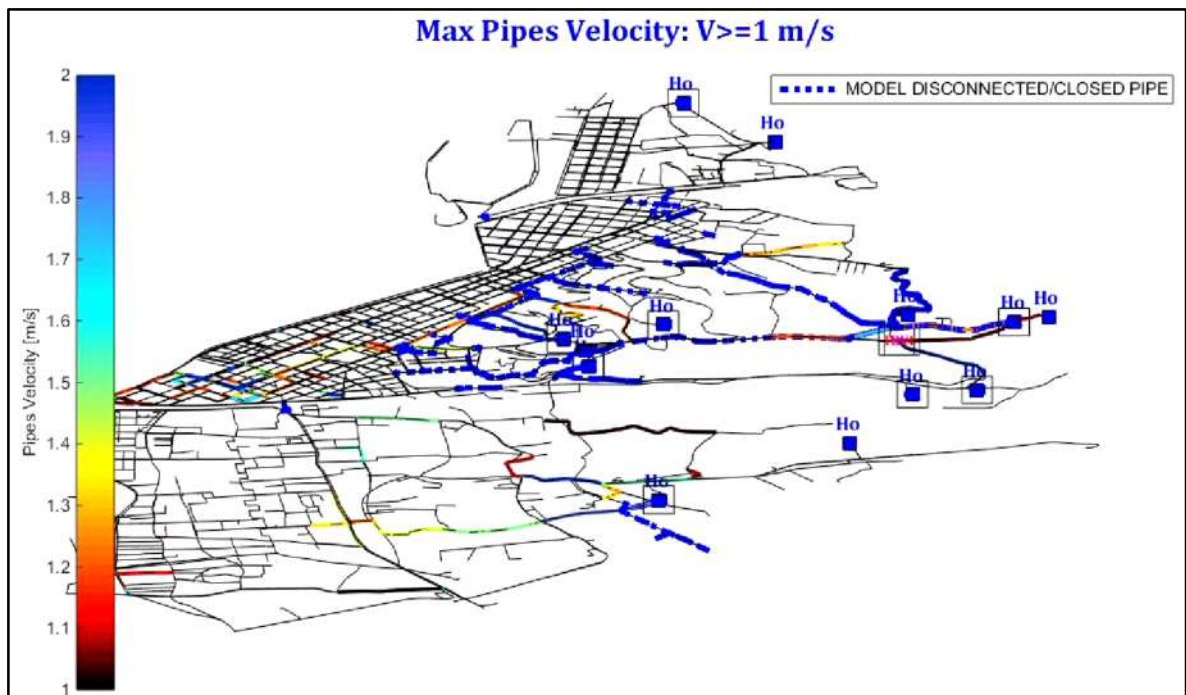


Fig.72. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte della rete di Reggio Calabria

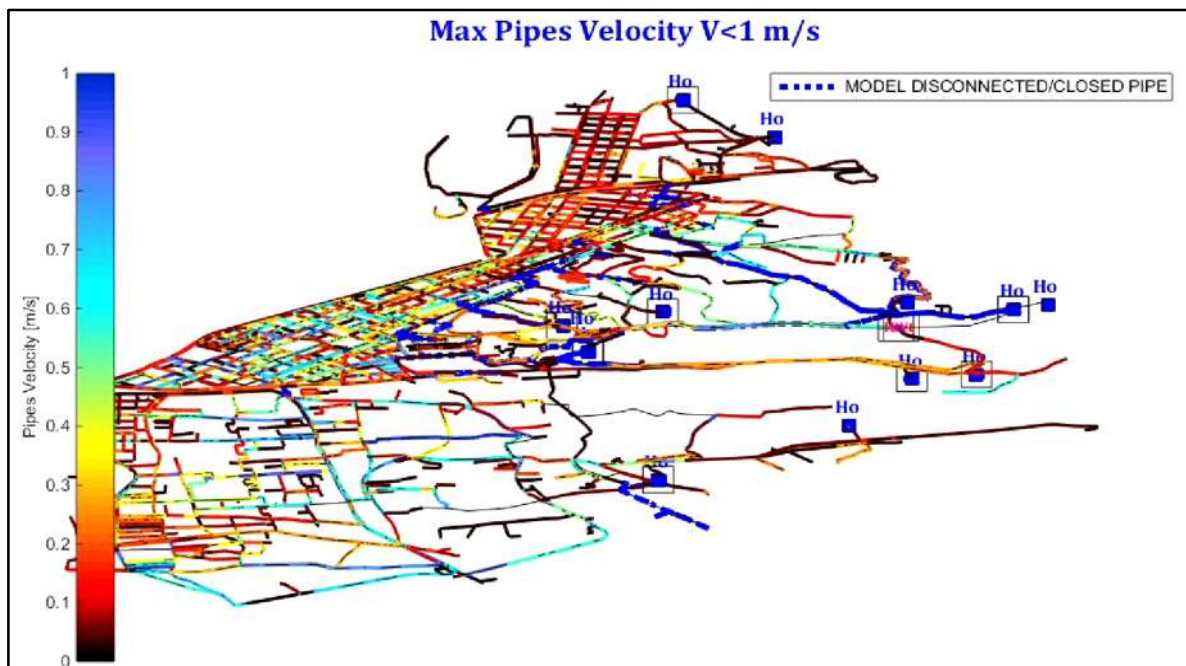


Fig.73. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte della rete di Reggio Calabria

La distribuzione delle velocità $V > 1,00$ m/s all'interno delle condotte idriche della rete acquedotto è un valido indicatore di riferimento circa possibili "anomalie" topologiche della rete rappresentata nel modello in quanto ad alti valori di velocità corrispondono diametri di piccole dimensioni o, comunque, diametri di dimensioni non adeguate al buon funzionamento idraulico della rete. L'utilizzo del Digital Twin della rete è, pertanto, utilizzabile anche come efficace supporto per la validazione della base dati acquisita.

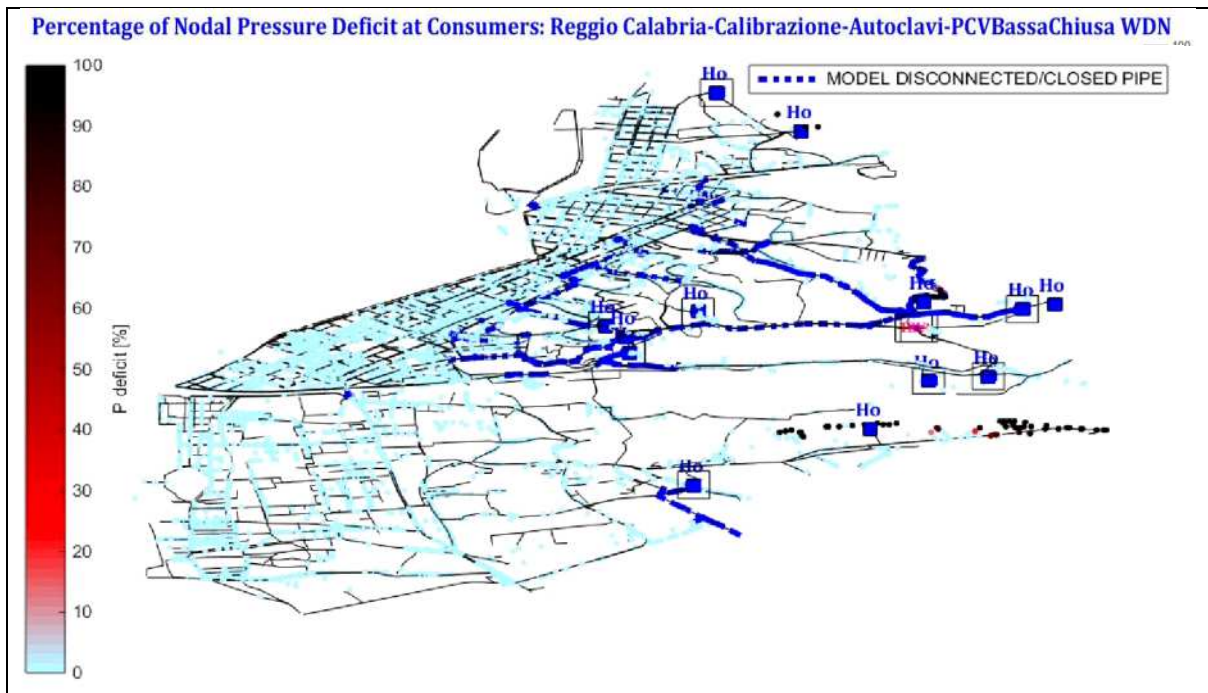


Fig.74. Percentuale di singole Utenze che vanno in “deficit” di pressione rispetto alla minima di servizio (6,00mt)

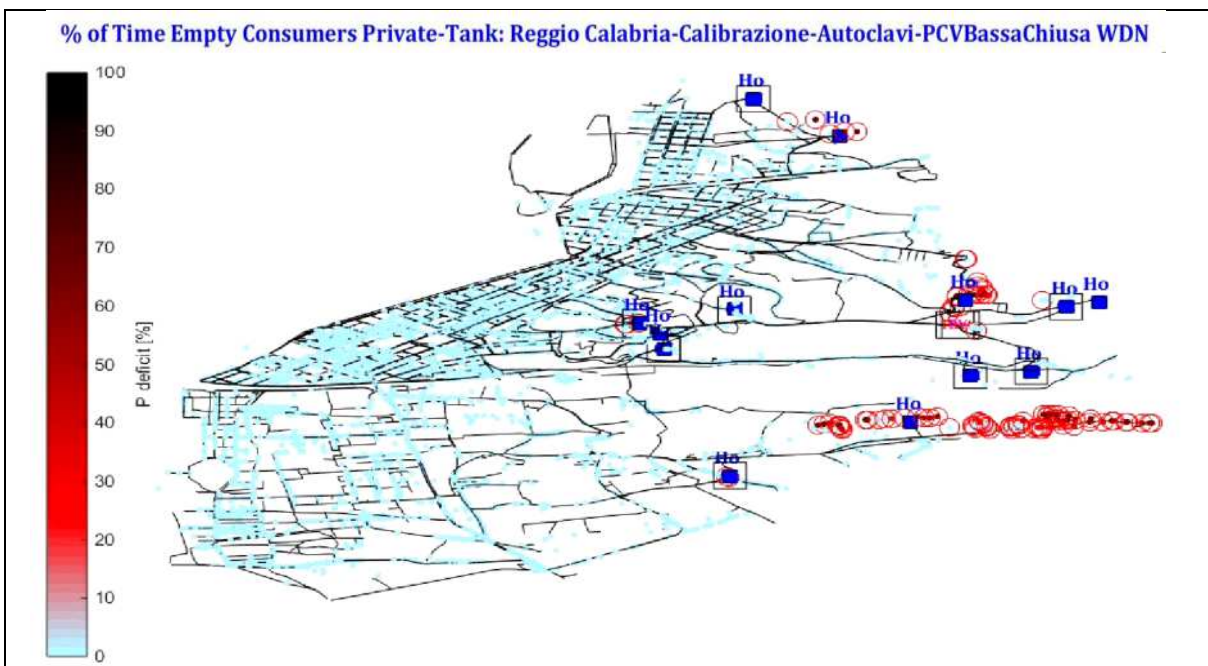


Fig.75. Percentuale di tempo in cui le singole Utenze che vanno in “deficit” di pressione (svuotamento autoclavi)

I grafici sopra riportati identificano zone della rete acquedotto di Reggio Calabria in cui le singole utenze presentano un “deficit” di pressione al contatore, in determinati orari della giornata, rispetto alla pressione minima di servizio impostata pari a 0,60bar, corrispondenti ad un “carico idraulico” di 6,00mt sul contatore. Tale malfunzionamento della rete, che permane nonostante l’inserimento nel modello delle “autoclavi”, può essere risolta con indagini specifiche di campo da eseguire nelle aree identificate nella simulazione idraulica.

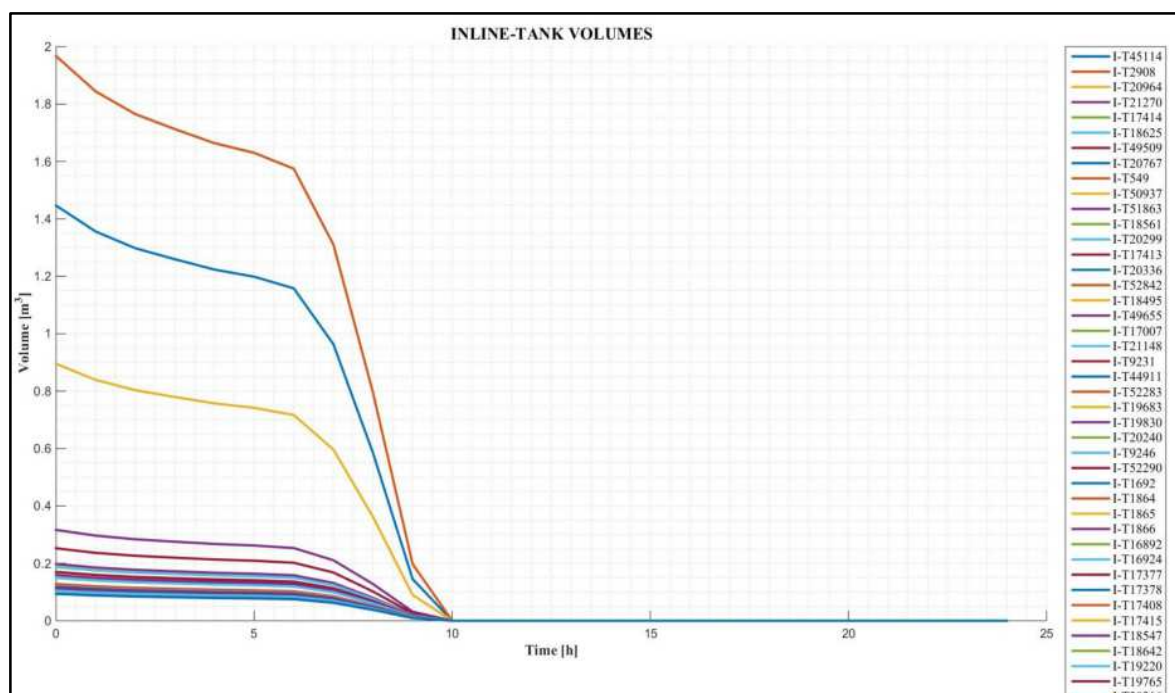


Fig.76. Andamento temporale dello svuotamento dei serbatoi privati durante il ciclo operativo giornaliero

Il grafico in figura 76 rappresenta l'andamento temporale di svuotamento dei serbatoi privati delle utenze che vanno in "deficit" durante il ciclo giornaliero di funzionamento dell'acquedotto. Nella modellazione idraulica della rete sono stati inseriti, in tutte le utenze georeferenziate, i "serbatoi privati" (impianti autoclave), molto diffusi nella rete di Reggio Calabria. È stato inoltre ipotizzato che il volume massimo di accumulo di ciascun serbatoio privato riesca a coprire n.6 ore della domanda di base della singola utenza e che, all'inizio del ciclo giornaliero di simulazione idraulica del sistema, tutti i serbatoi privati siano pieni (ipotesi coerente con il reale funzionamento del sistema acquedotto, in quanto i serbatoi si riempiono tipicamente durante la notte ed erogano portata durante il giorno). Le ipotesi fatte sono, pertanto, realistiche e coerenti con il reale funzionamento idraulico della rete in quanto: in tutte le utenze che presentano pressioni al contatore maggiori della pressione di esercizio i serbatoi rimangono sempre pieni, mentre si verificherà uno svuotamento dei serbatoi associati alle utenze che, in alcune ore della giornata, vanno in "deficit" di pressione rispetto alla pressione minima di esercizio. Il risultato della simulazione idraulica effettuata risulta coerente con il reale funzionamento della rete acquedotto in quanto, come verificabile dalla figura 75 le utenze che vanno in "deficit" ed i cui serbatoi si svuotano circa alla decima ora di funzionamento, sono riferiti alle utenze più vicine alle fonti di alimentazione della rete (serbatoi e pozzi). Per tali utenze non è da escludere il fatto che possano avere una propria fonte di approvvigionamento alternativa (pozzo privato).

I grafici a seguire riportano il corretto funzionamento della valvola PCV denominata “Alta” verificabile dalla pressione costante imposta al nodo “sentinella” ID218 che determina un andamento della portata nella tubazione coerente con il *pattern* di domanda.

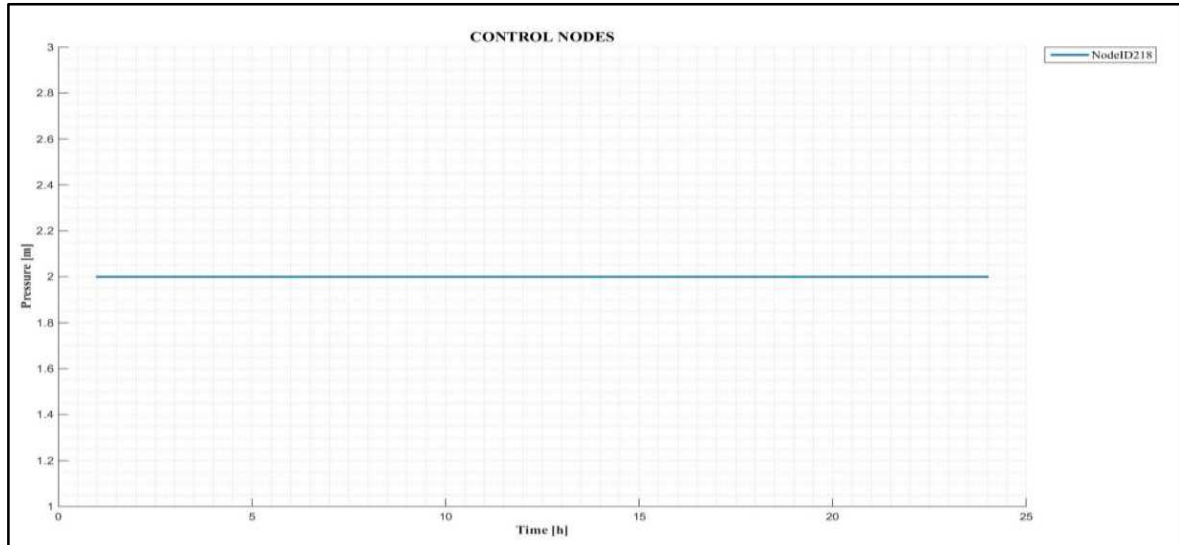


Fig.77. Andamento della Pressione al “nodo sentinella” ID218 a valle della valvola PCV denominata “Alta”

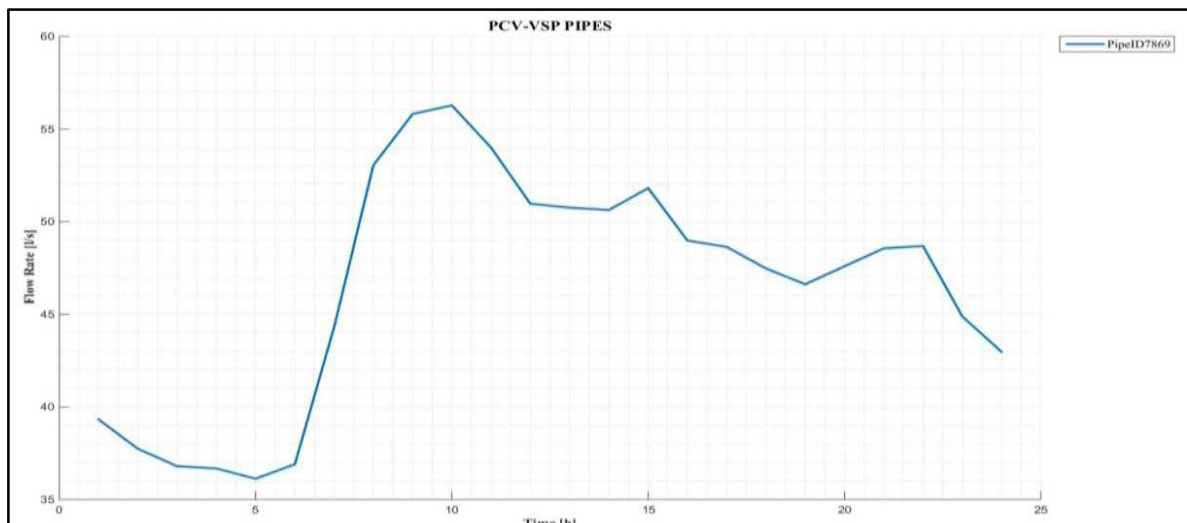


Fig.78. Andamento della Portata nella tubazione Pipe ID7869 – coerente con andamento del “pattern” domanda



Fig.79. Immagine Satellitare Rete Acquedotto Reggio Calabria con identificazione Valvola PCV “Alta”

Il grafico a seguire rappresenta la distribuzione media delle perdite volumetriche (*Background Leaks*) determinato per ogni singola condotta della rete acquedotto ed il calcolo del macroindicatore ARERA $M1a = 123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ “*perdite idriche lineari*” definite come rapporto tra volume delle perdite idriche totali nell’anno considerato e la lunghezza complessiva della rete di acquedotto ($318,91\text{km}$).

$$M1a [\text{mc}/\text{km}/\text{gg}] = \frac{\text{Perdite Idriche Totali}}{\text{Lunghezza Tot. Rete}} = \frac{(\text{Volumi in Ingresso} - \text{Volumi in Uscita})}{\text{Lunghezza Tot. Rete}}$$

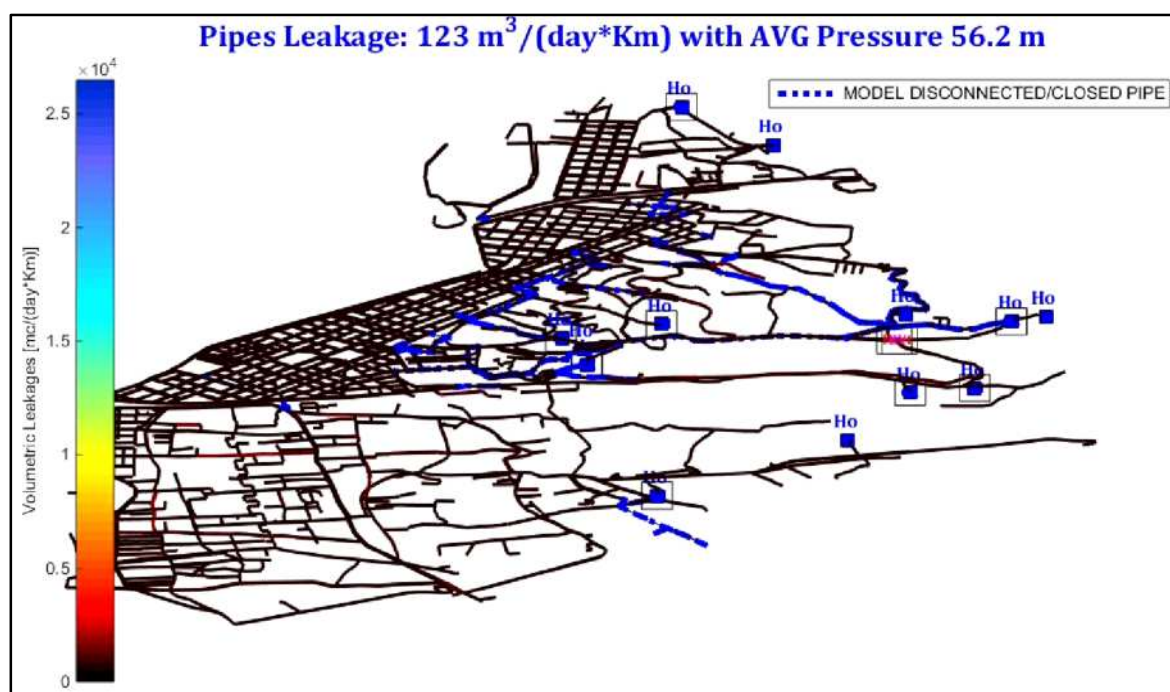


Fig.80. Distribuzione media delle perdite volumetriche (*Background Leaks*) e calcolo del Macroindicatore M1a

Al netto delle assunzioni e delle ipotesi di modellazione e di calcolo specificate nei punti precedenti, il valore del macroindicatore ARERA $M1a = 123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$, ricavato come risultato della modellazione e verifica della rete acquedotto di Reggio Calabria, risulta “idraulicamente” attendibile considerando l’assetto “altimetrico” della rete ed il “dato aggregato di perdite idriche” determinato in base ai dati acquisiti sui volumi idrici immessi in rete e quelli in uscita dovuti alle domande effettive delle utenze. Il valore decisamente elevato del macroindicatore M1a è infatti la diretta conseguenza della combinazione tra “pressioni elevate” e “forte deterioramento della rete acquedotto”. A conferma di quanto sopra riportato le analisi effettuate a supporto della “gestione” del sistema mostrano ampi margini di recupero delle perdite da attuarsi mediante un “controllo efficace delle pressioni” seguito dalla “sostituzione pianificata ed ottimizzata delle condotte”.

Dall’analisi idraulica del Gemello Digitale (Digital Twin) della rete acquedotto di Reggio Calabria è stato inoltre verificato che il sistema, per come strutturato, può essere concettualmente suddiviso in **11 diverse sottoreti**, ciascuna alimentata da diverse fonti di approvvigionamento idrico (serbatoi o pozzi).

All’interno di ciascuna delle sottoreti identificate per l’acquedotto di Reggio Calabria le pressioni dipendono dalla posizione delle fonti di approvvigionamento (serbatoi o pozzi), dall’esistenza di valvole di controllo delle pressioni (PCV) e dalla distribuzione “reale” delle domande identificate attraverso le utenze georeferenziate; tali condizioni hanno consentito, pertanto, la possibilità di determinare i valori del macroindicatore ARERA *M1a* (*perdite idriche lineari*) e della *pressione media* per ogni singola sottorete per come riportati nella figura 81. Tale informazione risulta essere molto importante ai fini gestionali in quanto, attraverso i diversi valori del macroindicatore M1a, vengono immediatamente identificate le sottoreti che presentano le maggiori perdite volumetriche.

Il grafico a seguire rappresenta la distribuzione media delle perdite volumetriche (*Background Leaks*) calcolate per le 11 diverse sottoreti in cui è suddivisa strutturalmente la rete acquedotto di Reggio Calabria

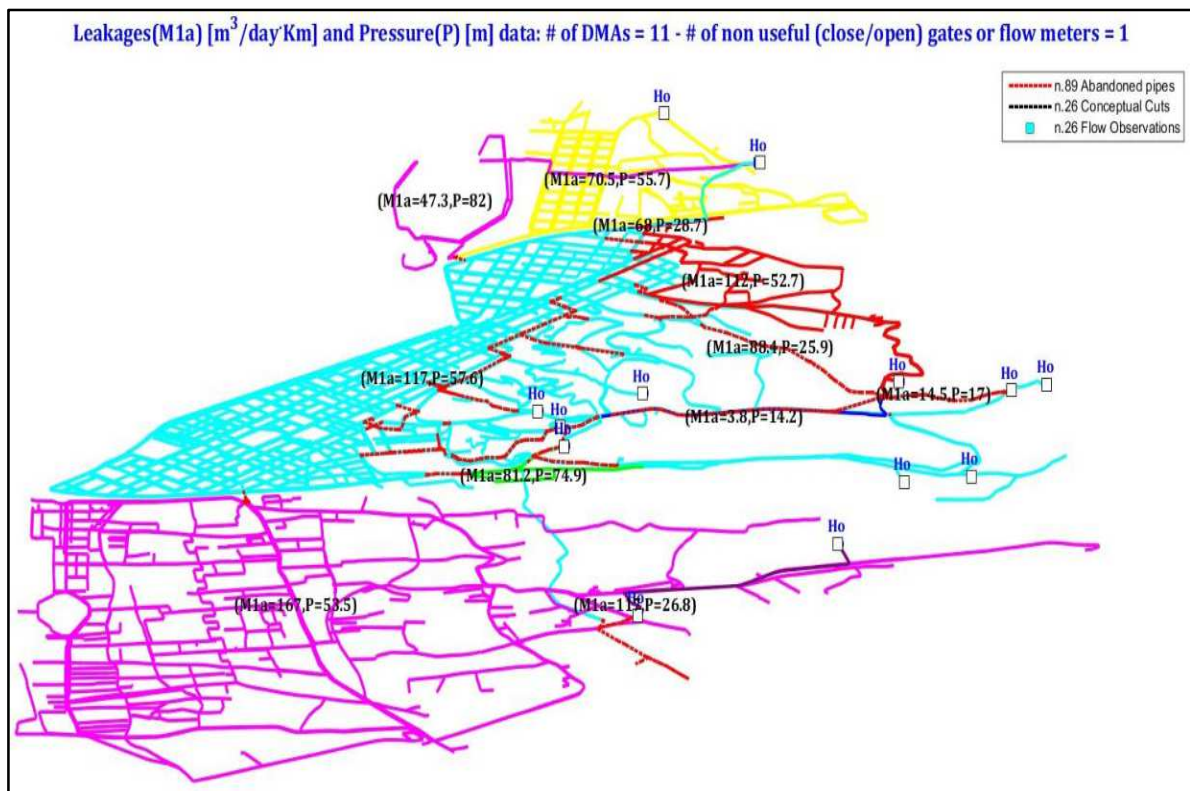


Fig.81. Distribuzione media perdite volumetriche (*Background Leaks*) - 11 sottoreti acquedotto Reggio Calabria

5.5. ANALISI DEL DOMINIO TOPOLOGICO DELLA RETE ACQUEDOTTO DELLA CITTÀ DI REGGIO CALABRIA

L’analisi del dominio topologico della rete acquedotto di Reggio Calabria è stata condotta mediante il servizio DigitalWaterDomain_Analyzer che ha permesso di eseguire uno screening topologico del sistema e di identificare i tronchi che condizionano maggiormente il funzionamento idraulico della rete e che vengono riportate nella figura 83 a seguire.

In particolare, la figura 83 (in alto) mostra le condotte con il 20% più elevato dei valori di “Edge Betweenness” per la rete di Reggio Calabria. La “Edge Betweenness” rappresenta l’indicatore più importante e comprensibile, oltrechè quello che restituisce i risultati maggiormente coerenti con l’idraulica delle reti di acquedotto ai fini gestionali.

La figura 83 (in basso) mostra invece i nodi di rete con il 10% più elevato dei valori di “Nodes Betweenness” per la rete di Reggio Calabria.

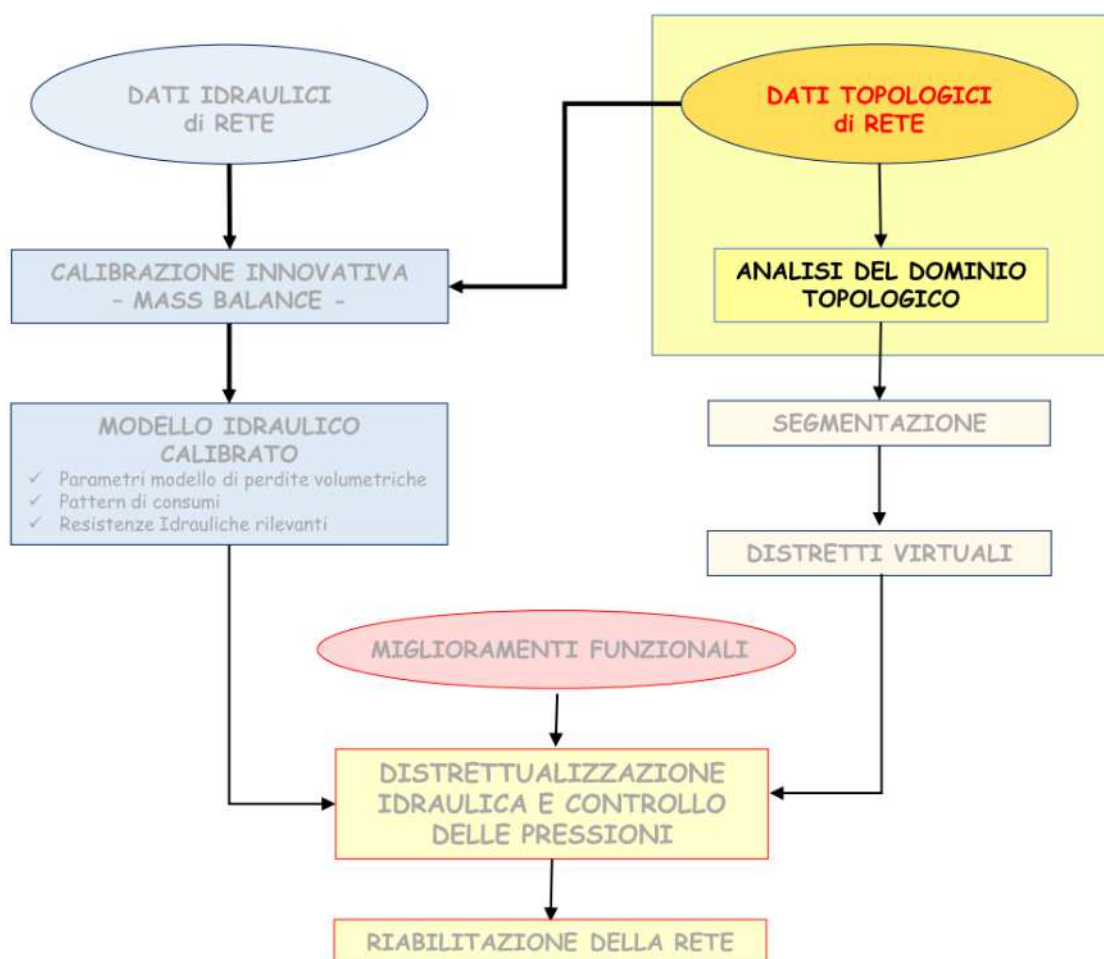


Fig.82. Flow-Chart dell’iter metodologico – Fase di “Analisi del Dominio Topologico” della rete acquedotto

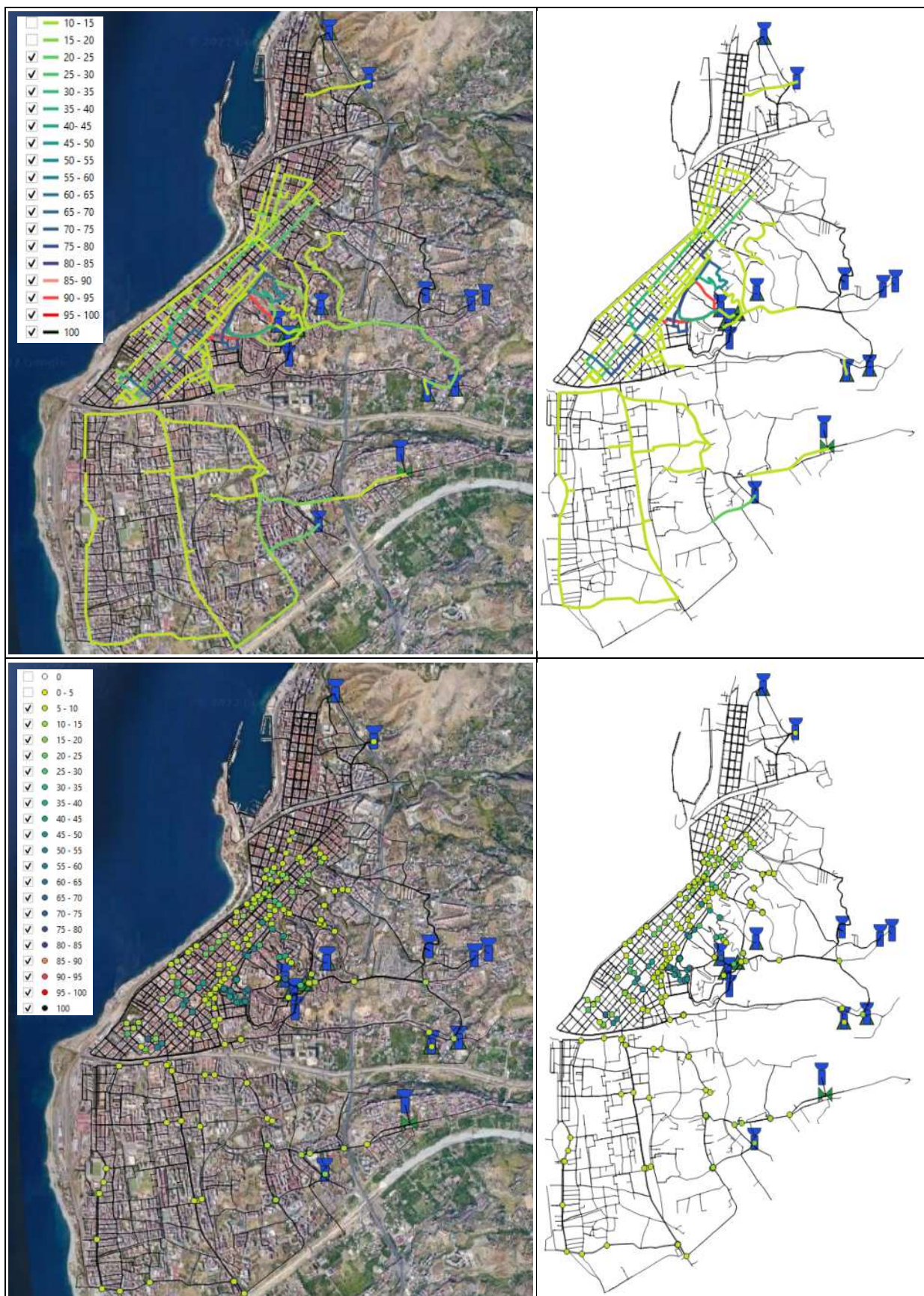


Fig.83. Analisi di rilevanza idraulica delle condotte (in alto) e dei nodi (in basso) di rete: Reggio Calabria

L'analisi del dominio topologico della rete acquedotto di Reggio Calabria, effettuata mediante le metriche di centralità derivate dalla *Complex Network Theory* (CNT) e riformulate per l'analisi degli acquedotti come sistemi infrastrutturali spaziali, ha permesso pertanto di supportare, nello studio della rete reale di Reggio Calabria, le seguenti fasi dell'iter metodologico proposto:

- **Identificazione delle linee principali di alimentazione** la cui resistenza idraulica determina lo “stato pressorio in ingresso” alla rete di distribuzione e la conseguente identificazione della componente di efflusso legata alle perdite idriche nel processo di calibrazione innovativa basata sui bilanci di massa. La minore rilevanza identificata per alcuni tratti all'interno della rete di distribuzione è dovuta all'esistenza di un numero maggiore di percorsi idrici “alternativi” che ne rendono impossibile la calibrazione puntuale con le misure normalmente disponibili;
- **Supporto alla progettazione** per il miglioramento del funzionamento idraulico del sistema con l'identificazione delle linee da intercettare o collegare per riconfigurare i flussi in rete;
- **Supporto alla segmentazione topologica**, indirizzando la successiva fase di distrettualizzazione idraulica verso configurazioni idraulicamente coerenti con il funzionamento robusto del sistema.

5.6. SEGMENTAZIONE TOPOLOGICA – DISTRETTI VIRTUALI

La *segmentazione* rappresenta la prima fase *topologica* di *divisione virtuale* della rete in segmenti/moduli attraverso *tagli concettuali* da attuarsi vicino ai nodi e che rappresentano posizioni *candidate* per l'inserimento di valvole di sezionamento o misuratori di portata durante la successiva fase di *distrettualizzazione idraulica* della rete acquedotto. La metodologia di segmentazione proposta restituisce un *fronte paretiano* di soluzioni ottime, *costi* (numero di *tagli concettuali*) vs. *benefici* (valore dell'indice di modularità), ovvero configurazioni di divisione della rete in *segmenti* al variare del loro numero e di quello dei *tagli concettuali*. Il risultato che si ottiene attraverso l'utilizzo della citata procedura è un sistema di supporto decisionale a disposizione del Gestore della rete acquedotto costituito da una serie di configurazioni di divisione della rete che possono essere scelte in qualsiasi fase progettuale e/o gestionale come base del monitoraggio del sistema idraulico. Ognuna

di tali soluzioni/configurazioni è *annidata* in tutte quelle con un maggior numero di *segmenti* consentendo, in tal modo, di avere una importante flessibilità decisionale. La circostanza che la segmentazione produca un sistema flessibile di supporto alla suddivisione topologica della rete è rilevante in particolar modo per gli *aspetti gestionali*. Per la successiva fase di *distrettualizzazione idraulica* della rete acquedotto dovrebbe essere, infatti, utilizzata la configurazione che consente di avere il massimo numero di *tagli concettuali (pozzetti)* al fine di ottenere la massima *efficacia* ed *efficienza* nella riconfigurazione dei flussi idrici dell'acquedotto. L'identificazione delle alternative di segmentazione per la rete acquedotto di Reggio Calabria è stata ottenuta attraverso il servizio *DigitalWaterVirtualDMA* con una “modularità” infrastrutturale ed utilizzando quale “peso” per la determinazione delle diverse soluzioni/configurazioni la quota “*elevation*” delle diverse condotte che compongono la rete.

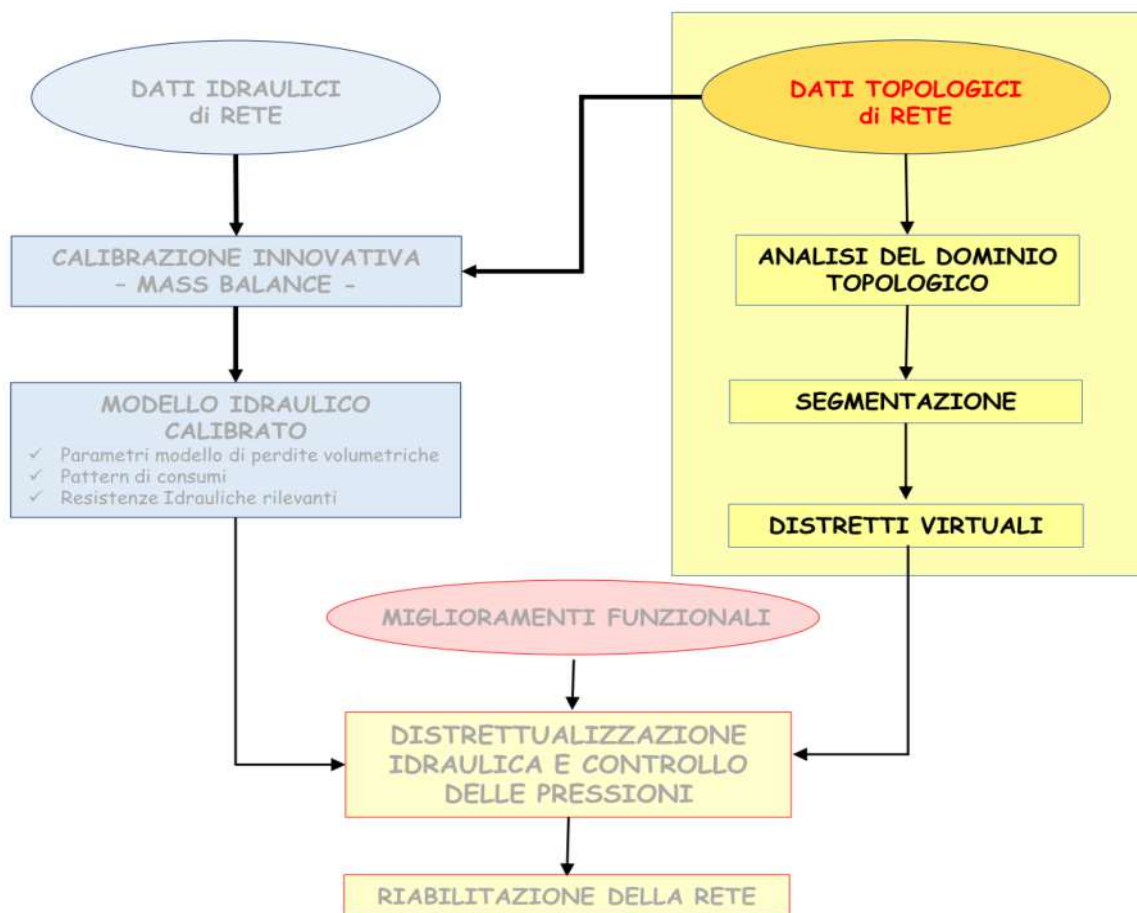


Fig.84. Flow-Chart dell'iter metodologico – Fase di “Segmentazione” e “distretti visrtuali” della rete acquedotto

La divisione/segmentazione in distretti virtuali della rete reale avviene, pertanto, cercando le soluzioni che consentono di avere, all'interno dello stesso distretto virtuale, le condotte

maggiormente connesse tra di loro, che possiedono una quota simile e che risultino divise dal resto delle condotte del sistema dal minor numero di tagli concettuali (pozzetti).

La scelta della configurazione di *segmentazione topologica* da utilizzare come base per la successiva *distrettualizzazione idraulica* della rete acquedotto di Reggio Calabria, ovvero l'identificazione dei pozzetti candidati ad ospitare dispositivi di controllo o di misura, è stata effettuata con l'obiettivo "gestionale" di non stravolgere l'assetto attuale della rete.

Come già visto al paragrafo 5.4 la rete acquedotto di Reggio Calabria risulta essere già "strutturata" in 11 diversi distretti virtuali "sottoreti", identificate nello schema idraulico del sistema per il semplice posizionamento della rete rispetto alle fonti di approvvigionamento (serbatoi e pozzi). La configurazione di segmentazione ottimale scelta, riportata graficamente nella figura 86, partendo dalla base degli 11 distretti minimi di rete, ha portato alla definizione di n.33 Distretti Virtuali con la previsione dell'inserimento in rete di n.101 tagli concettuali (pozzetti).

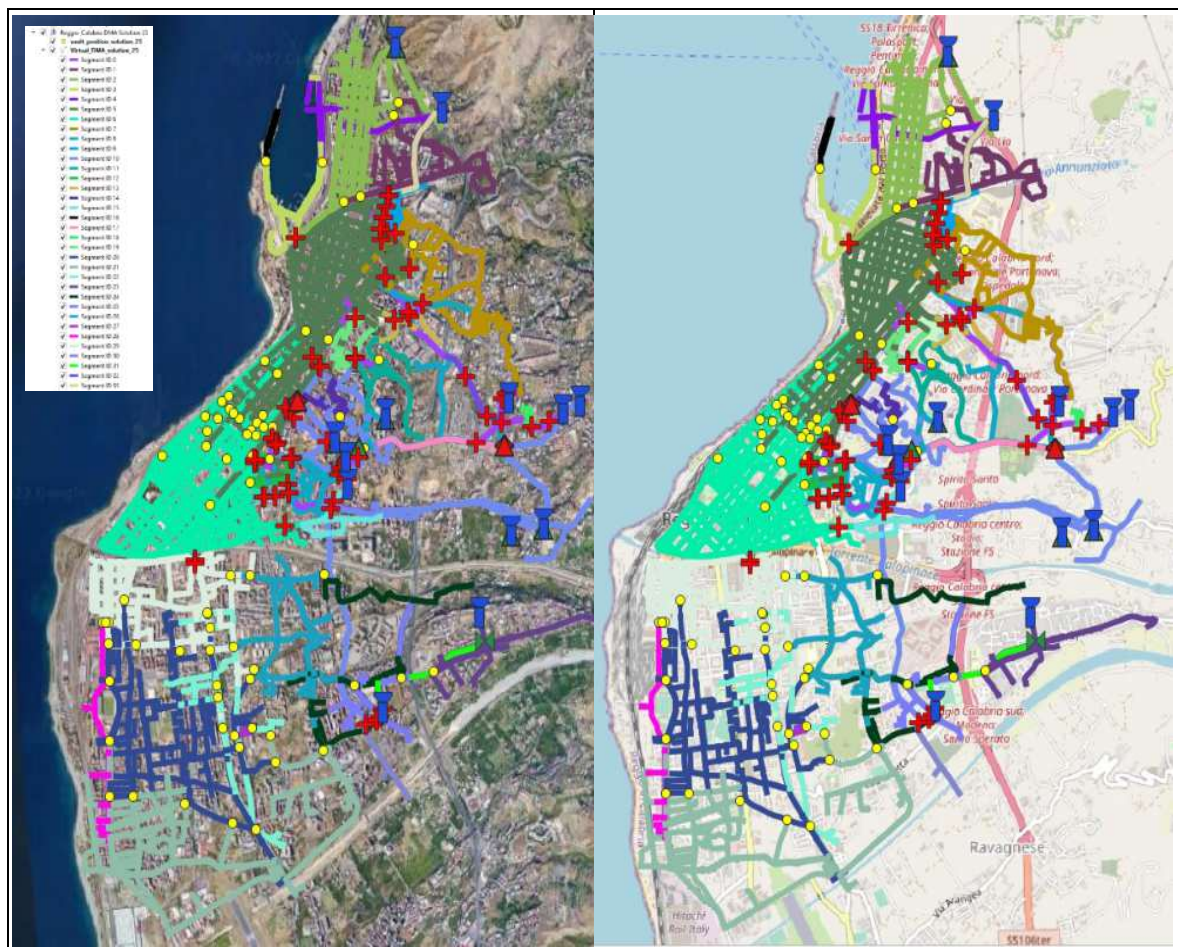


Fig.85. Soluzione/Configurazione scelta per la segmentazione della rete acquedotto di Reggio Calabria

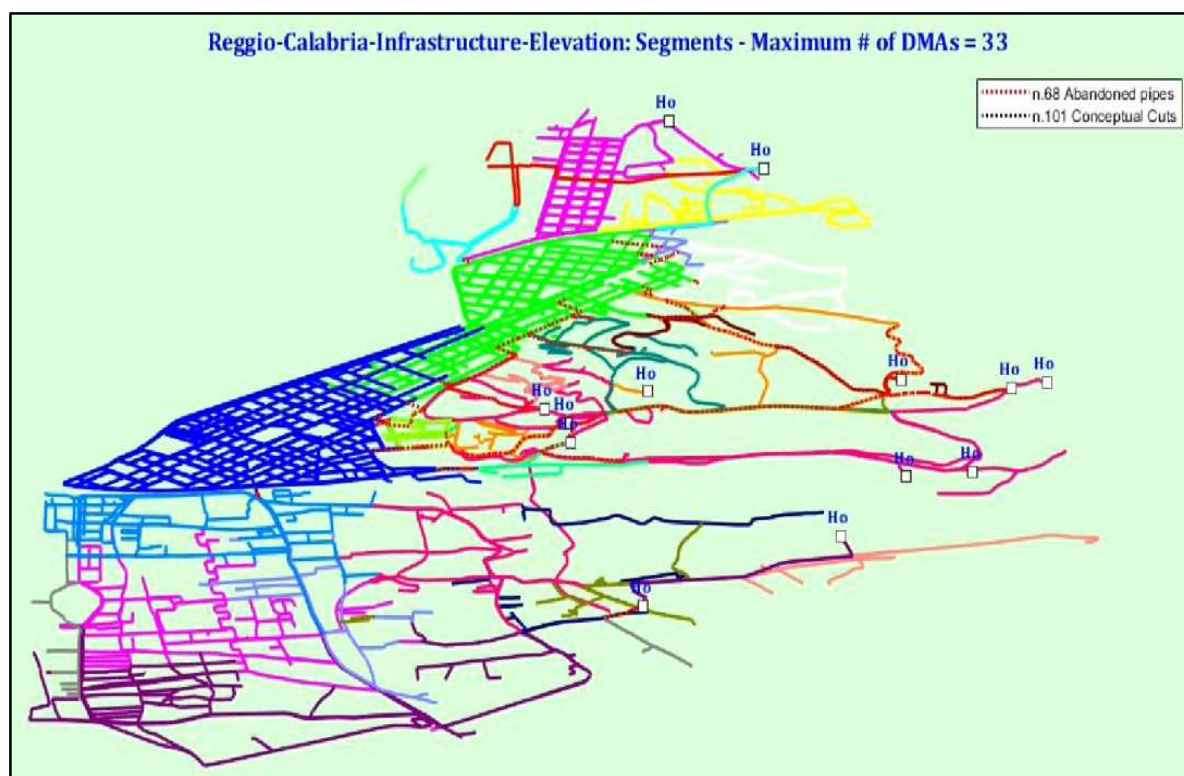


Fig.86. Soluzione/Configurazione scelta per la segmentazione della rete acquedotto di Reggio Calabria

5.7. DISTRETTUALIZZAZIONE IDRAULICA e CONTROLLO della PRESSIONE

La distrettualizzazione vera e propria della rete acquedotto è concepita come un processo di ottimizzazione *idraulica* vincolato da esigenze tecniche (*nel caso studio della rete di Reggio Calabria è stato impostato il diametro massimo delle condotte dove poter possibile inserire valvole di sezionamento*) ed attraverso l'utilizzo della modellizzazione idraulica calibrata *pressure-driven*. L'obiettivo è quello di massimizzare la riduzione delle *perdite volumetriche* e, contemporaneamente, minimizzare il *numero di misure di portata* tra i distretti. La condizione essenziale che viene imposta, pertanto, è quella del rispetto, in qualsiasi punto del sistema idraulico, dei valori di *pressione minima* necessari al *corretto funzionamento del servizio* alle diverse tipologie di utenza; condizione da soddisfare con un grado di sicurezza legato alle incertezze modellistiche dell'analisi del sistema.

La procedura di *distrettualizzazione idraulica* fornisce, pertanto, diverse configurazioni dei distretti della rete acquedotto, *ottime* rispetto alla riduzione delle perdite volumetriche *versus* il numero di misure di portata. Ognuna delle configurazioni di progetto ottenute soddisfa i vincoli ingegneristici imposti come dati di *input* e non incide sul corretto

servizio alle diverse tipologie di utenza durante l'intero ciclo operativo dell'acquedotto con un adeguato margine di sicurezza.

Tale condizione viene imposta *riconfigurando* in modo razionale ed ingegneristicamente vincolato *i flussi idrici* con la finalità di **ridurre lo stato pressorio** (quindi le perdite) nelle aree a *pressione medio-elevate* rispetto ai requisiti imposti per un corretto servizio alle utenze. L'analisi topologica, integrata alla simulazione idraulica nel sistema WDNNetXL, permette inoltre di escludere la disconnessione di qualsiasi parte del sistema idraulico allorquando venga ipotizzato l'inserimento di valvole di sezionamento chiuse all'interno del sistema.

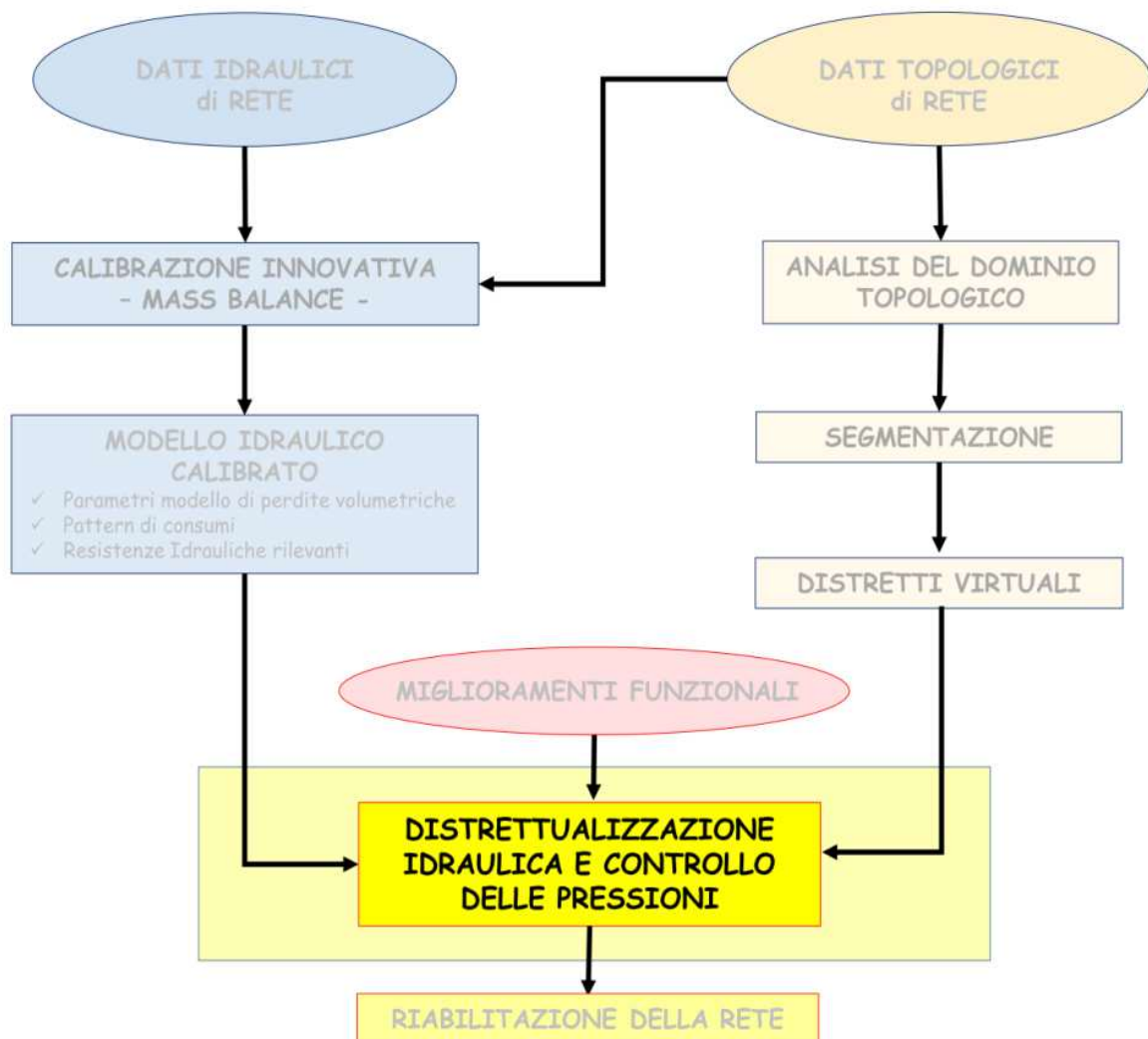


Fig.87. Flow-Chart dell'iter metodologico – Fase di “Distrettualizzazione Idraulica” della rete acquedotto

È da evidenziare il fatto che la chiusura di valvole di sezionamento all'interno della rete acquedotto non riduce l'affidabilità del sistema poiché non coincide con l'apertura “ad

albero” della rete, essendo possibile in qualsiasi momento riaprire il sistema a fronte di scenari di funzionamento anomali.

La progettazione della distrettualizzazione, per come realizzata nel processo metodologico proposto secondo uno schema razionale e controllato in tutte le sue fasi, non ha inoltre come effetto secondario una riduzione della qualità dell’acqua e non riduce l’affidabilità di sistema dal punto di vista meccanico ed idraulico.

Dal punto di vista tecnico-economico la procedura di distrettualizzazione idraulica, concepita come ottimizzazione topologica ed idraulica, nel caso studio, ha consentito di ottenere, a parità di condizioni, obiettivi e vincoli, una distrettualizzazione *più efficace* (rispetto a vincoli tecnici assegnati) *ed efficiente* (minor costo di installazione a parità di obiettivi, per esempio, numero di distretti e riduzione delle perdite) rispetto all’applicazione di qualsiasi altra procedura empirica.

Nel caso studio della rete di Reggio Calabria è stata, pertanto, effettuata una riconfigurazione dei flussi idrici sul modello idraulico calibrato ed escludendo i controlli esistenti sulle pressioni (non è stato considerato il funzionamento della valvola PCV esistente denominata “Alta”).

Su tale “configurazione base” del sistema sono state generate n.60 diverse ipotesi progettuali (60 diverse soluzioni di distrettualizzazione idraulica della rete) delle quali è stata selezionata la “*soluzione Ottima*” che determina la *massima riduzione di perdite volumetriche* in rete, soluzione scelta tra quelle per cui non si è verificato nell’analisi idraulica un ulteriore “deficit” di pressione per le utenze del sistema.

Nello specifico, dei 101 tagli concettuali previsti in rete nella fase della “segmentazione”, nella “*soluzione Ottima*” scelta sono state progettate le seguenti specifiche caratteristiche infrastrutturali da prevedere nella struttura reale della rete acquedotto di Reggio Calabria:

- **N.10 chiusure** da attuarsi nella rete acquedotto al fine della suddivisione fisica del sistema nei diversi distretti idraulici (in aggiunta alle chiusure esistenti che determinano n.64 tronchi “abbandonati” nella rete esistente);
- **N.91 postazioni dove poter installare i misuratori di portata** per la suddivisione della rete nei 33 distretti idraulici DMA di progetto. Ogni taglio concettuale (pozzetto che divide due diversi e contigui distretti di misura DMA) previsto nella soluzione di

distrettualizzazione idraulica, rappresenta una potenziale postazione per l’inserimento dei misuratori di portata. Se in alcune delle 95 postazioni previste non vengono fisicamente inseriti i misuratori di portata i DMA adiacenti si fondono con quelli adiacenti andando a formare un distretto di misura DMA di maggiori dimensioni (somma dei 2 diversi distretti). Questa condizione offre al Gestore una flessibilità “gestionale” molto importante in quanto tutte le operazioni di distrettualizzazione idraulica di progetto possono essere “pianificate” nel tempo in funzione del “*budget economico*” a disposizione (partendo pertanto con un numero limitato di Flow Observation integrabile nel tempo nei tagli concettuali/pozzetti posizionati topologicamente in condizioni *ottimali*).

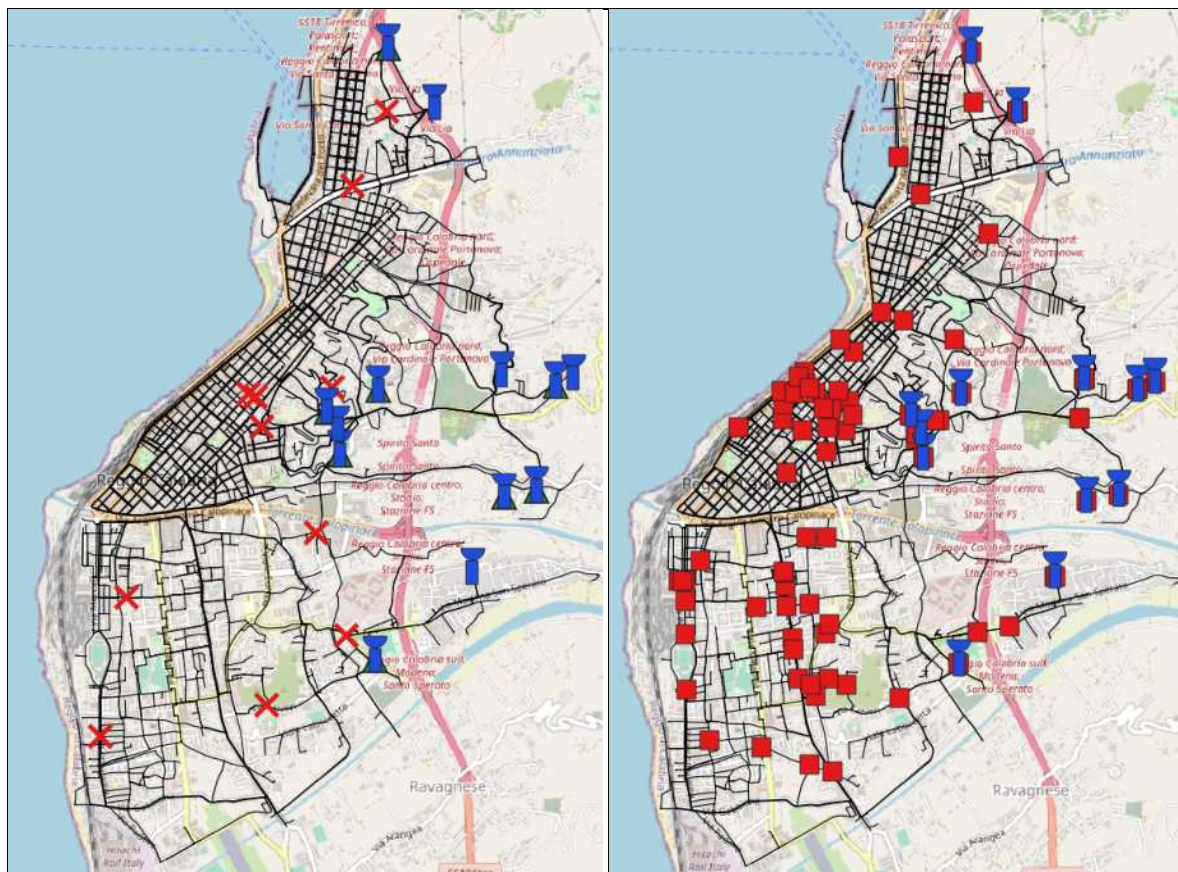


Fig.88. Stralcio Planimetrico con individuazione “chiusure” (a sinistra) e “Flow Meter” (a destra)

Al fine di ottimizzare il recupero delle perdite volumetriche attraverso il “controllo efficace delle pressioni in rete”, è stato quindi progettato, sulla base della “distrettualizzazione idraulica ottima” scelta, il “**controllo di pressione**” in rete con l’inserimento di *n.3 valvole di riduzione della pressione PCV* da localizzarsi nelle seguenti zone:

- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a** (*perdite idriche lineari*) da un valore di $122,80 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ ad un valore di **109,08 $\text{m}^3/\text{km}/\text{g}$** ;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete** (*Volume Background Leaks*) da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **34.786 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **4.378 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete** di risorsa idrica pari a circa **1.597.970mc**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **11,18%** rispetto alle perdite volumetriche nel funzionamento attuale della rete.

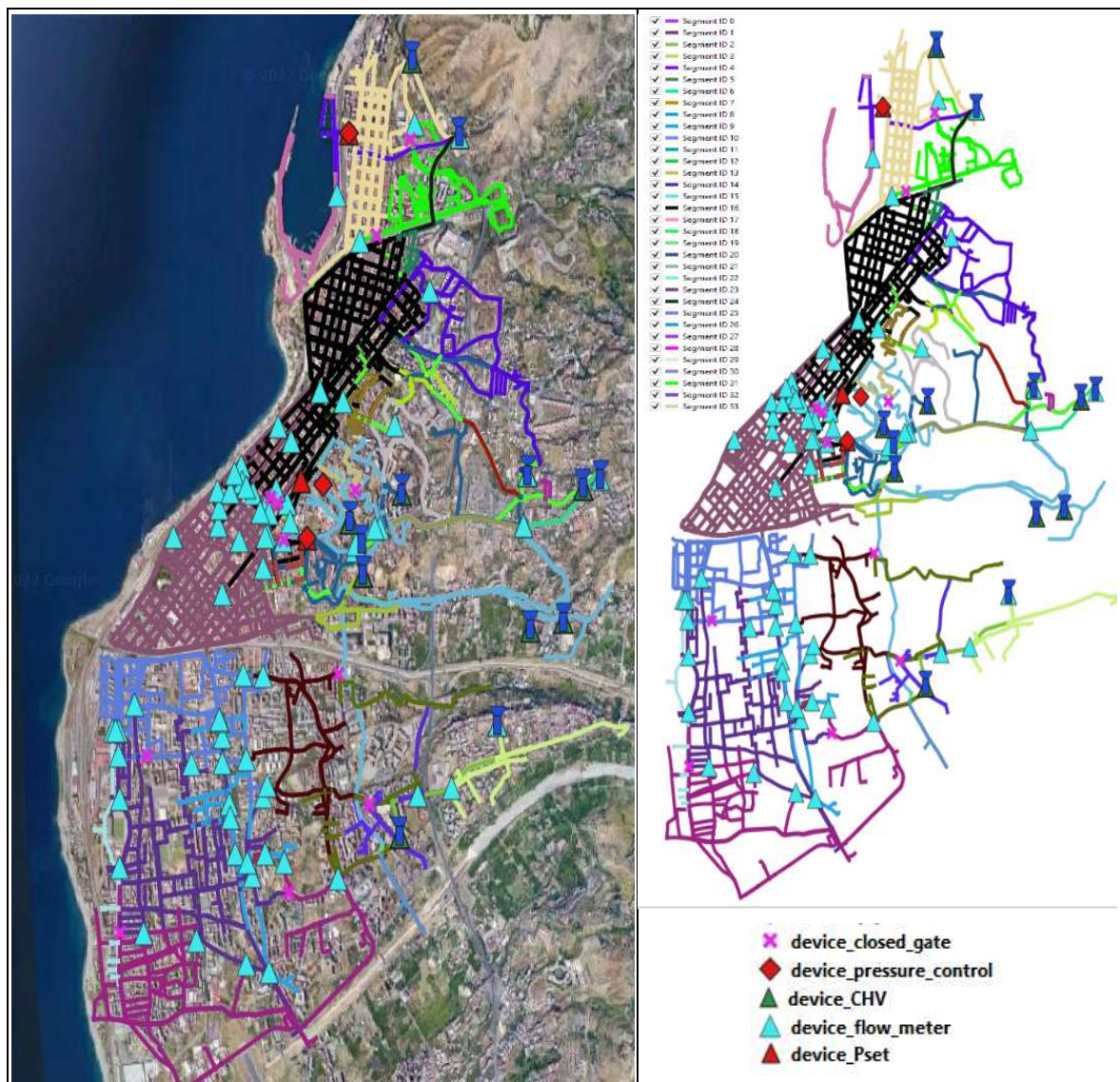


Fig.90. Soluzione “Ottima” scelta per la Distrettualizzazione Idraulica della rete di Reggio Calabria (n.33 DMA)

I risultati sopra descritti sono stati ottenuti, pertanto, esclusivamente attraverso la *distrettualizzazione idraulica* della rete, progettando la *riconfigurazione dei flussi idrici* e dal *controllo efficace delle pressioni* mediante l’inserimento di n.3 valvole di riduzione di pressione PCV in punti specifici del sistema acquedotto.

È da evidenziare che la razionalità della **metodologia strutturata** proposta nel presente “caso studio” diviene esperienza replicabile nei diversi sistemi idrici del medesimo Gestore, circostanza rilevante per l’*asset management* in una visione di scala gestionale aziendale.

La sintesi dei **risultati dello studio idraulico** della rete con la Distrettualizzazione Idraulica e con il *controllo efficace delle pressioni* di progetto vengono riportati nei grafici a seguire.

Dal grafico in figura n.91 sono distinguibili i valori dei volumi idrici ottenuti per le diverse componenti del “*pattern di portata in ingresso*” considerate:

- **Volume Background Leaks** (Perdite Volumetriche) di rete: **34.786 mc/giorno**;
- **Volume Customer Demand** (Domanda delle UtENZE): **18.711 mc/giorno**;
- **Volume Private Tanks** (Domanda Serbatoi Provati delle UtENZE): **18.655 mc/giorno**.

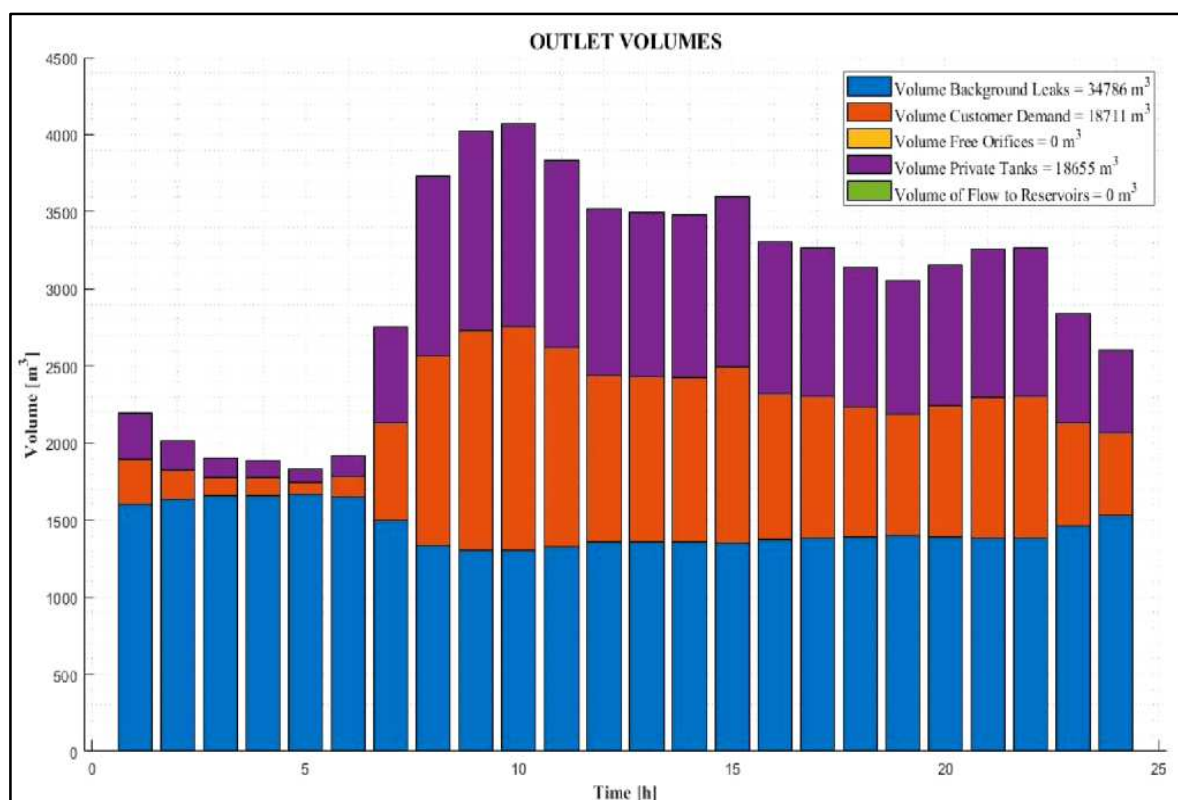


Fig.91. Componenti del pattern di della portata in ingresso (perdite volumetriche e domanda di utenze).

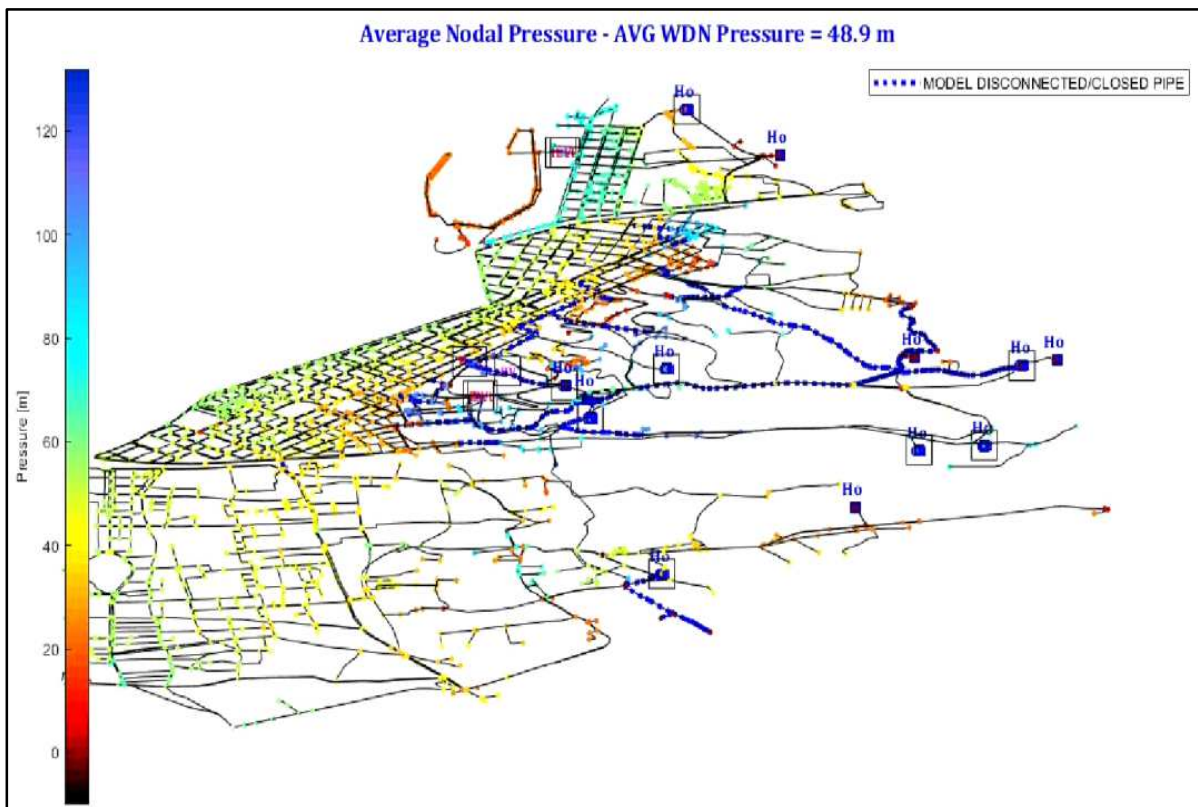


Fig.92. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria – Pressione Media 48,90mt

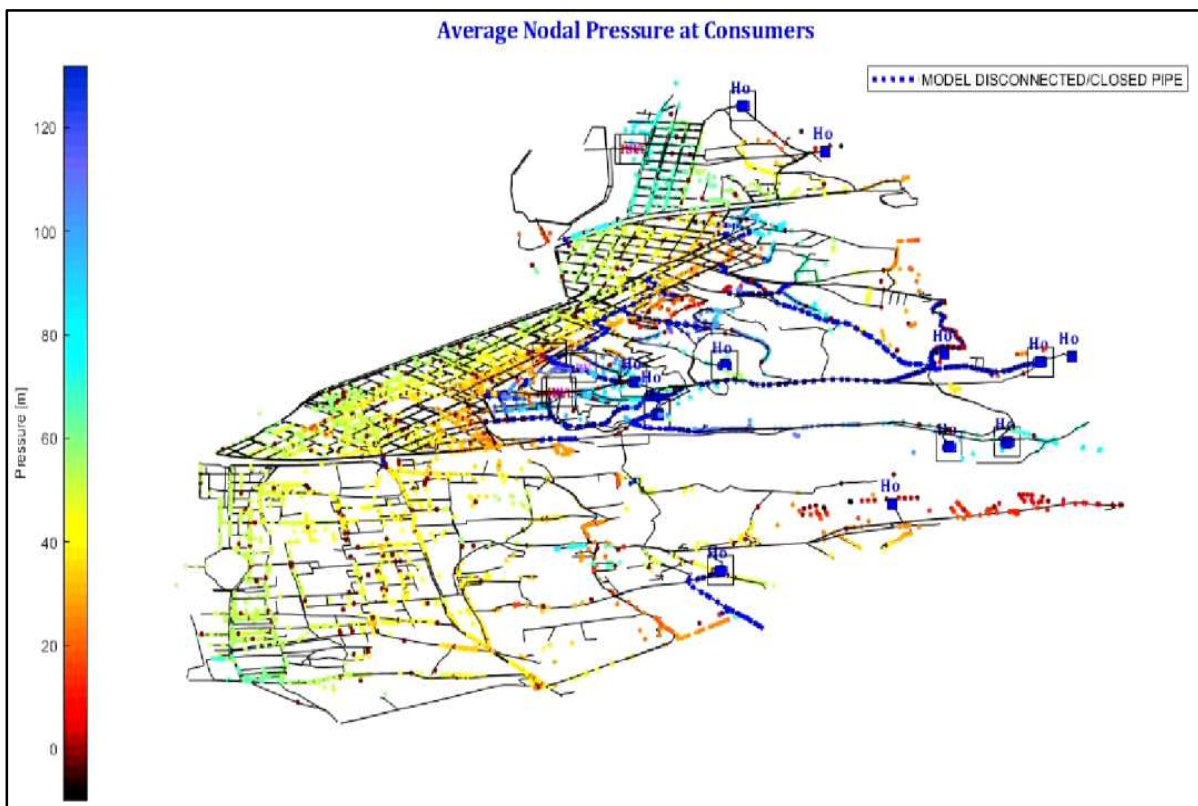


Fig.93. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Configurazione di Progetto

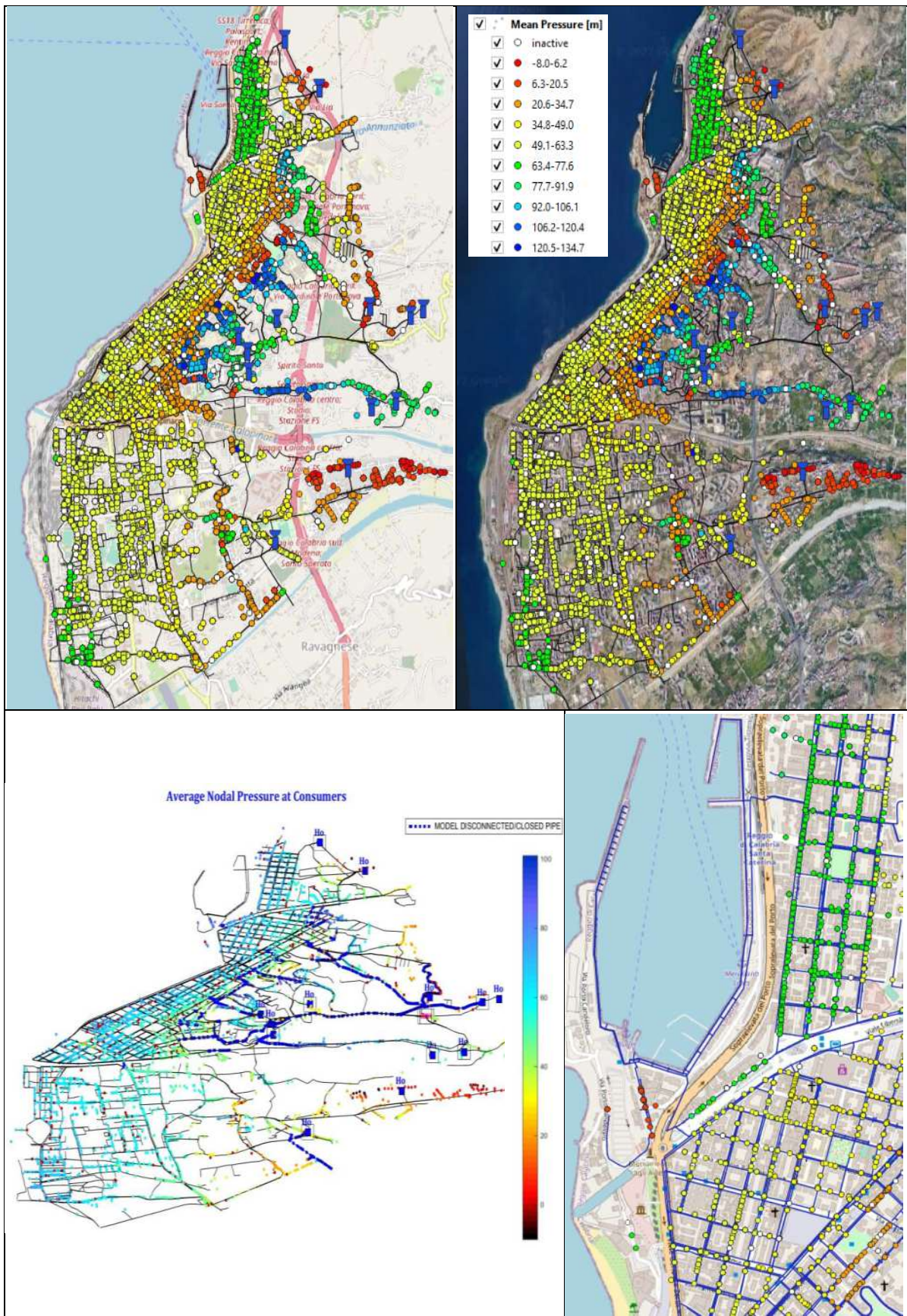


Fig.94. Distribuzione Pressioni medie nelle singole UtENZE rete di Reggio Calabria – Configurazione di Progetto

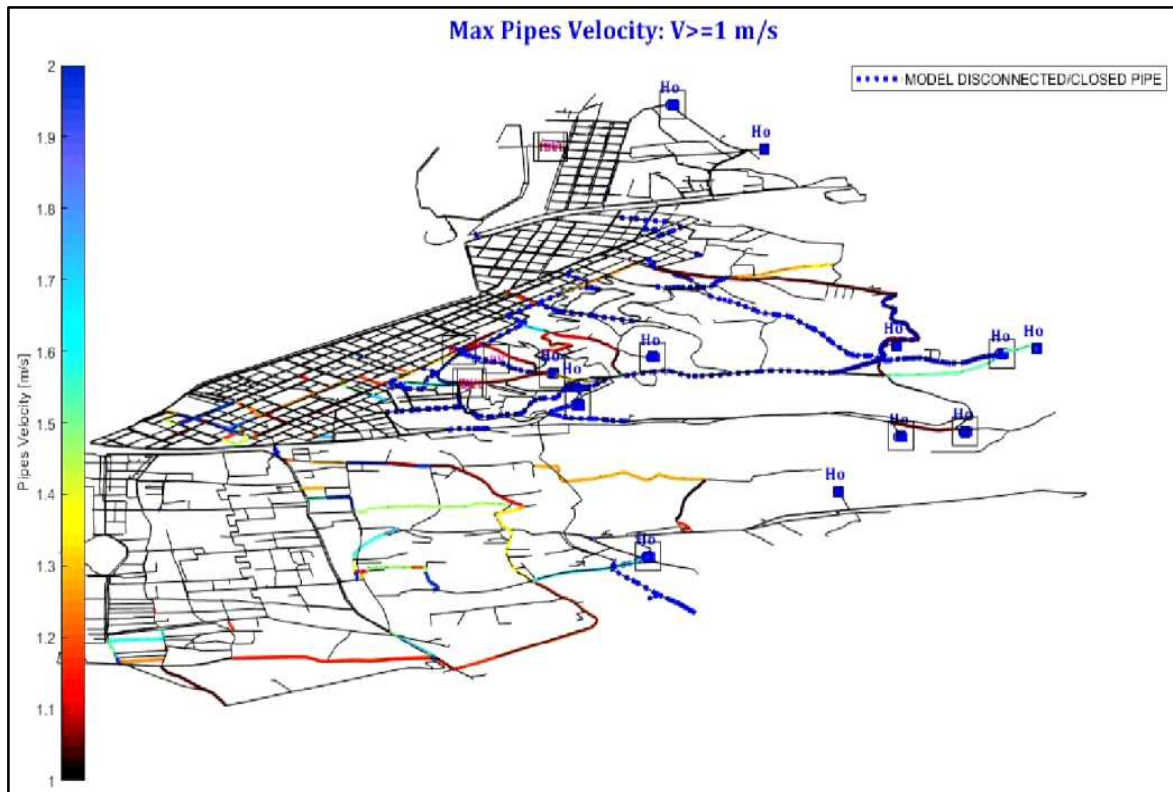


Fig.95. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte della rete di Reggio Calabria

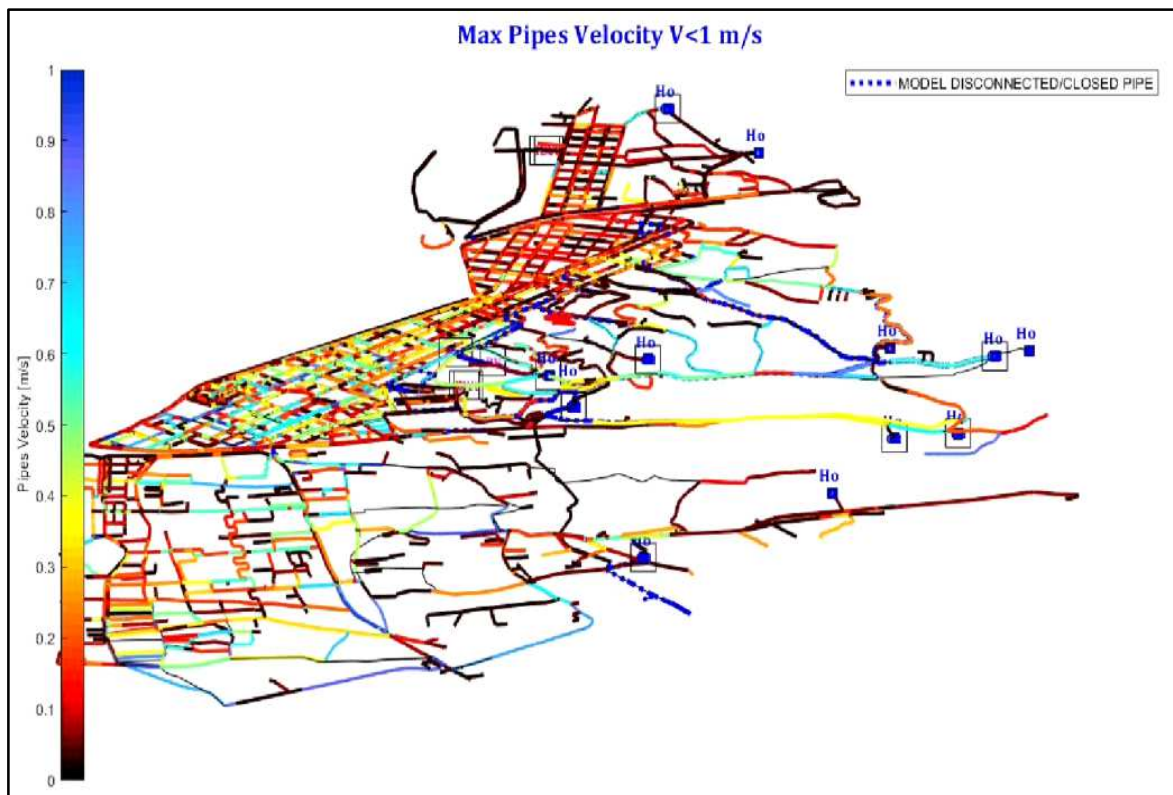


Fig.96. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte della rete di Reggio Calabria

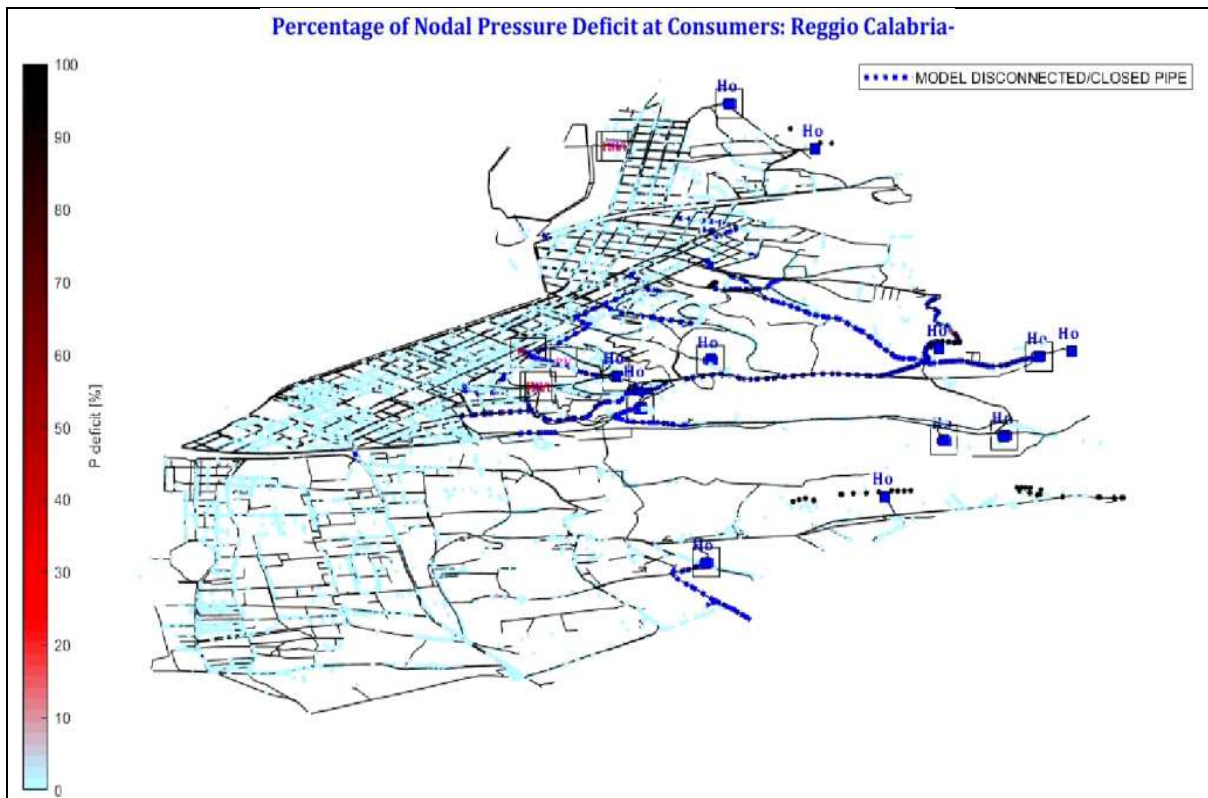


Fig.97. Percentuale di singole Utenze che vanno in “deficit” di pressione rispetto alla minima di servizio (6,00mt)

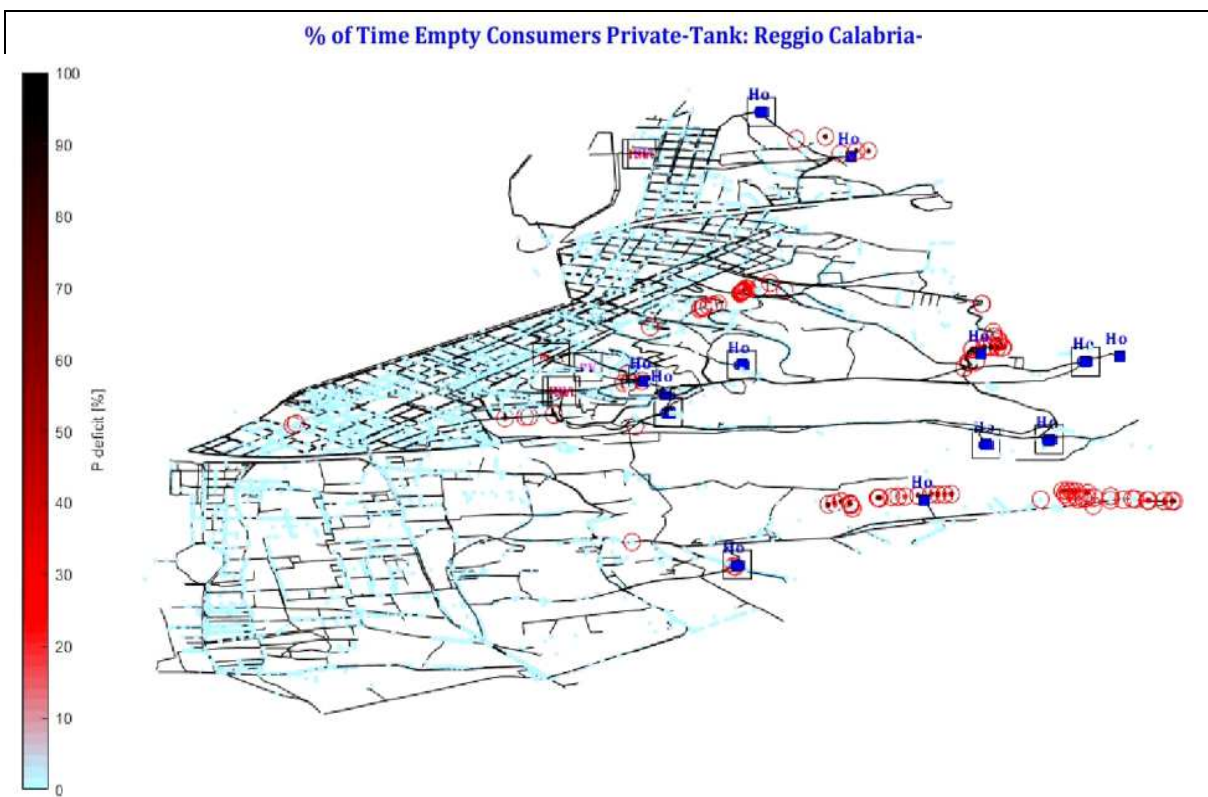


Fig.98. Percentuale di tempo in cui le singole Utenze che vanno in “deficit” di pressione (svuotamento autoclavi)

I grafici a seguire riportano il corretto funzionamento delle n.3 valvole PCV di progetto.

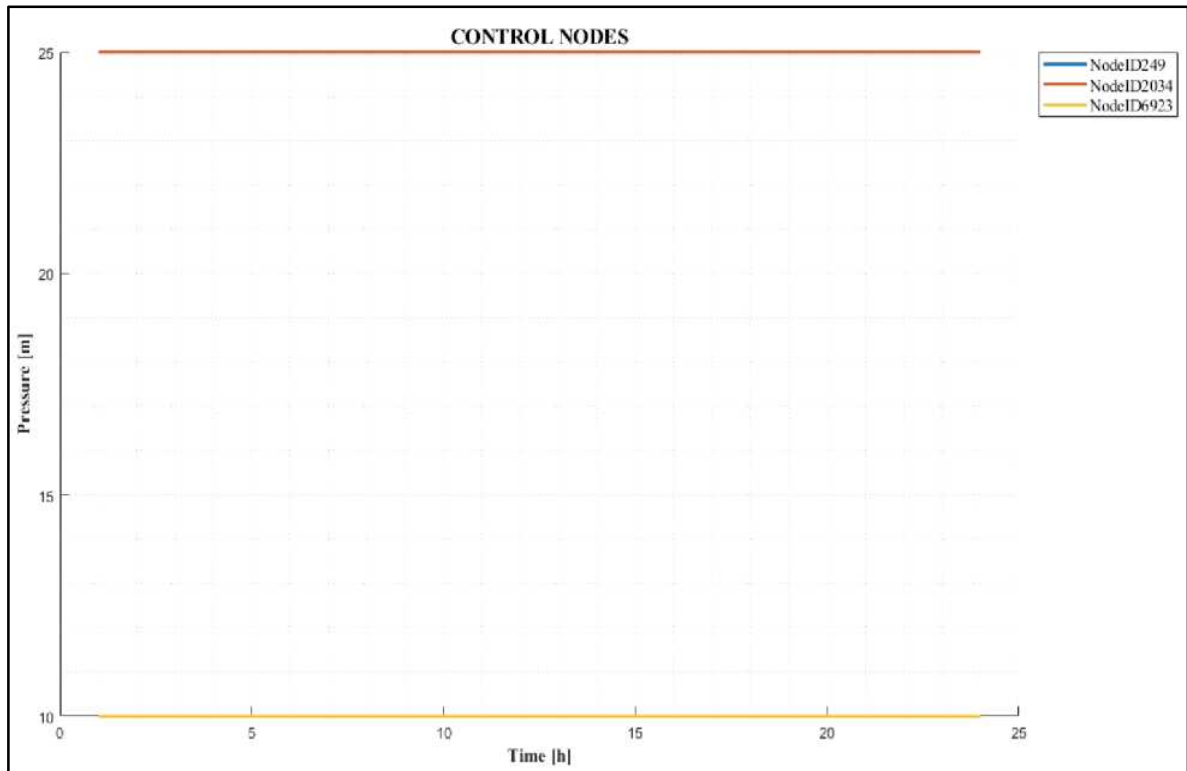


Fig.99. Andamento della Pressione ai “nodi sentinella” ID249, ID2034 ed ID6923

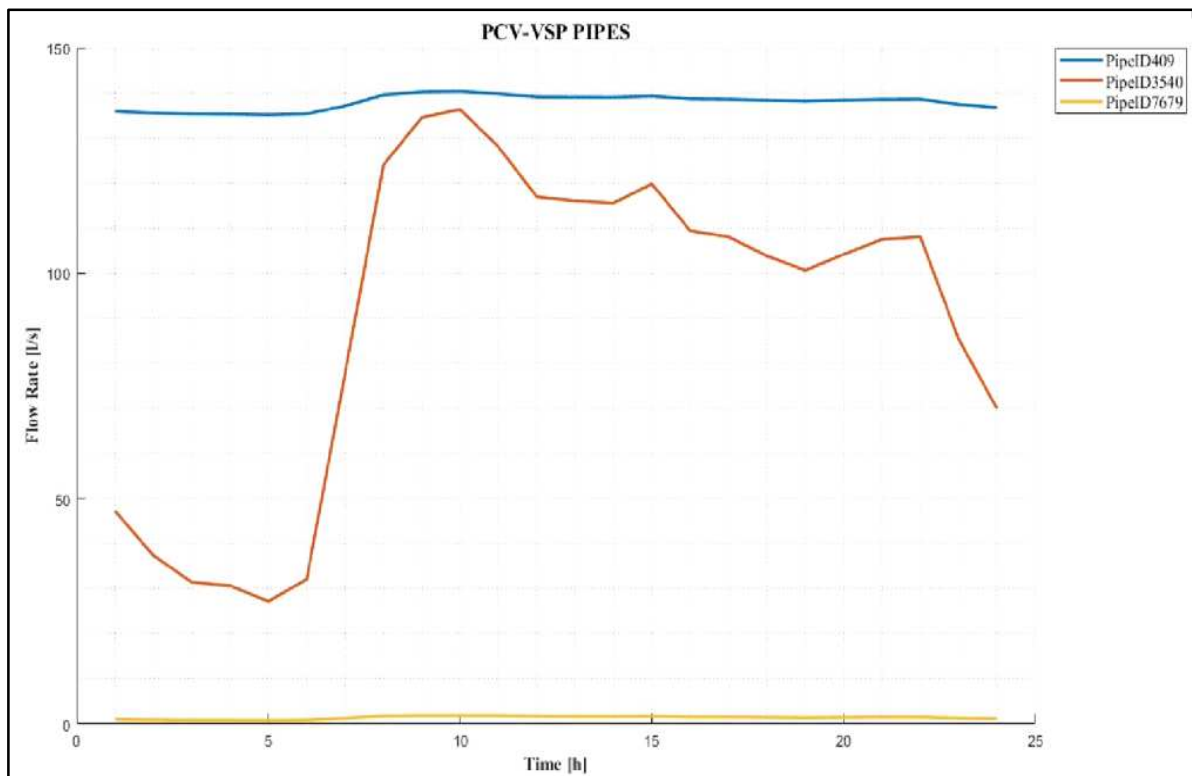


Fig.100. Andamento della Portata nelle tubazioni Pipe ID409 – ID3540 ed ID7679

Il grafico a seguire rappresenta la distribuzione media delle perdite volumetriche (*Background Leaks*) calcolata per ogni singola condotta della rete; viene altresì riportato il valore di calcolo del macroindicatore ARERA $M1a=109 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ “*perdite idriche lineari*” nella configurazione di progetto, con un risparmio idrico pari a circa **1.597.970mc/anno**.

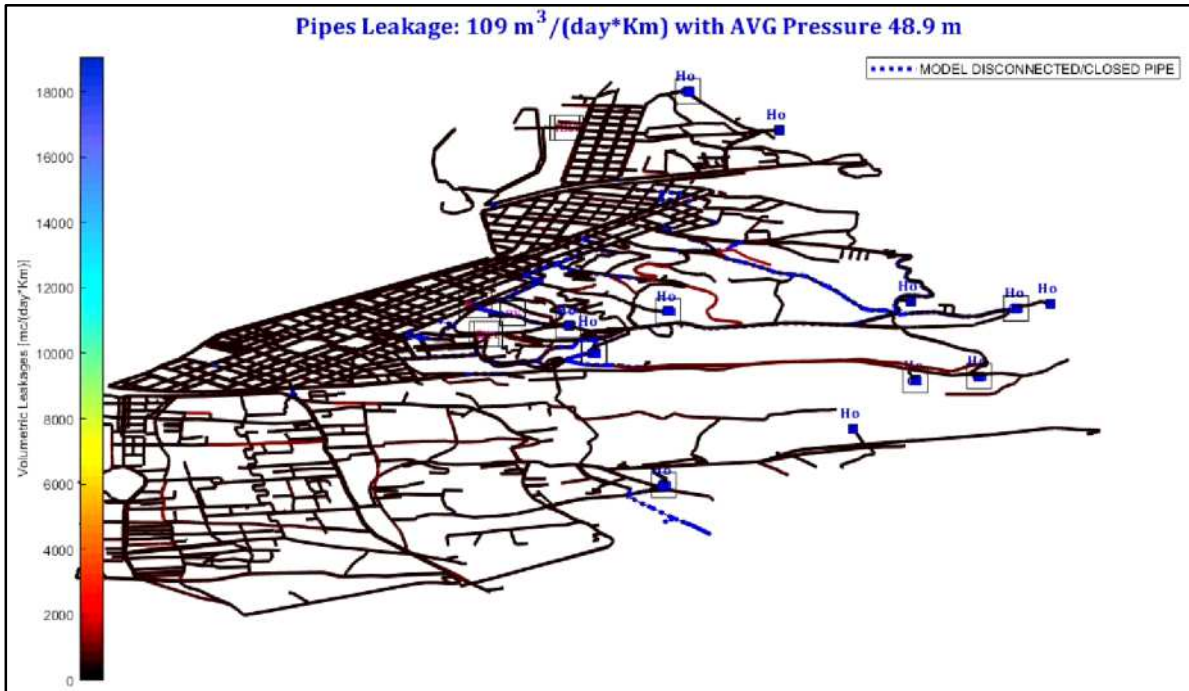


Fig.101. Distribuzione media delle perdite volumetriche (*Background Leaks*) e calcolo del Macroindicatore M1a

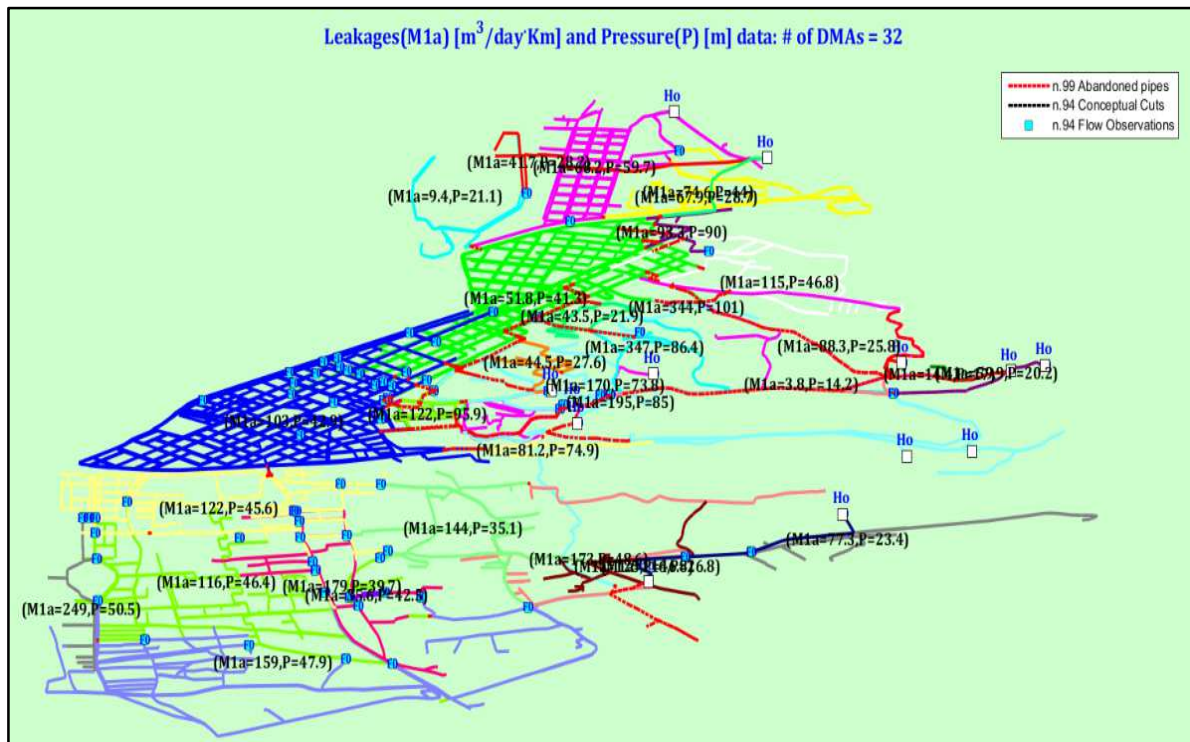


Fig.102. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo del Macroindicatore M1a nei Distretti DMA

Nella figura di seguito riportata vengono visualizzati i valori del macroindicatore ARERA M1a calcolato per ogni singola condotta della rete acquedotto di Reggio Calabria nella configurazione di progetto.

Questa informazione, rappresentativa delle perdite lineari di rete, rappresenta la base per la progettazione dei “*piani di riabilitazione*” delle condotte di rete.

A conferma della coerenza dei risultati delle simulazioni idrauliche e delle analisi effettuate a supporto della “*gestione*” del sistema, i valori di M1a ottenuti rappresentati nel grafico a seguire, mostrano in modo evidente gli ampi margini di recupero delle perdite conseguibili mediante un “*controllo efficace delle pressioni*” seguito da una “*sostituzione pianificata ed ottimizzata delle condotte*” (Piani di Riabilitazione).

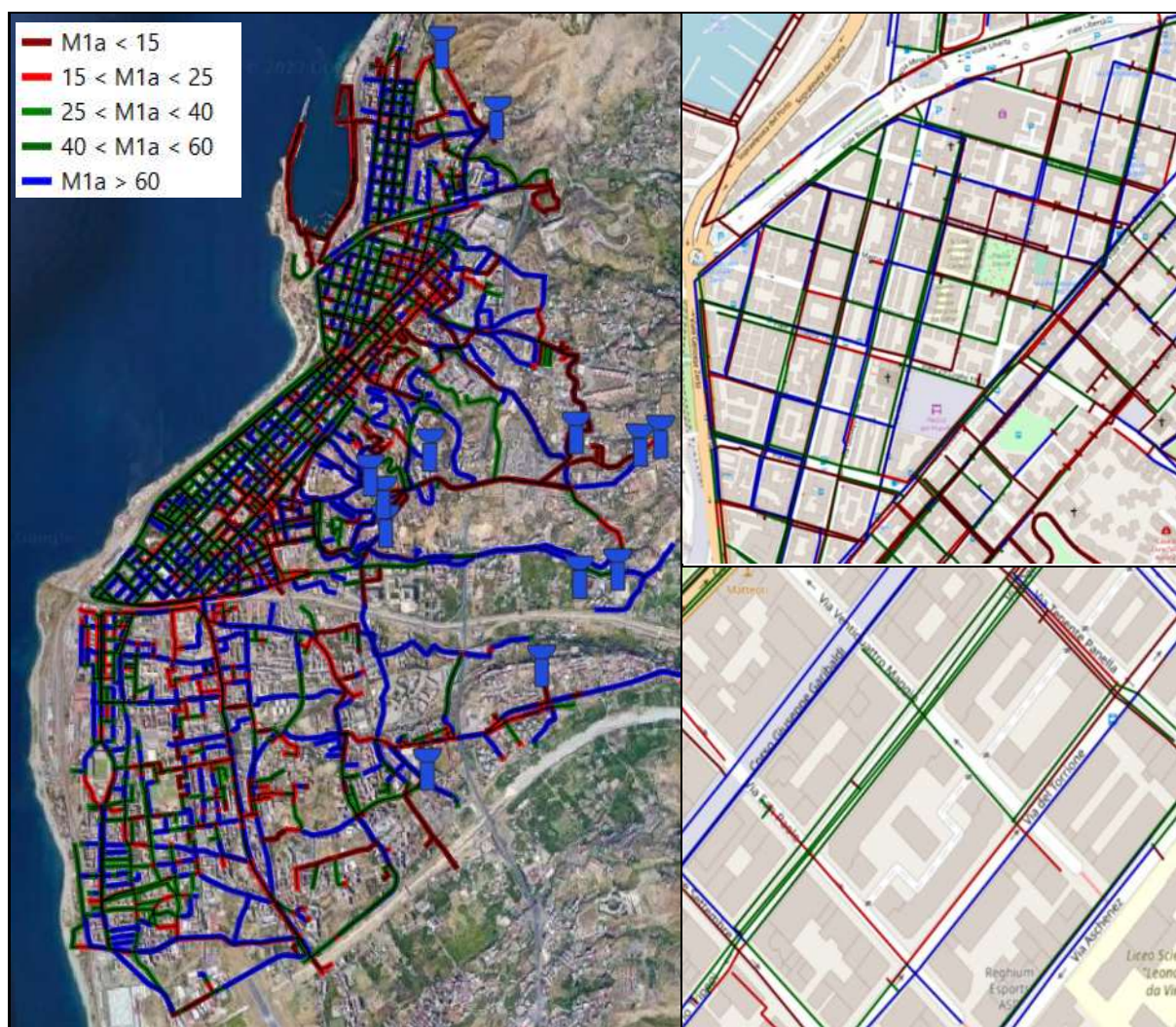


Fig.103. Macroindicatore M1a per ogni condotta della rete acquedotto di Reggio Calabria

5.8. PIANI DI RIABILITAZIONE DI PROGETTO DELLA RETE ACQUEDOTTO

La riabilitazione di una rete acquedotto non rappresenta un'opzione *gestionale* di riduzione “massiva” delle *perdite volumetriche* poiché gli interventi di sostituzione interessano, per motivi economici, solo una piccola percentuale del sistema acquedottistico. Di contro, le reti acquedotto sono comunemente caratterizzate da un deterioramento diffuso in relazione all'età media delle condotte dalle quali sono composte.

La sostituzione delle condotte vetuste ed ammalorate deve essere effettuata, pertanto, ottimizzando il costo di investimento ed avendo come *obiettivo principale* quello di **massimizzare la riduzione delle perdite volumetriche**, come indicatore gestionale, in quanto segnalatore degli effetti complessivi della reale efficacia delle soluzioni adottate nei piani di riabilitazione della rete acquedotto.

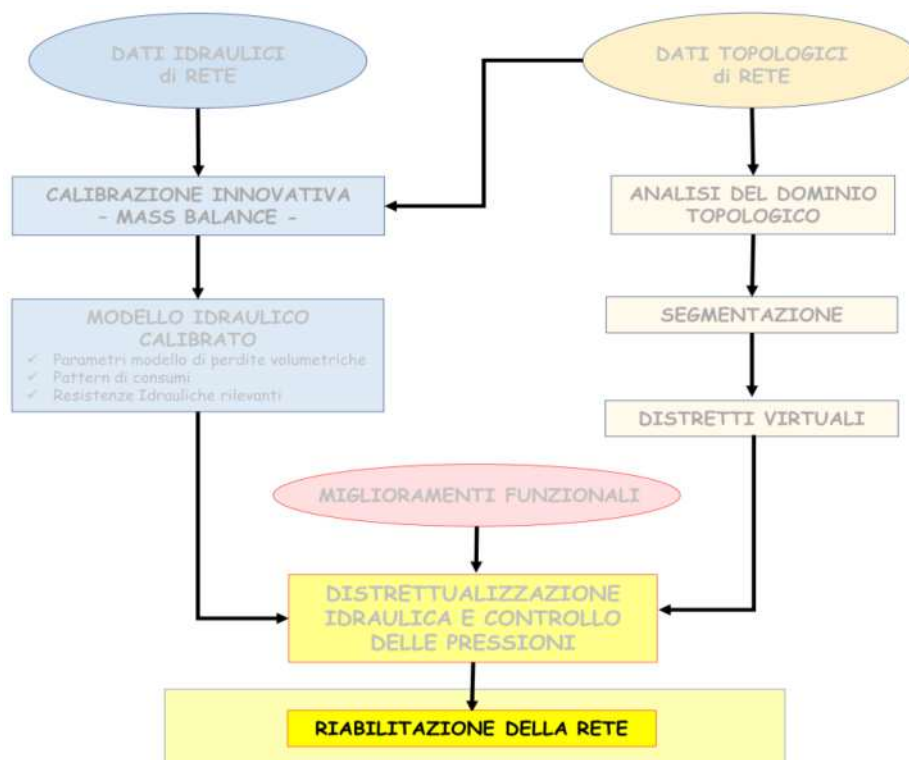


Fig.104. Flow-Chart dell'iter metodologico – “Riabilitazione della rete” – Piani di Sostituzione delle condotte

Tale obiettivo non può essere raggiunto con una “*visione locale*”, ovvero valutando la riduzione delle perdite volumetriche rispetto ai soli tronchi sostituiti, ma con una “*visione globale*”, ovvero valutando le conseguenze idrauliche *estese* di tali sostituzioni e la *riduzione globale* delle perdite volumetriche sul complesso del sistema a rete. Tale condizione è necessaria al fine di evitare l'effetto contrastante di aumento delle perdite volumetriche, causato dalla significativa maggior conduttanza idraulica delle nuove

tubazioni sostituite che incrementa le pressioni di esercizio nelle porzioni di sistema idraulicamente a valle delle stesse. In coerenza con quanto appena rilevato, nella metodologia complessiva di “*asset management*” applicata nel caso-studio della rete acquedotto di Reggio Calabria, il supporto alla sostituzione di tronchi è stato subordinato alla preventiva scelta dei distretti di monitoraggio ed al controllo delle pressioni sviluppato nei paragrafi precedenti. *La scelta dei tronchi da sostituire riferita al migliore rapporto costi/benefici, ovvero investimenti/riduzione delle perdite volumetriche, dipende infatti dal nuovo assetto idraulico ottenuto a seguito della riconfigurazione dei flussi e del controllo delle pressioni.* Assegnata la “*soluzione ottima*” prescelta di *distrettualizzazione idraulica* della rete acquedotto, lo strumento di supporto alla riabilitazione ha permesso di poter identificare i tronchi di rete che, per diverse percentuali di sostituzione delle condotte totali di rete, massimizzano un indice di efficienza dato dal rapporto tra la *riduzione di perdita attesa* a seguito della sostituzione ed *il costo di intervento*.

La scelta dei piani di riabilitazione di progetto è stata finalizzata all’identificazione delle tubazioni da sostituire considerando gli anni di servizio (tronchi vetusti), attraverso un “*parametro di deterioramento*”, ed utilizzando la simulazione idraulica avanzata.

Per il caso studio della rete acquedotto di Reggio Calabria sono stati predisposti n.10 diversi Piani di Riabilitazione imponendo una percentuale di sostituzione del totale delle condotte di rete crescente dal 2% al 20% (ad esempio, la soluzione 2% rappresenta la percentuale del costo di sostituzione delle condotte scelte nel “piano di riabilitazione” rispetto al costo totale di sostituzione di tutte le condotte di rete).

Al fine di poter applicare un criterio costi/benefici per la predisposizione ottimale dei piani di riabilitazione è stato preventivamente impostato, per il caso-studio, un costo unitario di sostituzione delle condotte valutato per metro lineare e riferito a tutti i diversi diametri presenti nella rete esistente. L’ipotesi di progetto applicata è stata inoltre quella di prevedere la sostituzione dei tronchi a piccolo diametro ($DN < 100\text{mm}$) con condotte di diametro minimo $DN=100\text{mm}$ (ipotesi coerente con la reale gestione dei sistemi idrici dove viene spesso applicata una “politica” definita “di magazzino”).

Viene di seguito riportata la rappresentazione grafica dei n.10 diversi Piani di Riabilitazione di progetto completa dei relativi risultati della simulazione idraulica avanzata, dei costi di investimento e delle riduzioni attese in termini di perdite volumetriche sul sistema acquedotto, rispetto al funzionamento attuale della rete esistente.

5.8.1. PIANO DI RIABILITAZIONE n.1

Il **Piano di Riabilitazione n.1** di progetto è stato predisposto imponendo un costo di intervento pari al **2%** del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria ed utilizzando un criterio di scelta delle tubazioni da sostituire che restituisca la maggiore *efficienza* in termini di rapporto tra le perdite lineari (parametro *M1a* della singola condotta sostituita) e costo di sostituzione della condotta stessa. Nel *Piano di Sostituzione n.1* sono state, pertanto, selezionate prioritariamente le condotte da sostituire che presentano un elevato valore di *perdite lineari M1a*, rapportato al costo di sostituzione della condotta stessa. Il *costo di sostituzione* della singola condotta da sostituire è stato calcolato come prodotto tra lunghezza specifica della condotta e *costo unitario di sostituzione* della stessa che è funzione del proprio *Diametro Nominale DN commerciale*. I risultati ottenuti dalla *distrettualizzazione idraulica* della rete di Reggio Calabria, riportati graficamente nelle figure a seguire, possono essere così sintetizzati:

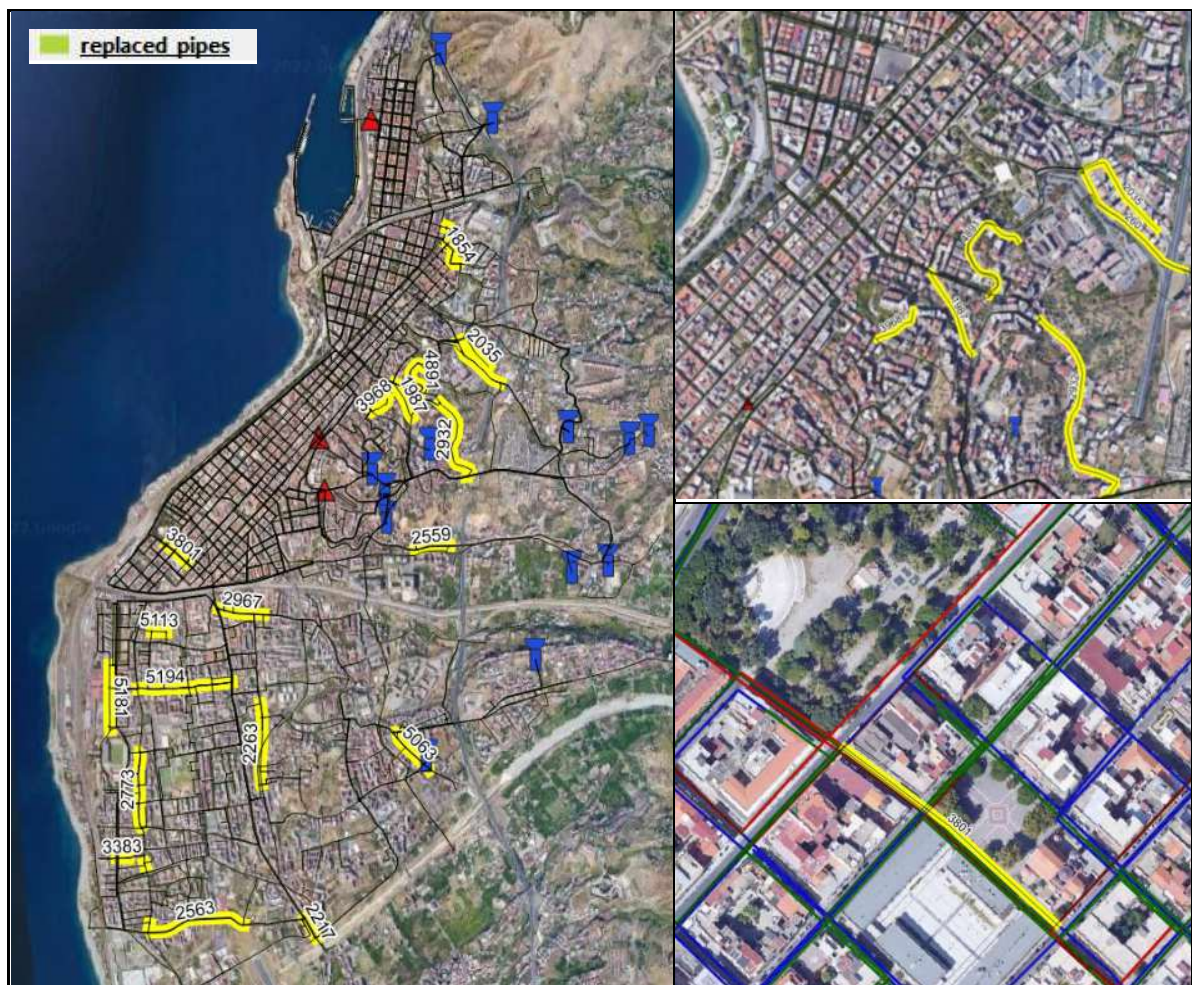


Fig.105. Stralcio Planimetrico delle condotte da sostituire nel Piano di Riabilitazione n.1

PIANO DI RIABILITAZIONE N.1								
CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE MEDIA in rete [mt]	M1a [mc/km/g]	Perdite Volumetriche [mc/g]	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
Numero	Lunghezza [km]	Costo [€]				[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
21	6,027	1'726'955.00 €	51,50	89,61	28'577	10'587	3'864'255	27,03%

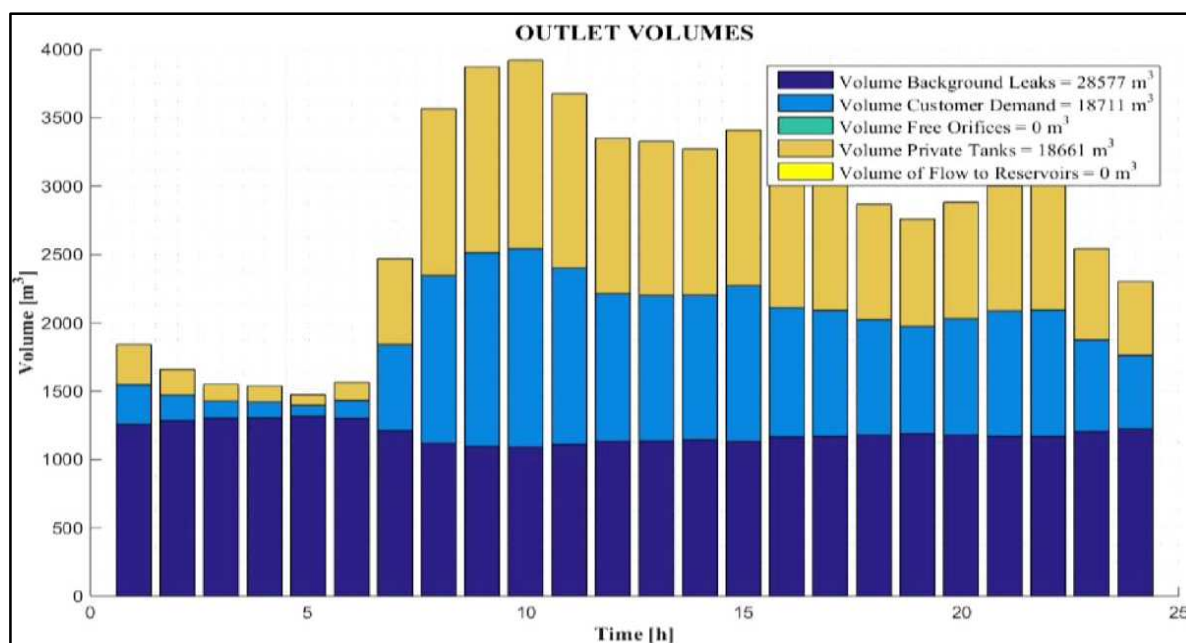


Fig.106. Componenti del pattern di della portata in ingresso - Piano di Riabilitazione n.1

- **Sostituzione di 21 condotte** sul totale complessivo di 7.869 tubazioni esistenti in rete;
- **Lunghezza totale di tubazioni sostituite pari a 6,027km** sul totale complessivo di 318,91km di tubazioni esistenti in rete;
- **Costo stimato** dei lavori previsti nel Piano di Riabilitazione n.1 pari ad **€.1.726.955,00**;
- **Riduzione della pressione media in rete** da 56,20mt nel funzionamento idraulico attuale della rete esistente, a **51,50mt** ottenuti nella configurazione di progetto;
- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a** (*perdite idriche lineari*) da un valore di $123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ ad un valore di **$89,61 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$** ;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete** (*Volume Background Leaks*) da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **28.577 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **10.587 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete** di risorsa idrica pari a circa **3.864.255mc**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **27,03%** rispetto alle perdite volumetriche stimate nel funzionamento attuale della rete.

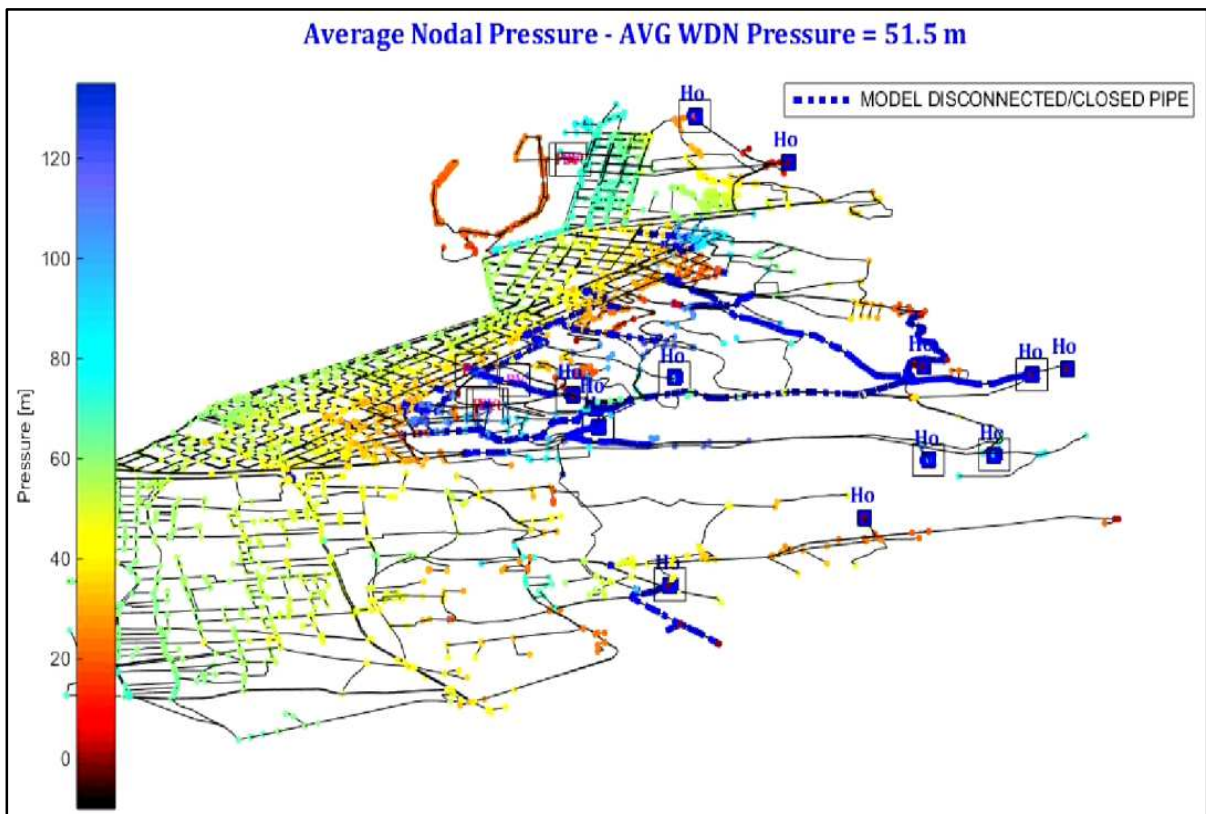


Fig.107. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria - Piano di Riabilitazione n.1

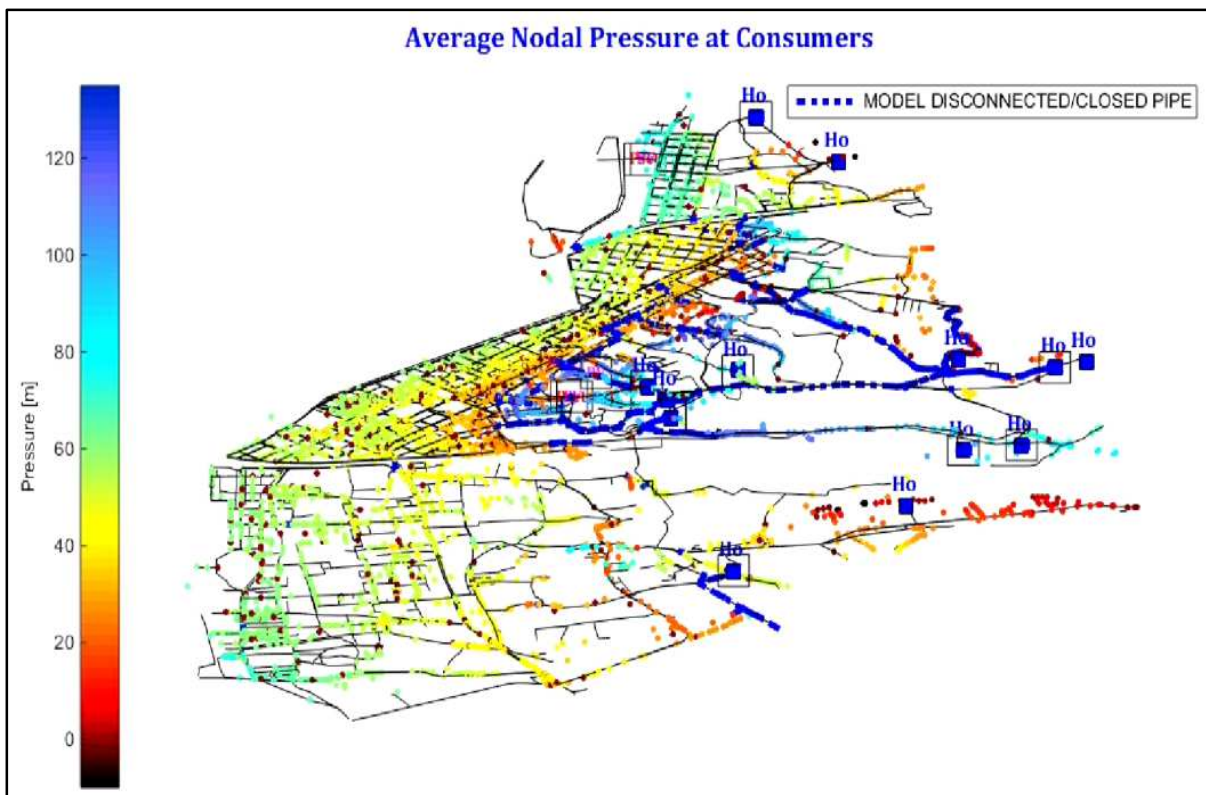


Fig.108. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Piano di Riabilitazione n.1

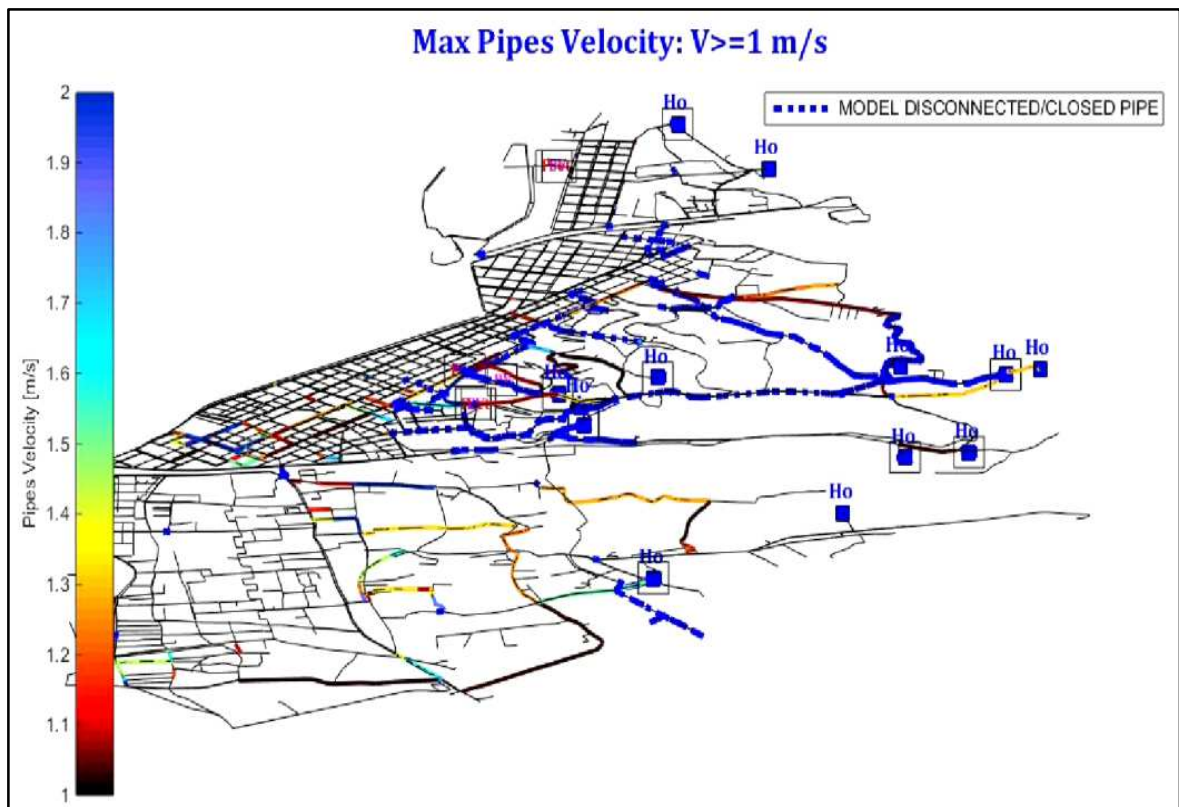


Fig.109. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.1

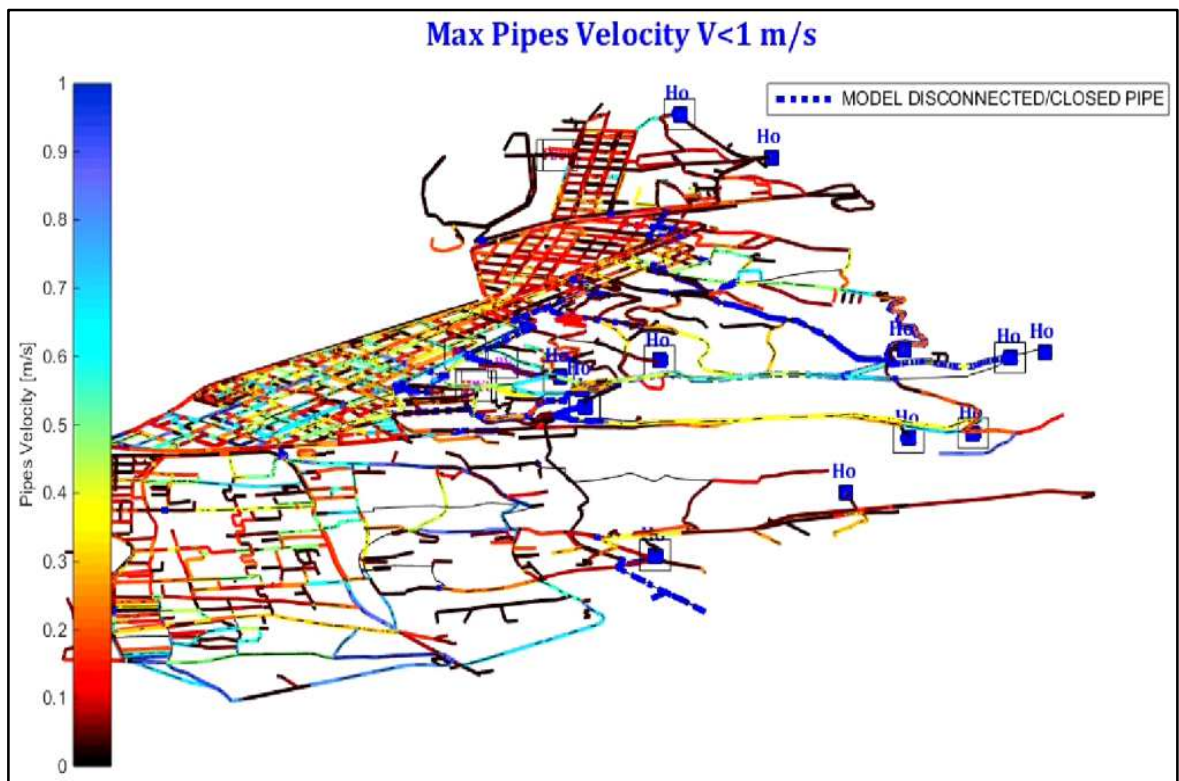


Fig.110. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.1

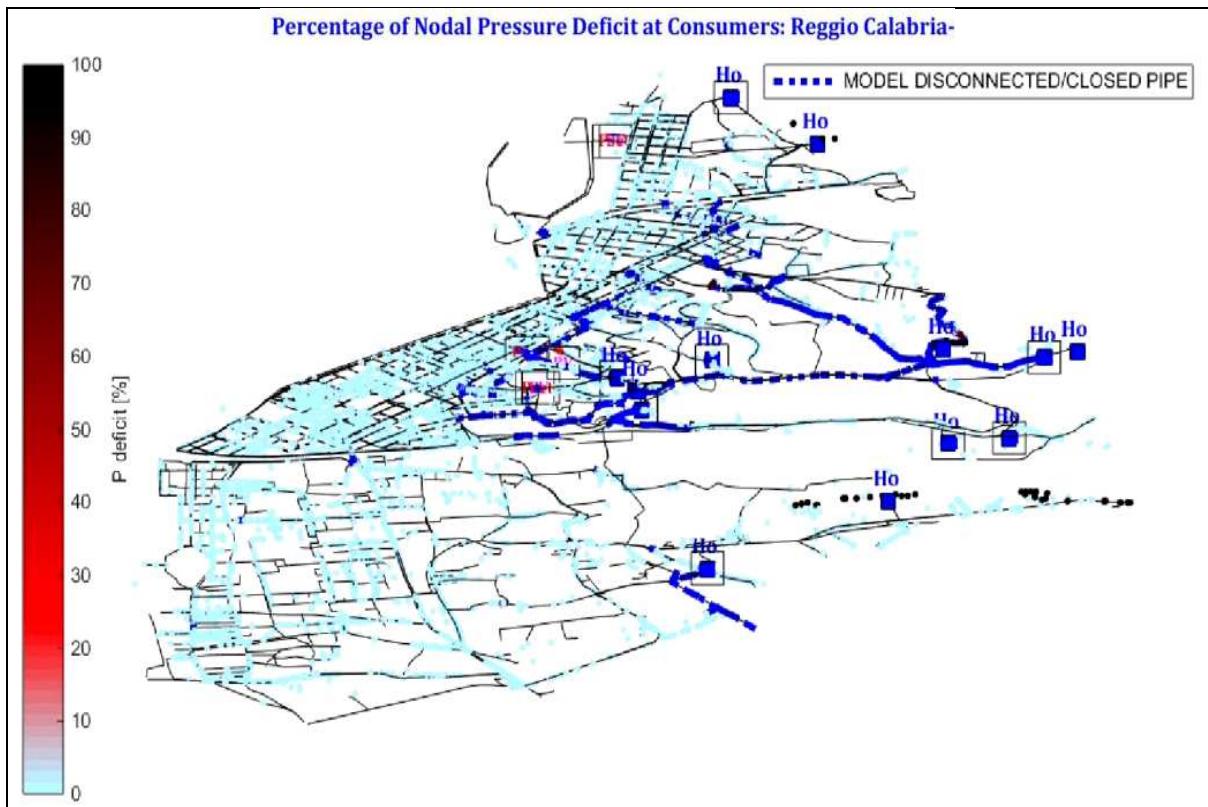


Fig.111. Percentuale UtENZE in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.1

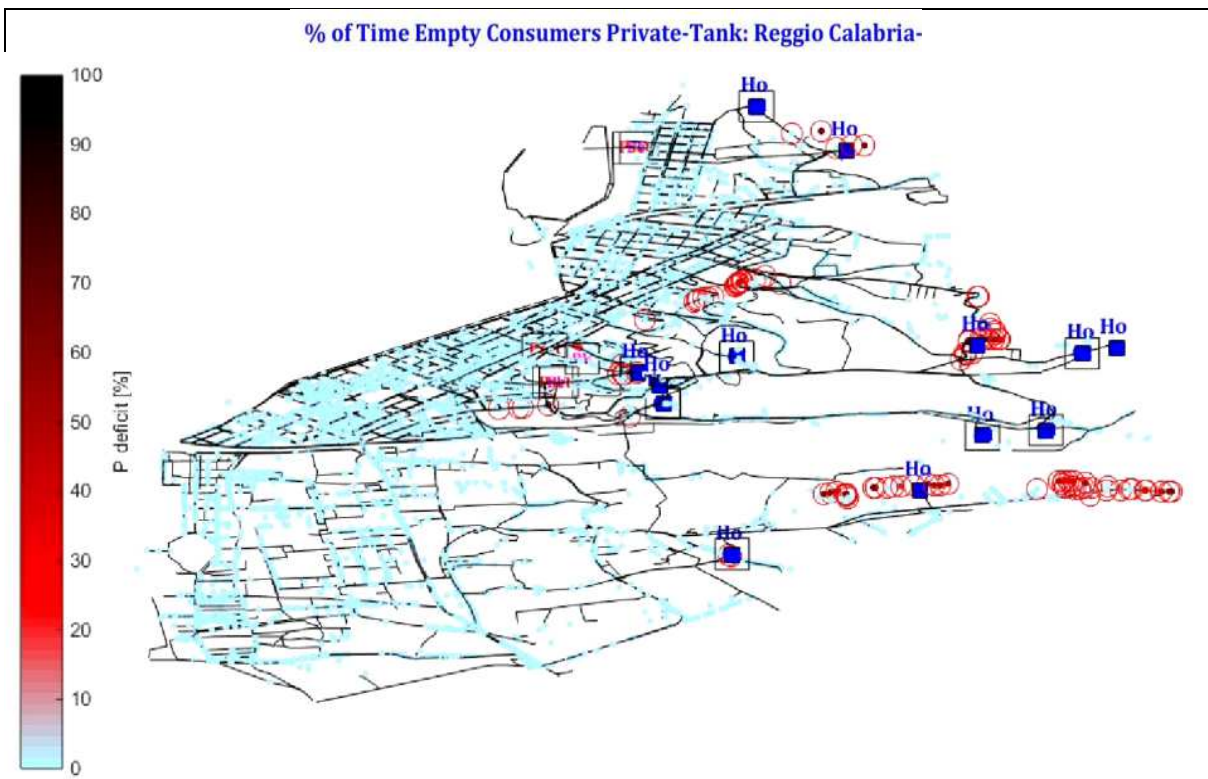


Fig.112. Percentuale di tempo singole UtENZE in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.1

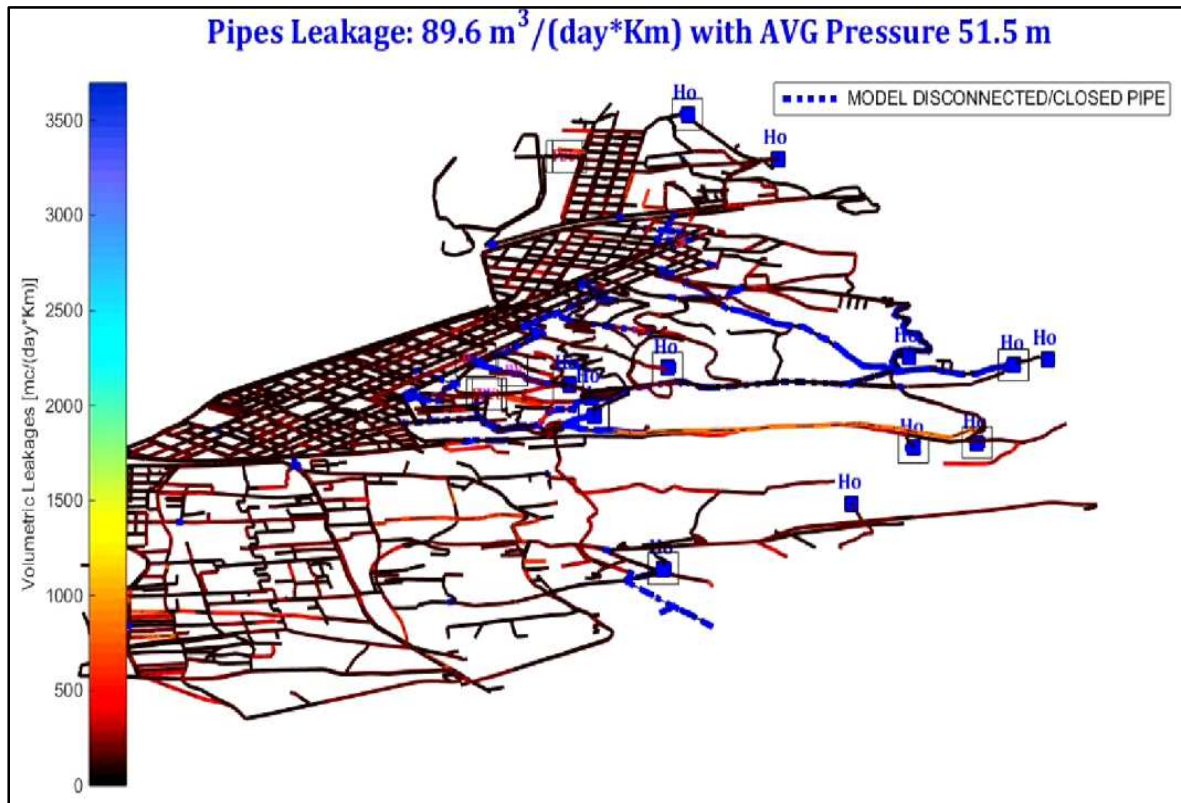


Fig.113. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo Macroindicatore M1a - Piano di Riabilitazione n.1

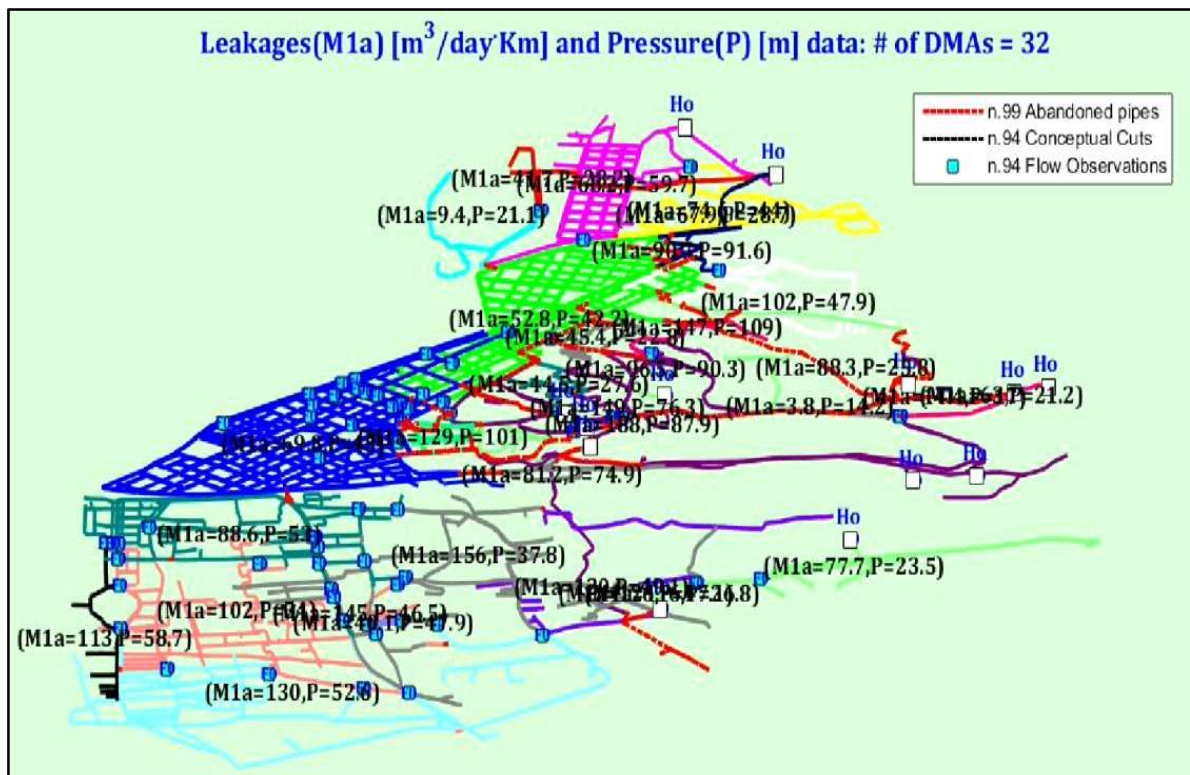


Fig.114. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo M1a nei DMA - Piano di Riabilitazione n.1

5.8.2. PIANO DI RIABILITAZIONE N.2

Il **Piano di Riabilitazione n.2** di progetto è stato predisposto imponendo un costo di intervento pari al 4% del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria ed utilizzando un criterio di scelta delle tubazioni da sostituire che restituisca la maggiore *efficienza* in termini di rapporto tra le perdite lineari (parametro *M1a* della singola condotta sostituita) e costo di sostituzione della condotta stessa. Nel *Piano di Sostituzione n.2* sono state, pertanto, selezionate prioritariamente le condotte da sostituire che presentano un elevato valore di *perdite lineari M1a*, rapportato al costo di sostituzione della condotta stessa. Il *costo di sostituzione* della singola condotta da sostituire è stato calcolato come prodotto tra lunghezza specifica della condotta e *costo unitario di sostituzione* della stessa che è funzione del proprio *Diametro Nominale DN commerciale*. I risultati ottenuti dalla *distrettualizzazione idraulica* della rete di Reggio Calabria, riportati graficamente nelle figure a seguire, possono essere così sintetizzati:

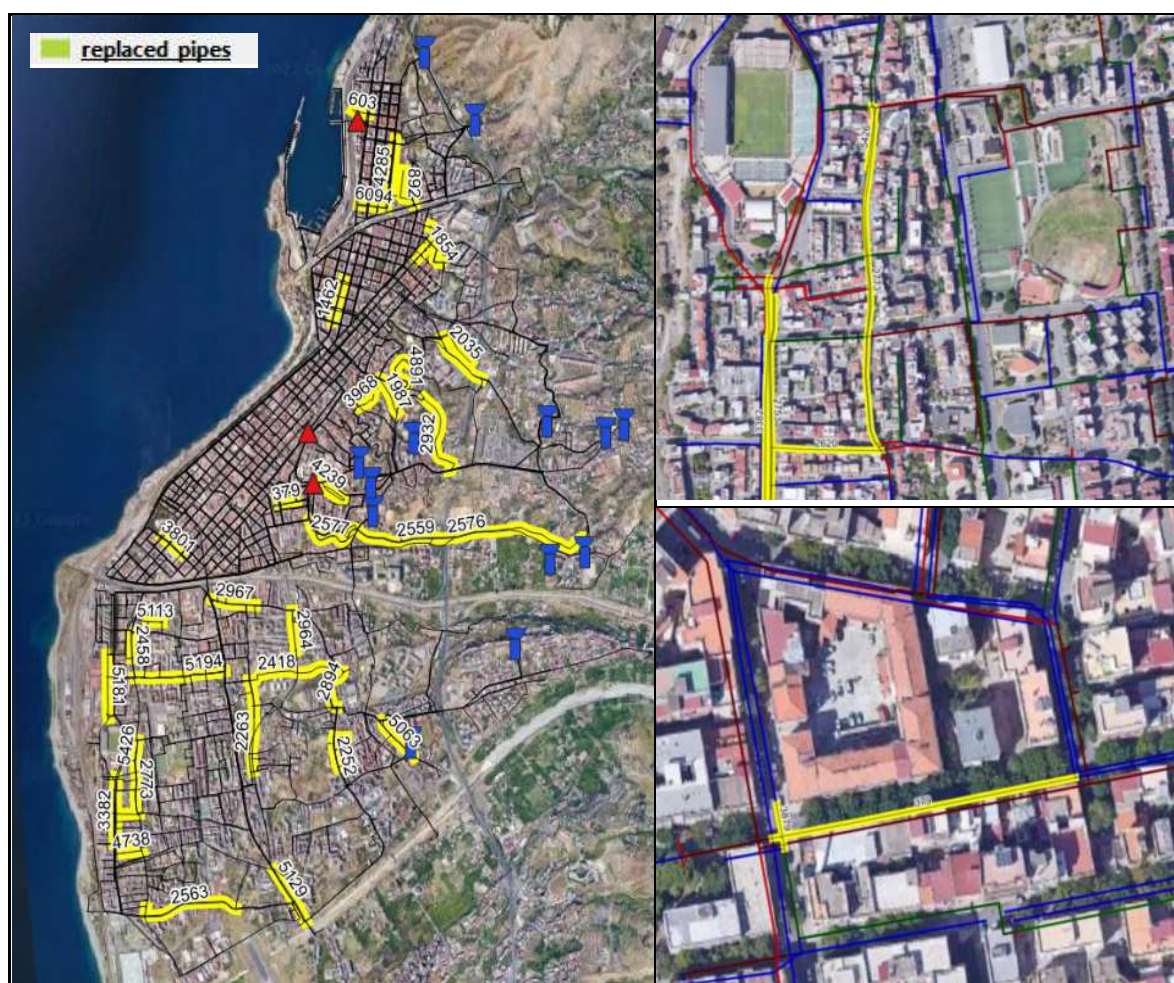


Fig.115. Stralcio Planimetrico delle condotte da sostituire - Piano di Riabilitazione n.2

PIANO DI RIABILITAZIONE N.2								
CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE MEDIA in rete [mt]	M1a [mc/km/g]	Perdite Volumetriche [mc/g]	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
Numero	Langhezza [km]	Costo [€]				[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
45	12,809	3'733'208.00 €	52,50	79,30	25'289	13'875	5'064'375	35,43%

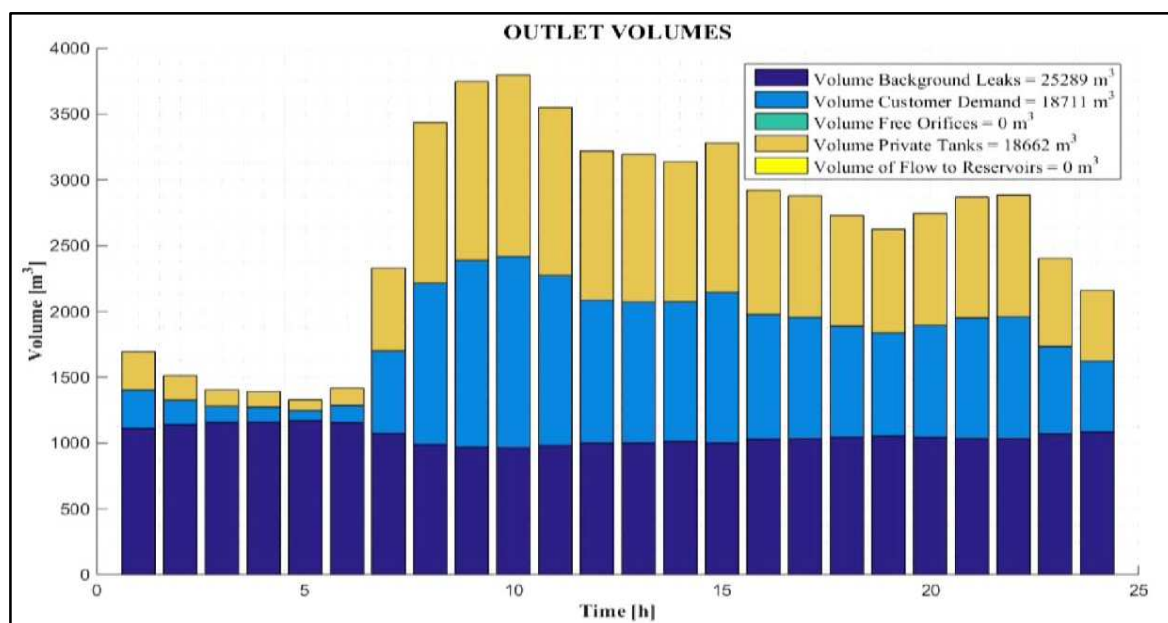


Fig.116. Componenti del pattern di della portata in ingresso - Piano di Riabilitazione n.2

- **Sostituzione di 45 condotte** sul totale complessivo di 7.869 tubazioni esistenti in rete;
- **Lunghezza totale di tubazioni sostituite pari a 12,809km** sul totale complessivo di 318,91km di tubazioni esistenti in rete;
- **Costo stimato** dei lavori previsti nel Piano di Riabilitazione n.2 pari ad **€3.733.208,00**;
- **Riduzione della pressione media in rete** da 56,20mt nel funzionamento idraulico attuale della rete esistente, a **52,50mt** ottenuti nella configurazione di progetto;
- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a** (*perdite idriche lineari*) da un valore di $123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ ad un valore di $79,30 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete** (*Volume Background Leaks*) da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **25.289 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **13.875 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete** di risorsa idrica pari a circa **5.064.375mc**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **35,43%** rispetto alle perdite volumetriche stimate nel funzionamento attuale della rete.

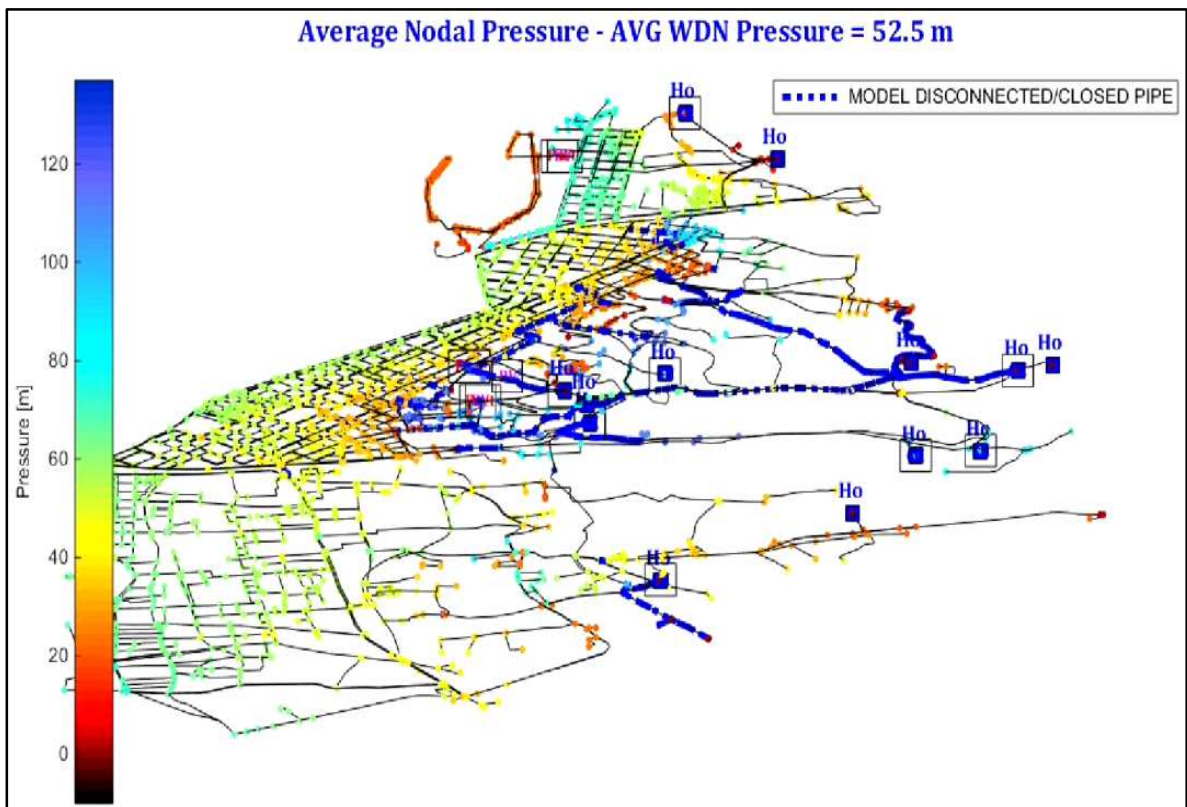


Fig.117. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria - Piano di Riabilitazione n.2

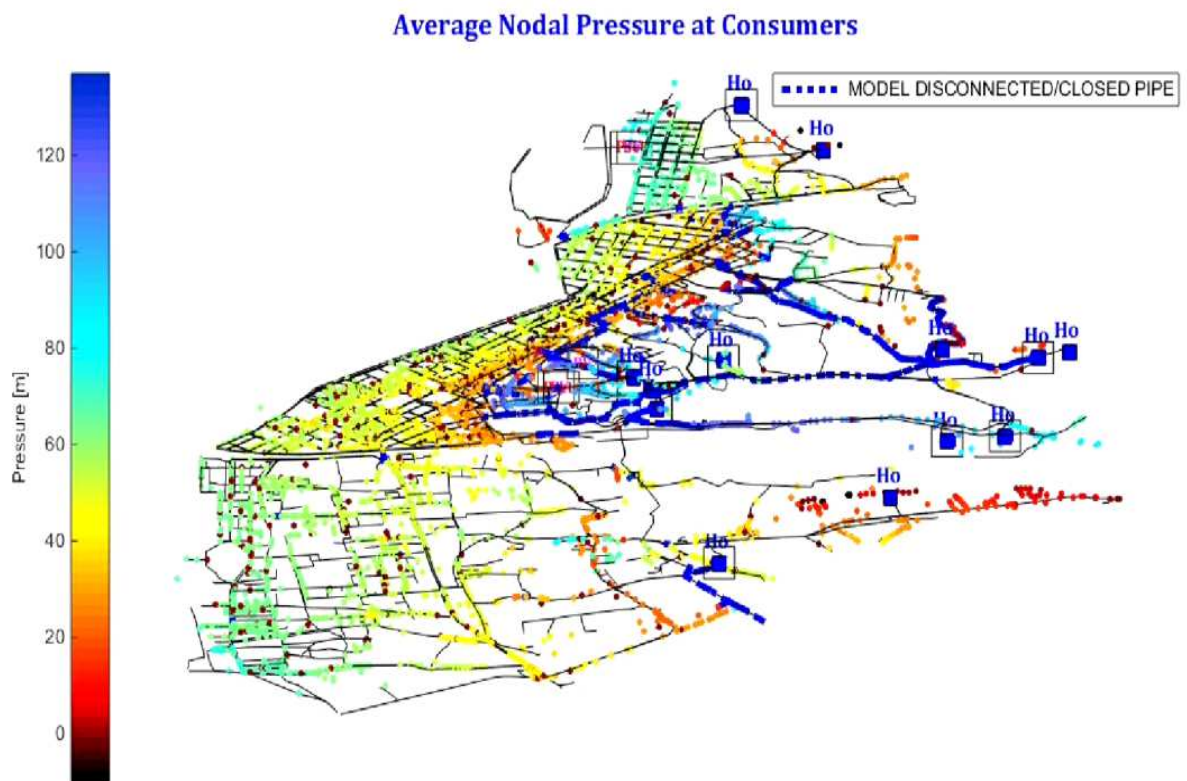


Fig.118. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Piano di Riabilitazione n.2

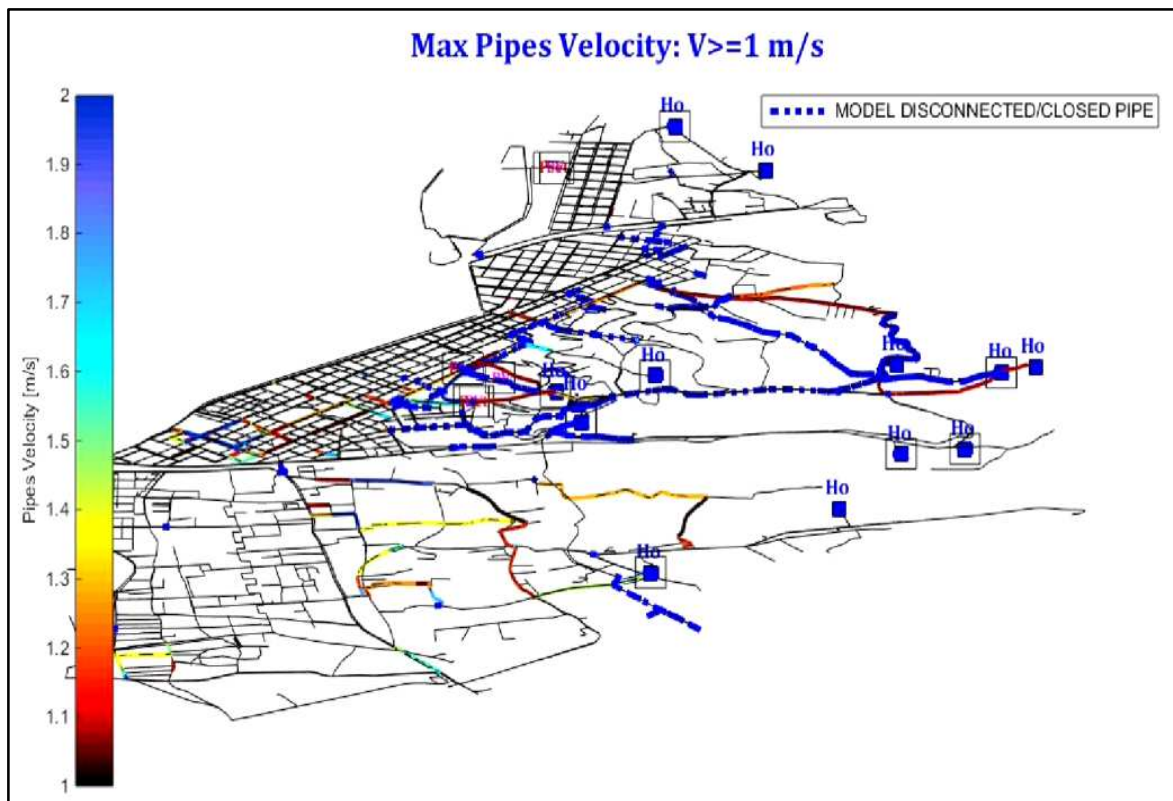


Fig.119. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.2

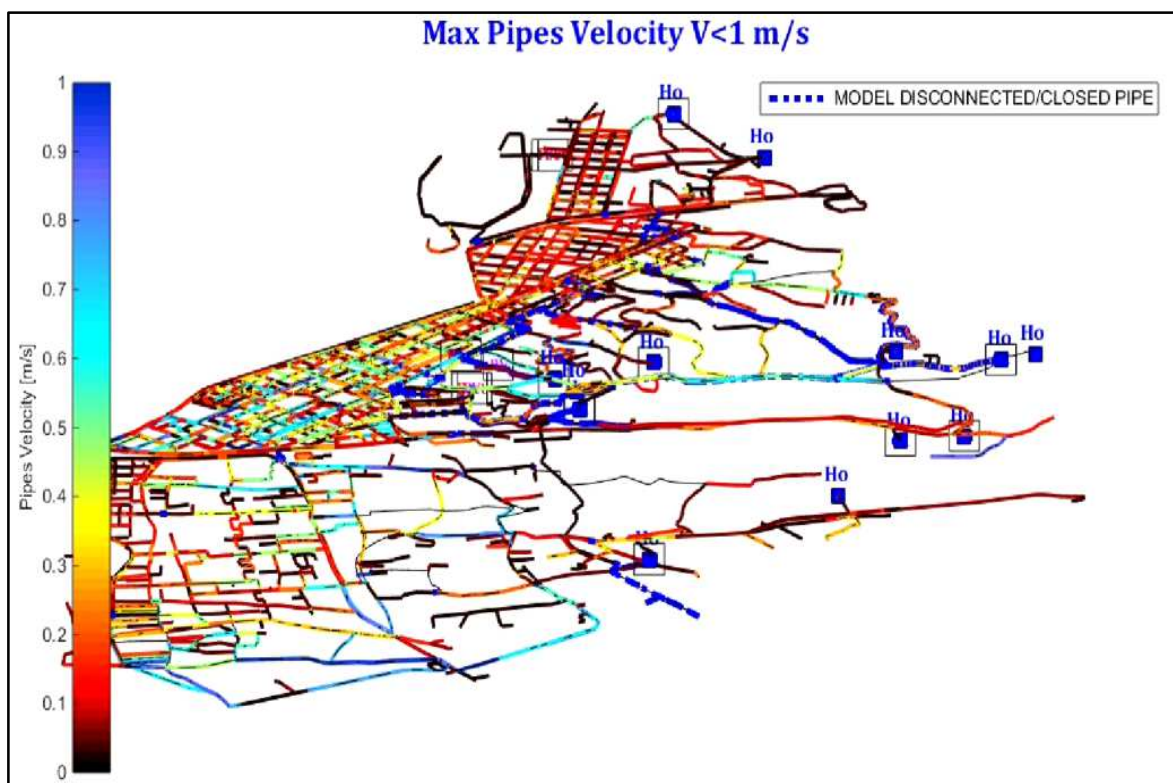


Fig.120. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.2

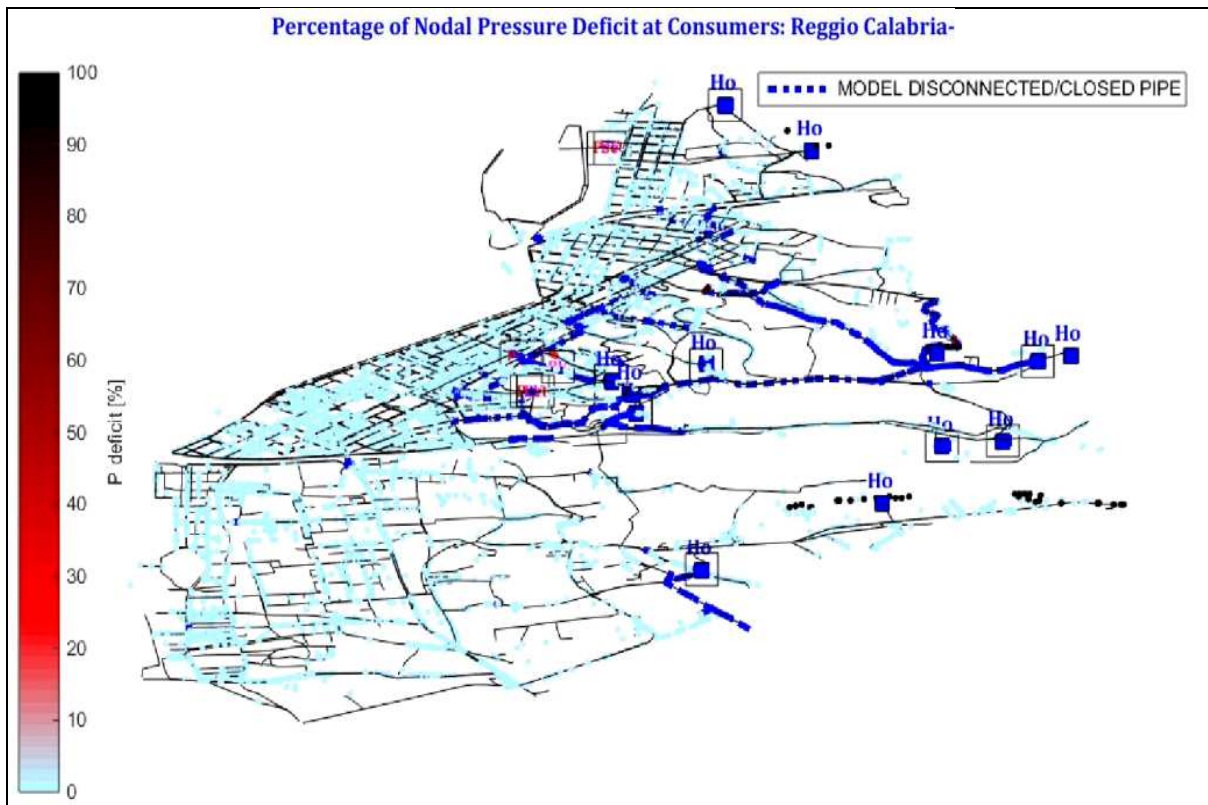


Fig.121. Percentuale UtENZE in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.2

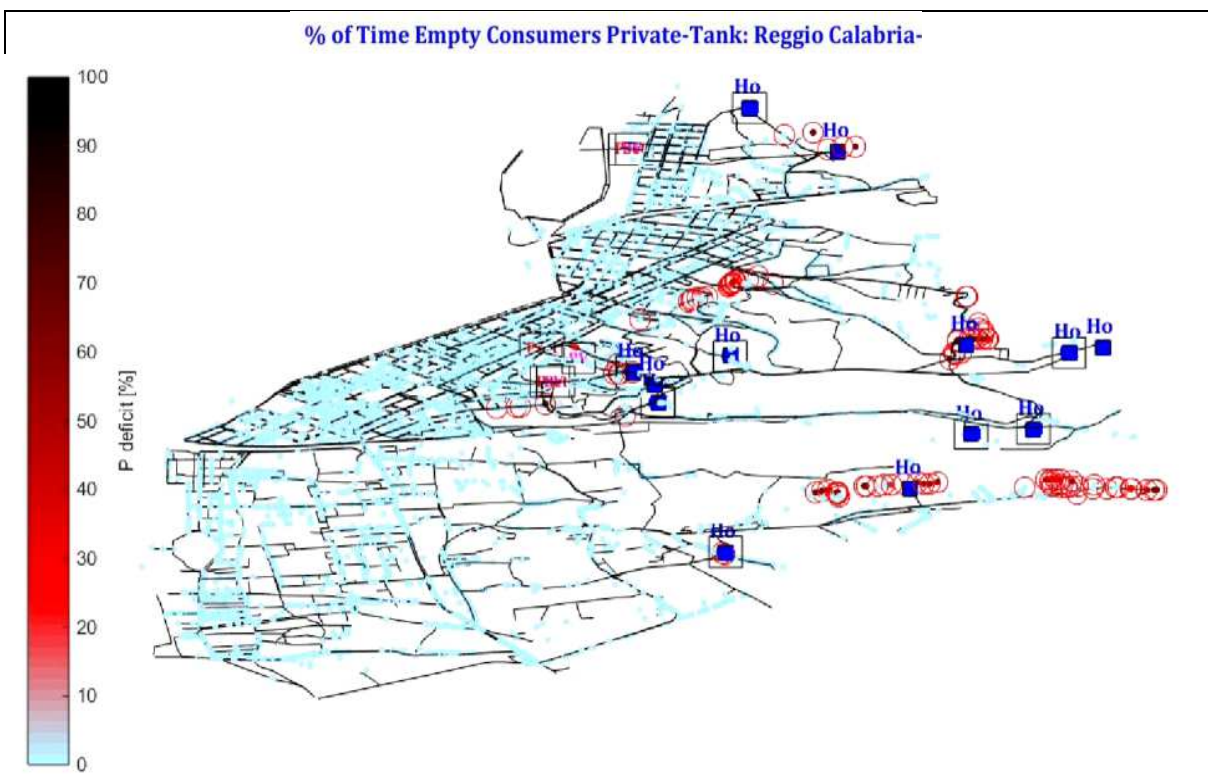


Fig.122. Percentuale di tempo singole UtENZE in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.2

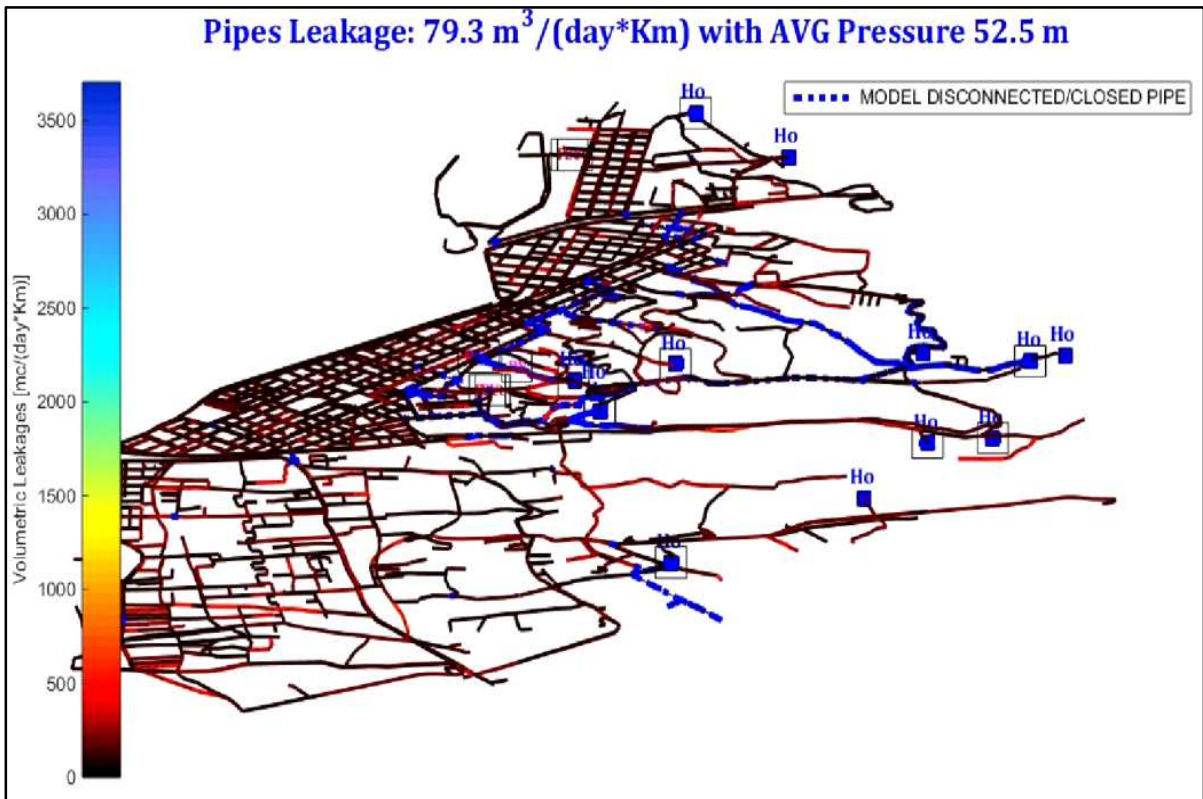


Fig.123. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo Macroindicatore M1a - Piano di Riabilitazione n.2

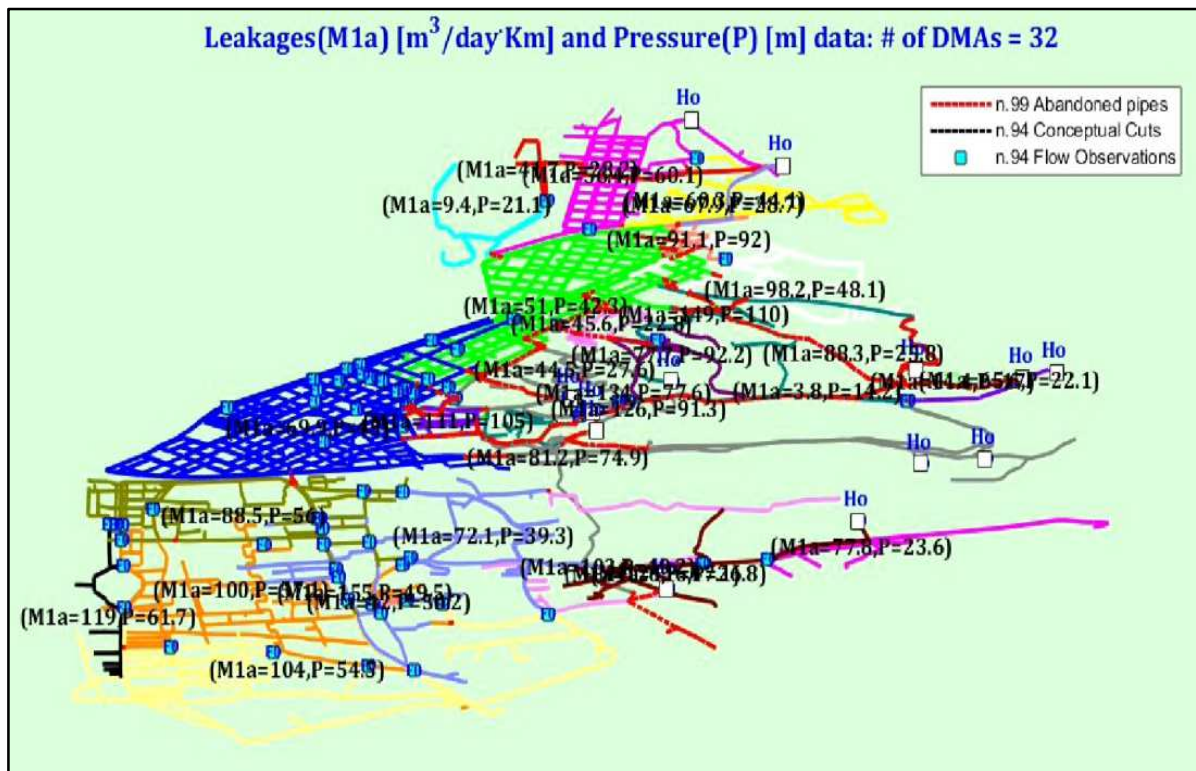


Fig.124. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo M1a nei DMA - Piano di Riabilitazione n.2

5.8.3. PIANO DI RIABILITAZIONE N.3

Il **Piano di Riabilitazione n.3** di progetto è stato predisposto imponendo un costo di intervento pari al **6%** del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria ed utilizzando un criterio di scelta delle tubazioni da sostituire che restituisca la maggiore *efficienza* in termini di rapporto tra le perdite lineari (parametro *M1a* della singola condotta sostituita) e costo di sostituzione della condotta stessa. Nel *Piano di Sostituzione n.3* sono state, pertanto, selezionate prioritariamente le condotte da sostituire che presentano un elevato valore di *perdite lineari M1a*, rapportato al costo di sostituzione della condotta stessa. Il *costo di sostituzione* della singola condotta da sostituire è stato calcolato come prodotto tra lunghezza specifica della condotta e *costo unitario di sostituzione* della stessa che è funzione del proprio *Diametro Nominale DN commerciale*. I risultati ottenuti dalla *distrettualizzazione idraulica* della rete di Reggio Calabria, riportati graficamente nelle figure a seguire, possono essere così sintetizzati:

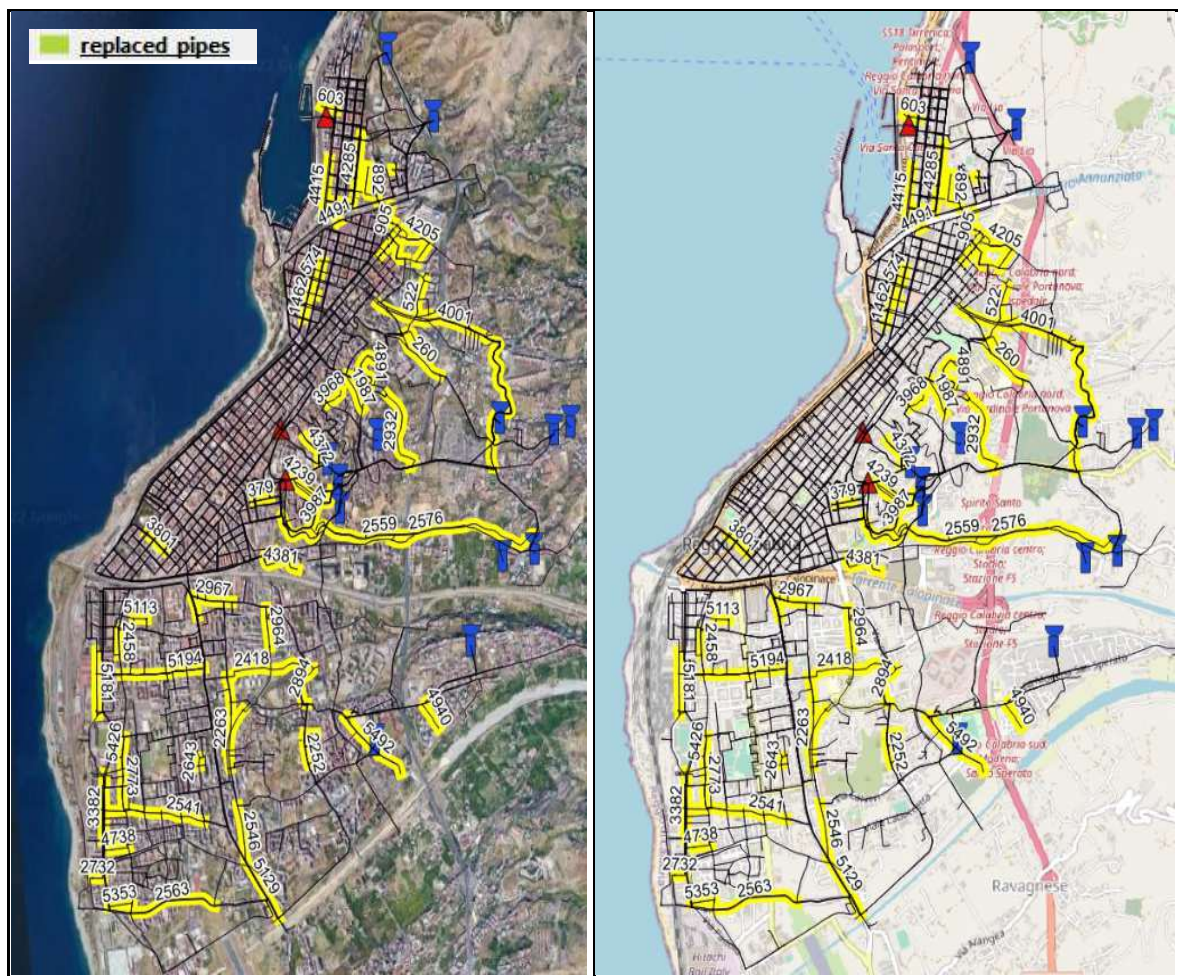


Fig.125. Stralcio Planimetrico delle condotte da sostituire - Piano di Riabilitazione n.3

PIANO DI RIABILITAZIONE N.3								
CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE	M1a	Perdite Volumetriche	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
Numero	Lunghezza [km]	Costo [€]	MEDIA in rete [mt]	[mc/km/g]	[mc/g]	[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
71	20,014	5'765'408.00 €	53,50	72,01	22'964	16'200	5'913'000	41,36%

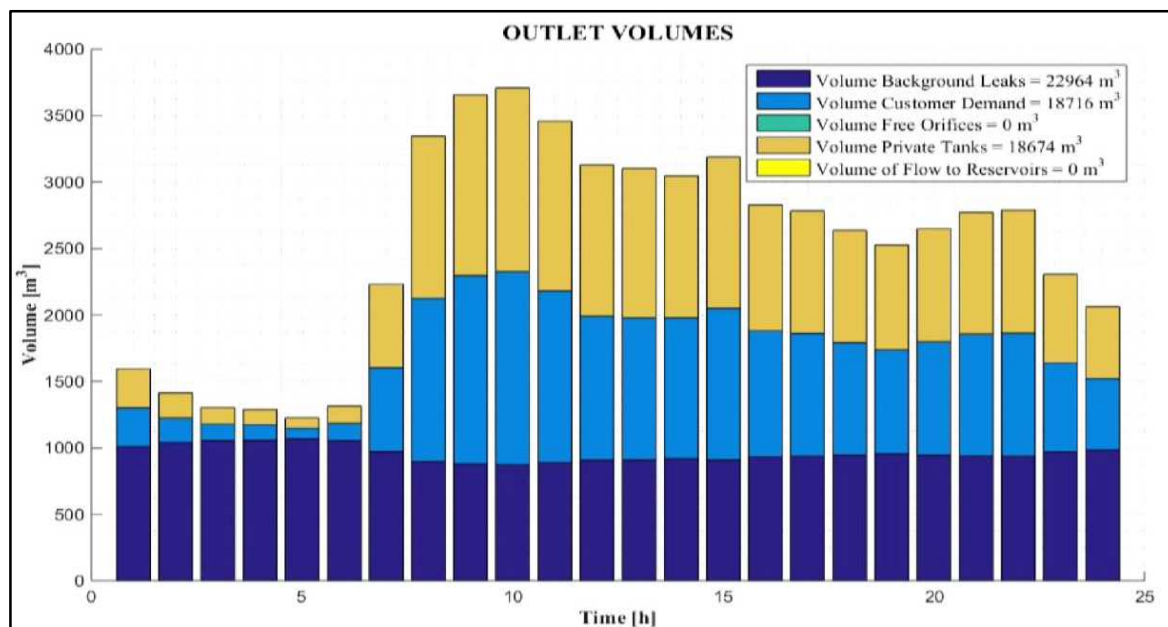


Fig.126. Componenti del pattern di della portata in ingresso - Piano di Riabilitazione n.3

- **Sostituzione di 71 condotte** sul totale complessivo di 7.869 tubazioni esistenti in rete;
- **Lunghezza totale di tubazioni sostituite pari a 20,014km** sul totale complessivo di 318,91km di tubazioni esistenti in rete;
- **Costo stimato** dei lavori previsti nel Piano di Riabilitazione n.3 pari ad **€.5.765.408,00**;
- **Riduzione della pressione media in rete** da 56,20mt nel funzionamento idraulico attuale della rete esistente, a **53,50mt** ottenuti nella configurazione di progetto;
- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a** (*perdite idriche lineari*) da un valore di $123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ ad un valore di $72,01 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete** (*Volume Background Leaks*) da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **22.964 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **16.200 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete** di risorsa idrica pari a circa **5.913.000mc**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **41,36%** rispetto alle perdite volumetriche stimate nel funzionamento attuale della rete.

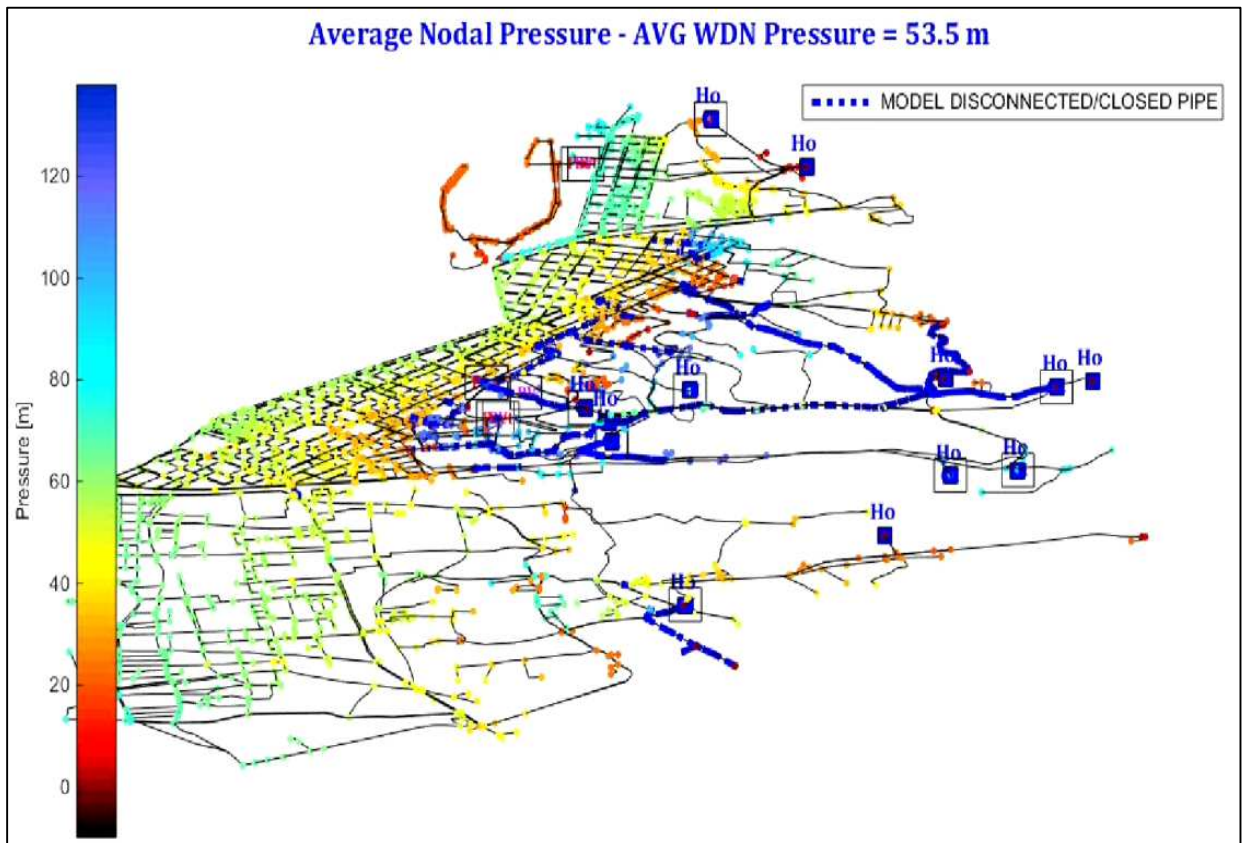


Fig.127. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria - Piano di Riabilitazione n.3

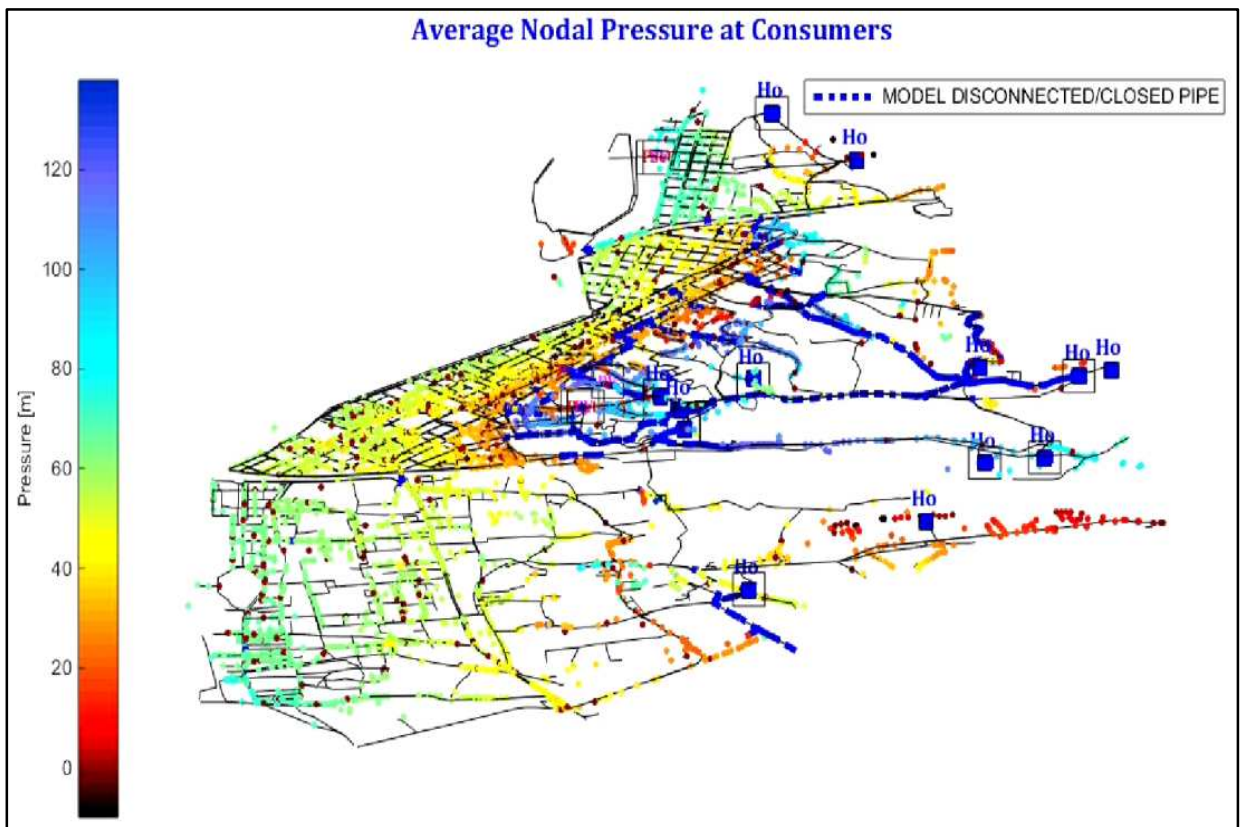


Fig.128. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Piano di Riabilitazione n.3

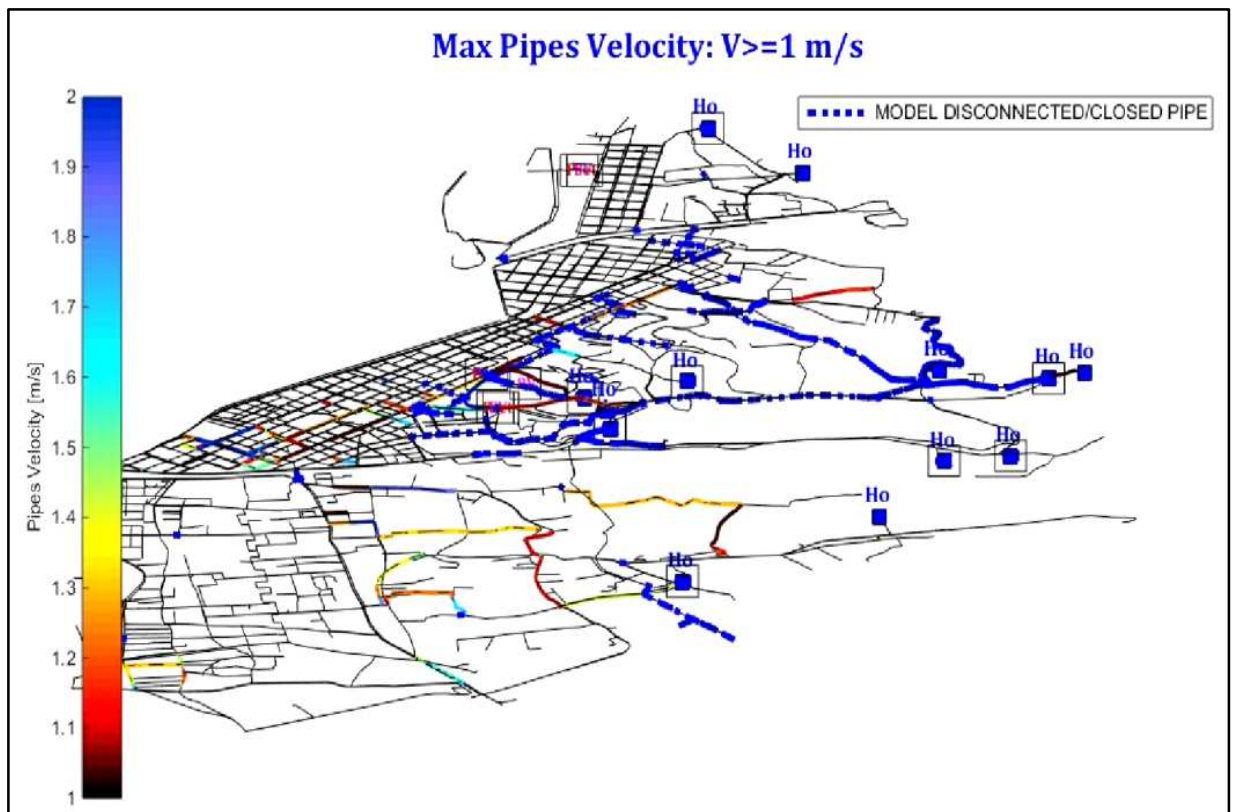


Fig.129. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.3

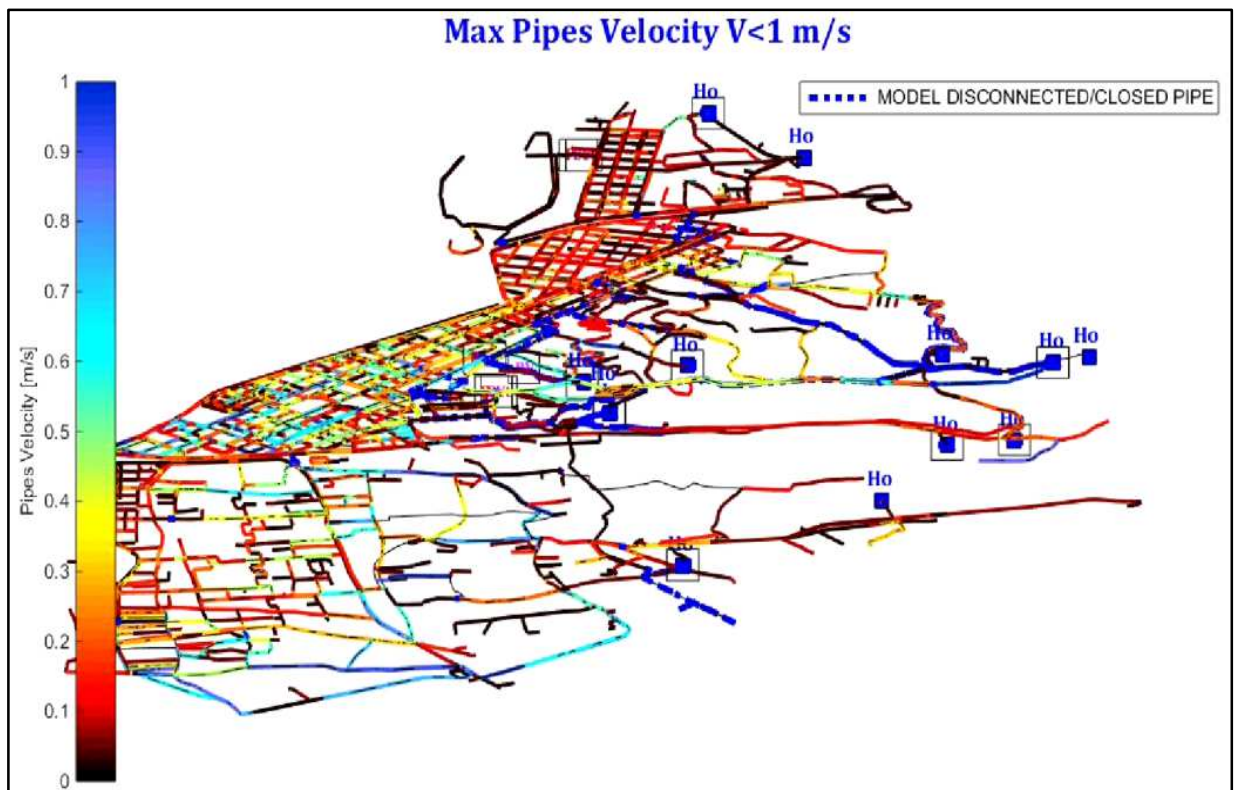


Fig.130. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.3

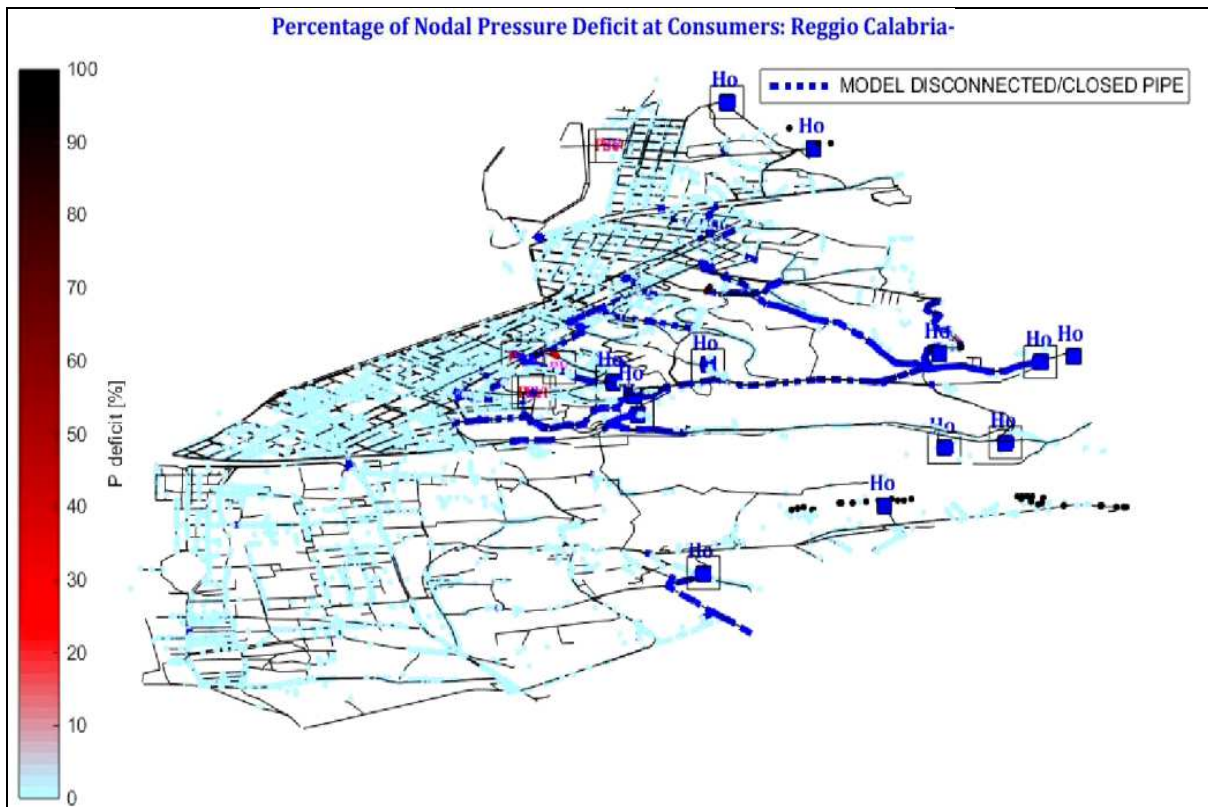


Fig.131. Percentuale Utente in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.3

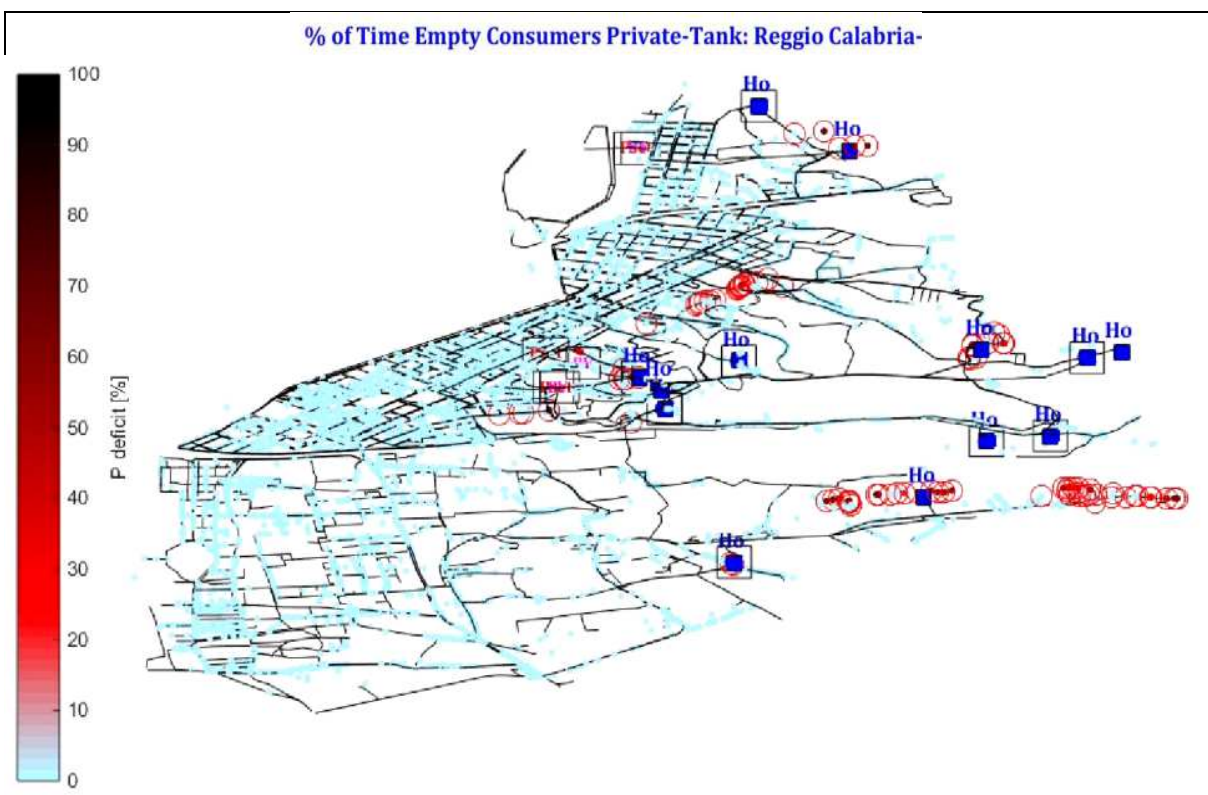


Fig.132. Percentuale di tempo singole Utente in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.3

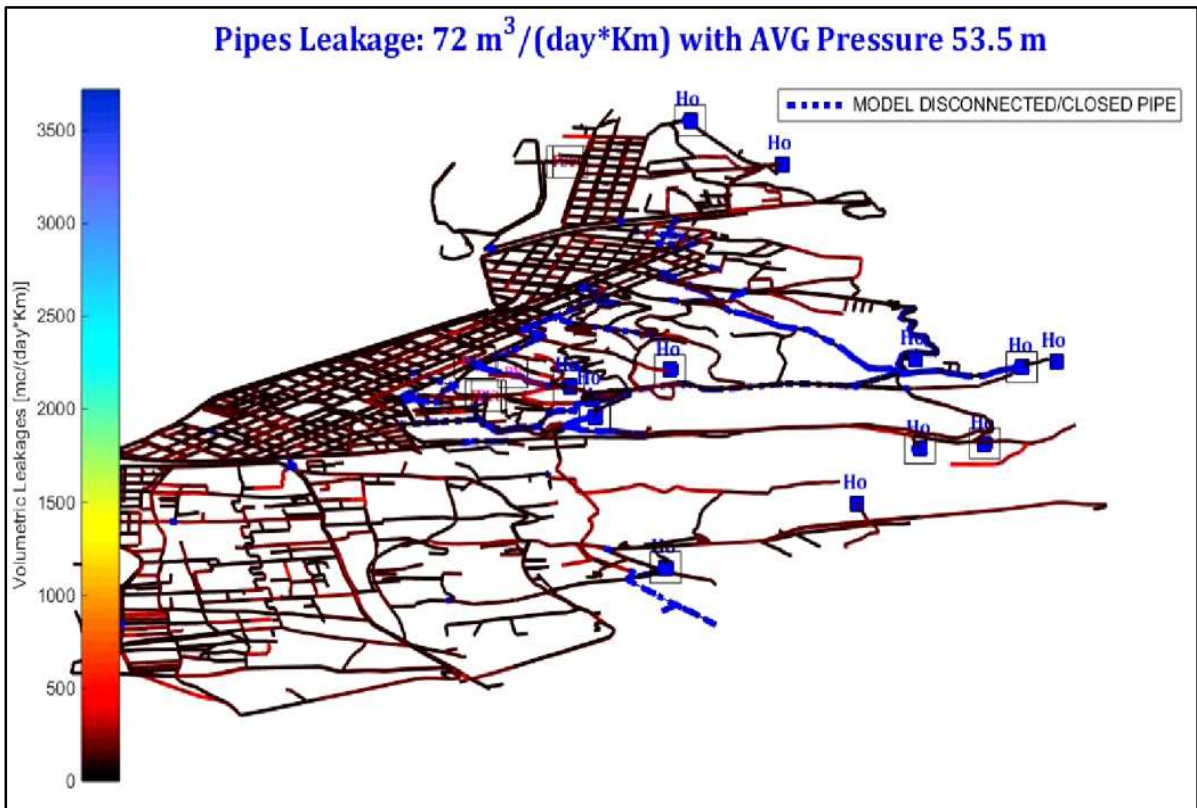


Fig.133. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo Macroindicatore M1a - Piano di Riabilitazione n.3

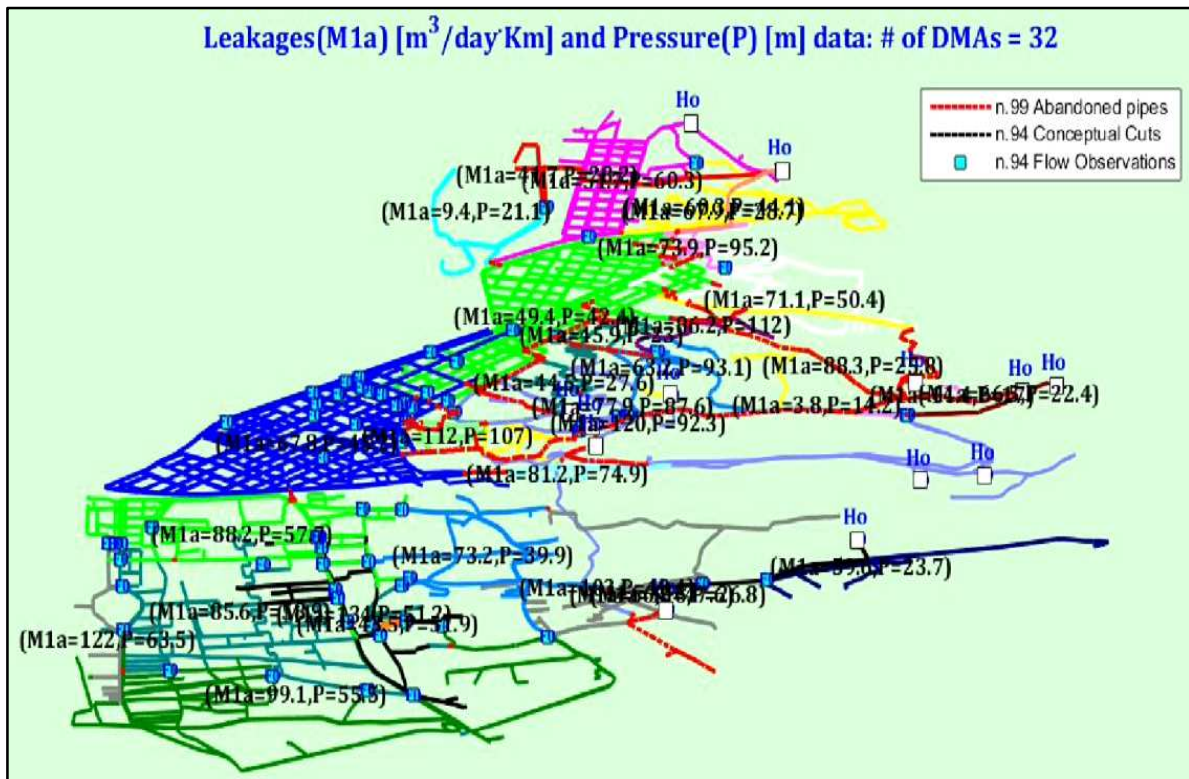


Fig.134. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo M1a nei DMA - Piano di Riabilitazione n.3

5.8.4. PIANO DI RIABILITAZIONE N.4

Il **Piano di Riabilitazione n.4** di progetto è stato predisposto imponendo un costo di intervento pari al **8%** del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria ed utilizzando un criterio di scelta delle tubazioni da sostituire che restituisca la maggiore *efficienza* in termini di rapporto tra le perdite lineari (parametro *M1a* della singola condotta sostituita) e costo di sostituzione della condotta stessa. Nel *Piano di Sostituzione n.4* sono state, pertanto, selezionate prioritariamente le condotte da sostituire che presentano un elevato valore di *perdite lineari M1a*, rapportato al costo di sostituzione della condotta stessa. Il *costo di sostituzione* della singola condotta da sostituire è stato calcolato come prodotto tra lunghezza specifica della condotta e *costo unitario di sostituzione* della stessa che è funzione del proprio *Diametro Nominale DN commerciale*. I risultati ottenuti dalla *distrettualizzazione idraulica* della rete di Reggio Calabria, riportati graficamente nelle figure a seguire, possono essere così sintetizzati:

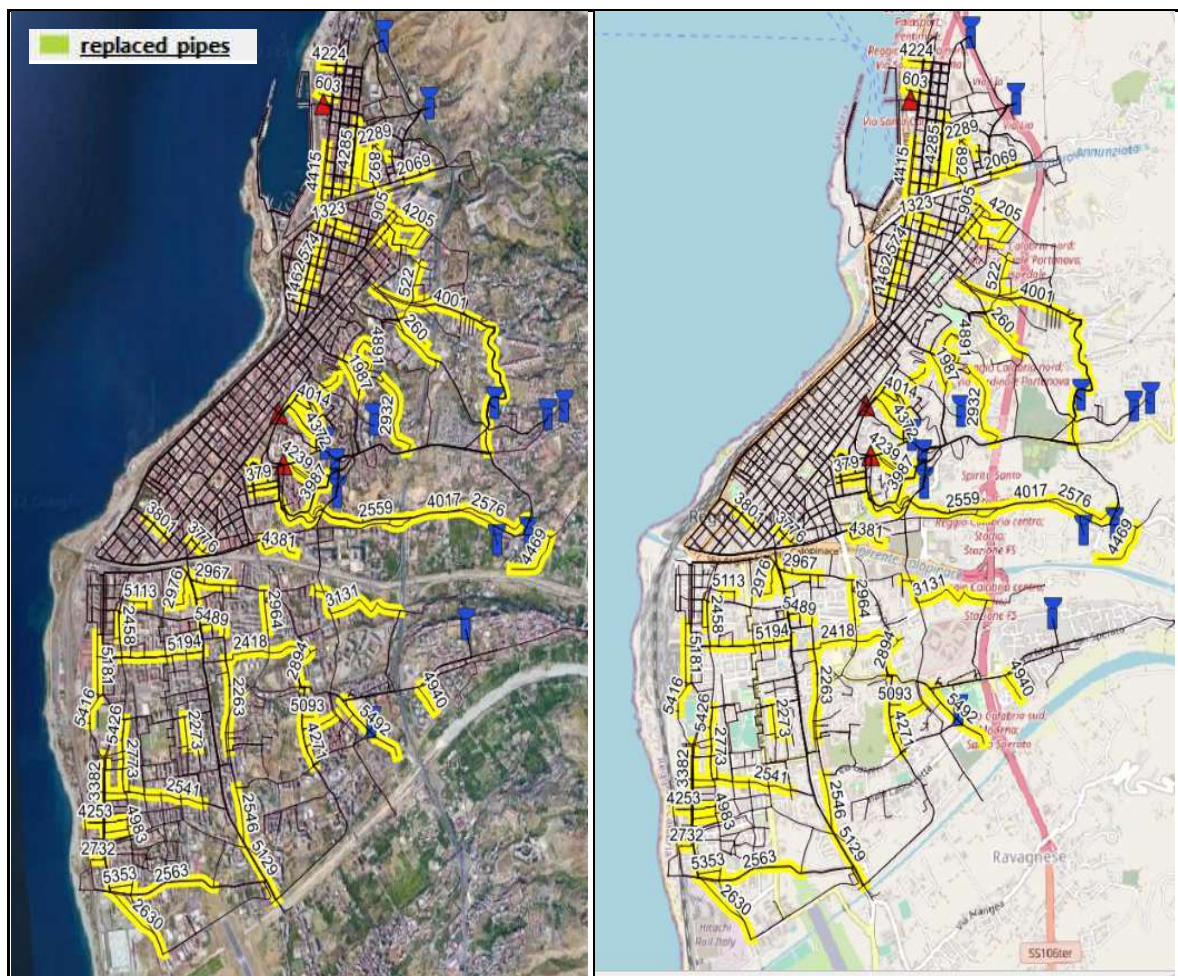


Fig.135. Stralcio Planimetrico delle condotte da sostituire - Piano di Riabilitazione n.4

PIANO DI RIABILITAZIONE N.4								
CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE	M1a	Perdite Volumetriche	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
Numero	Langhezza [km]	Costo [€]	MEDIA in rete [mt]	[mc/km/g]	[mc/g]	[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
95	25,742	7'425'622.00 €	54,10	67,12	21'406	17'758	6'481'670	45,34

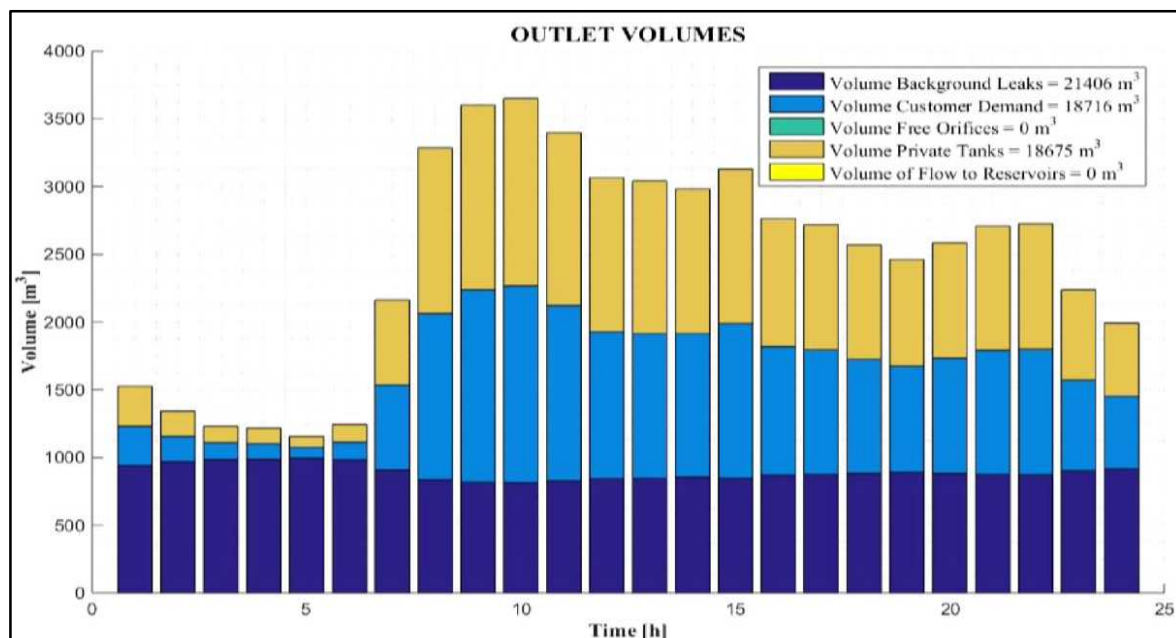


Fig.136. Componenti del pattern di della portata in ingresso - Piano di Riabilitazione n.4

- **Sostituzione di 95 condotte** sul totale complessivo di 7.869 tubazioni esistenti in rete;
- **Lunghezza totale di tubazioni sostituite pari a 25,742km** sul totale complessivo di 318,91km di tubazioni esistenti in rete;
- **Costo stimato** dei lavori previsti nel Piano di Riabilitazione n.4 pari ad **€.7.425.622,00**;
- **Riduzione della pressione media in rete** da 56,20mt nel funzionamento idraulico attuale della rete esistente, a **54,10mt** ottenuti nella configurazione di progetto;
- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a (perdite idriche lineari)** da un valore di $123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ ad un valore di $67,12 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete (Volume Background Leaks)** da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **21.406 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **17.758 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete** di risorsa idrica pari a circa **6.481.670mc**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **45,34%** rispetto alle perdite volumetriche stimate nel funzionamento attuale della rete.

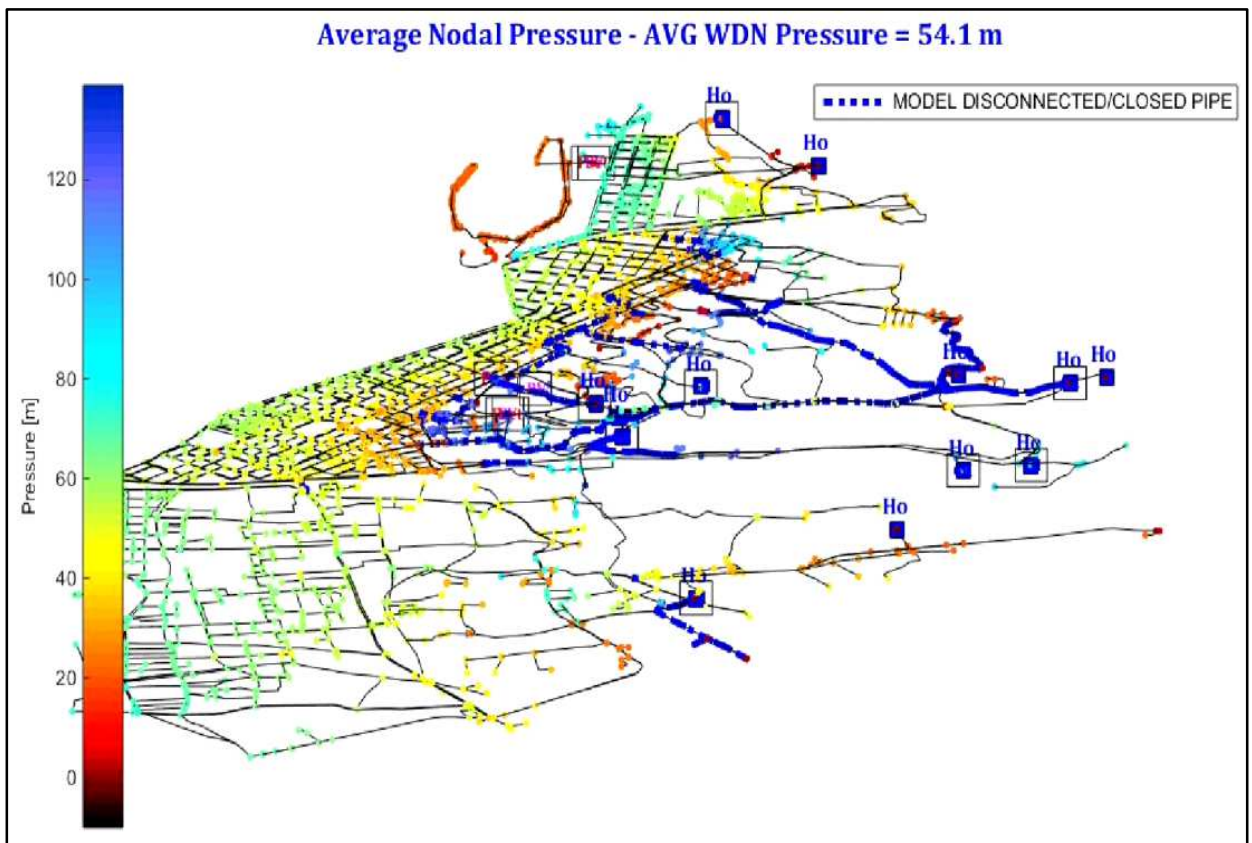


Fig.137. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria - Piano di Riabilitazione n.4

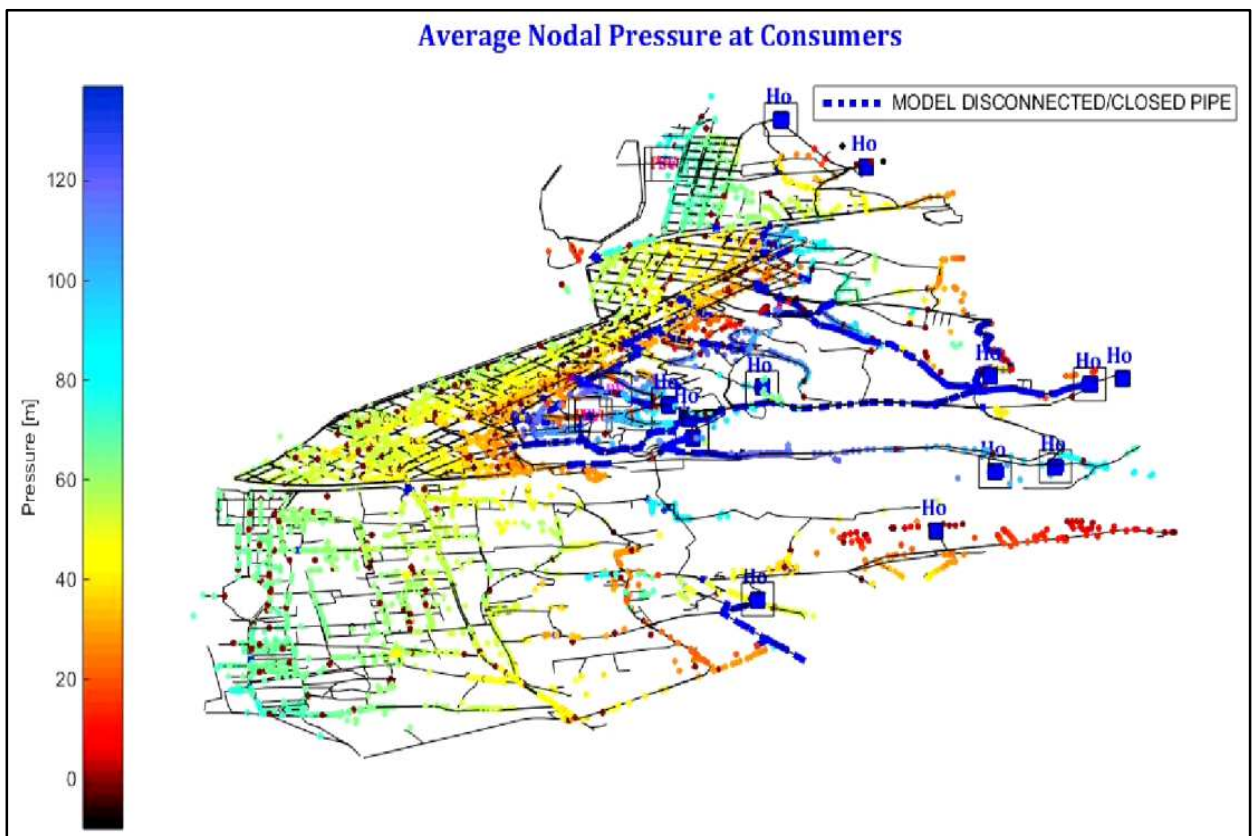


Fig.138. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Piano di Riabilitazione n.4

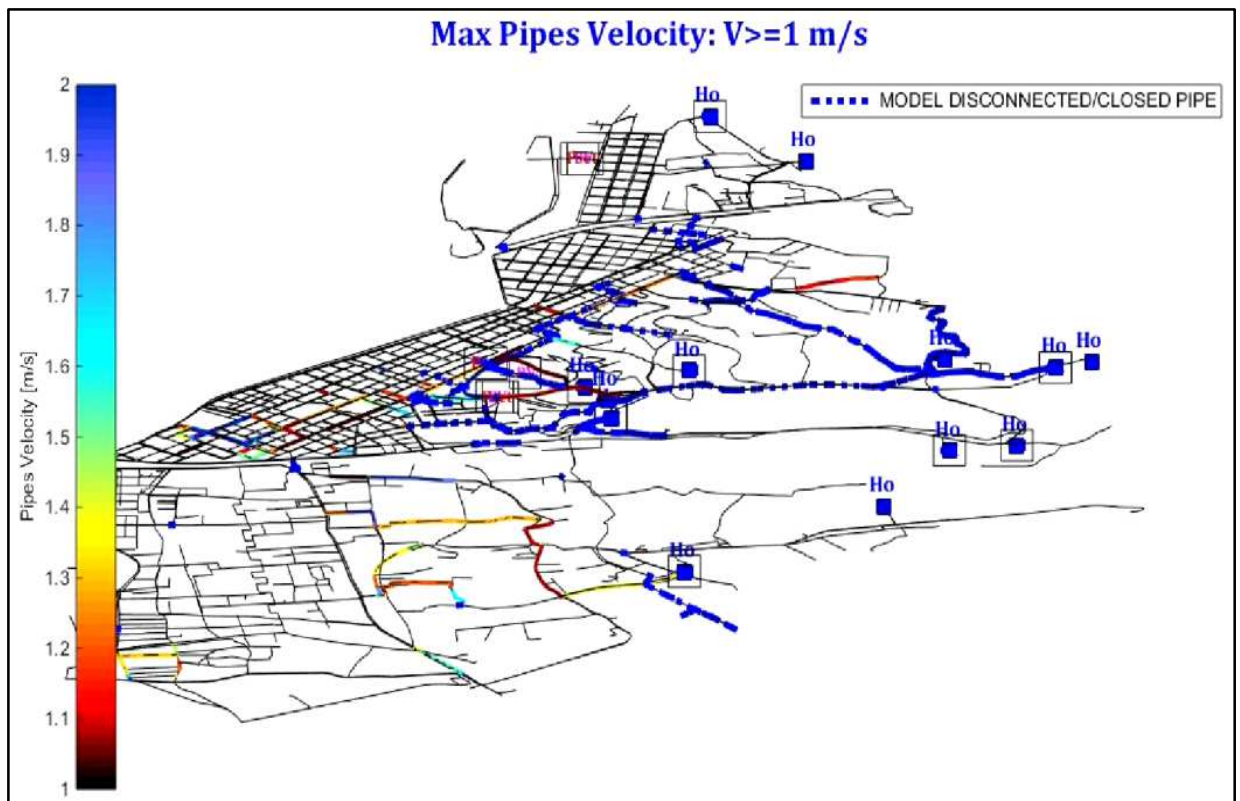


Fig.139. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.4

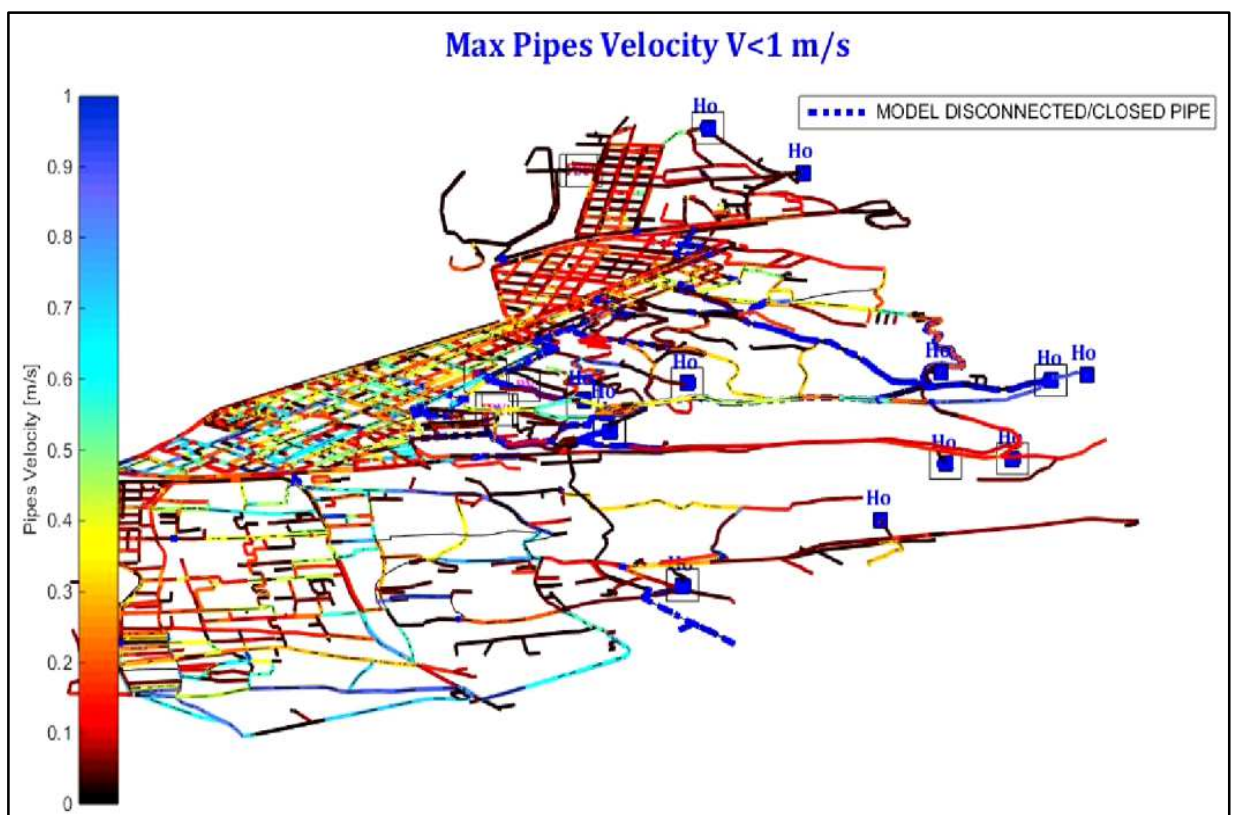


Fig.140. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.4

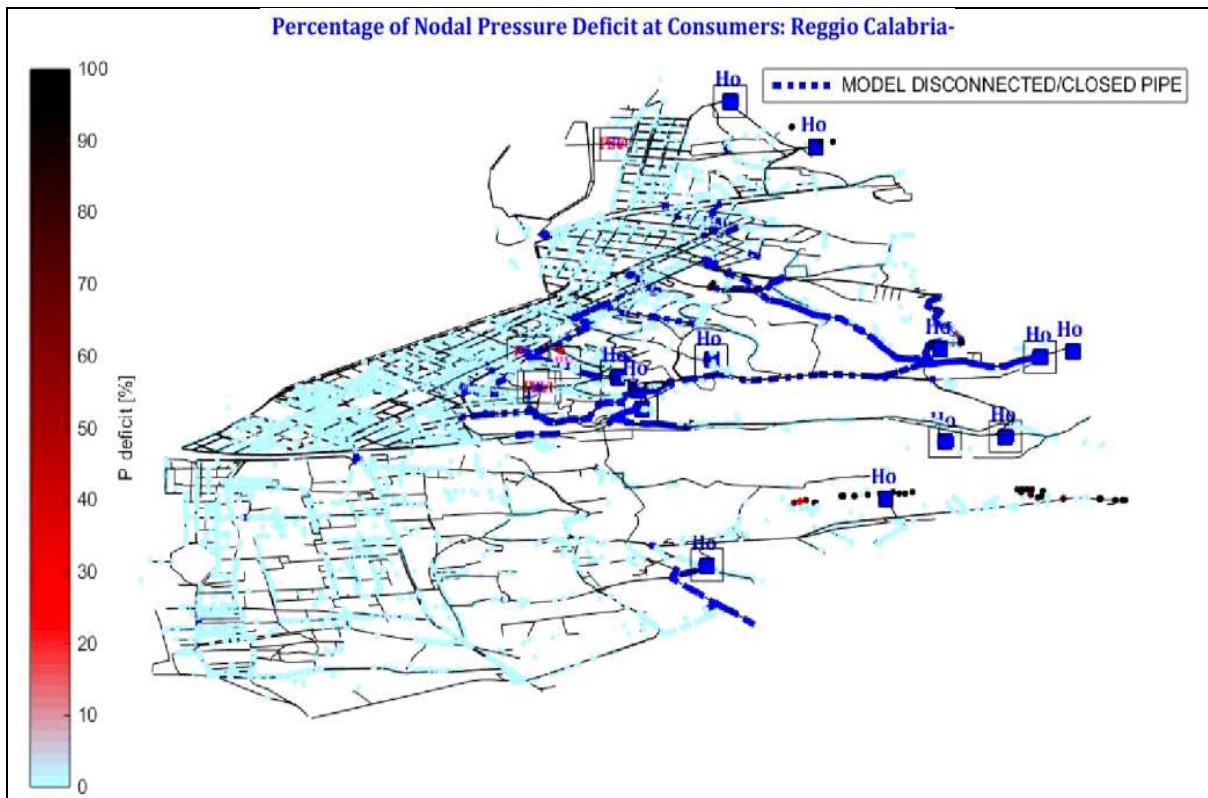


Fig.141. Percentuale UtENZE in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.4

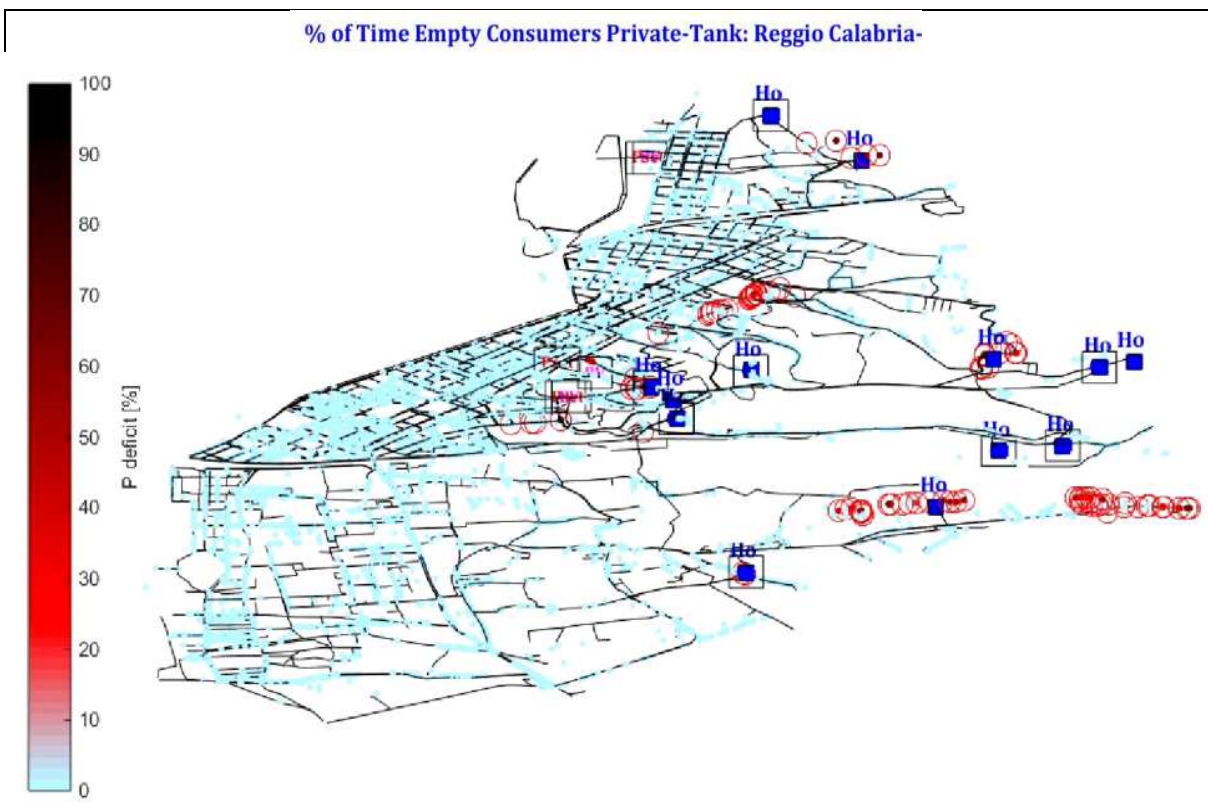


Fig.142. Percentuale di tempo singole UtENZE in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.4

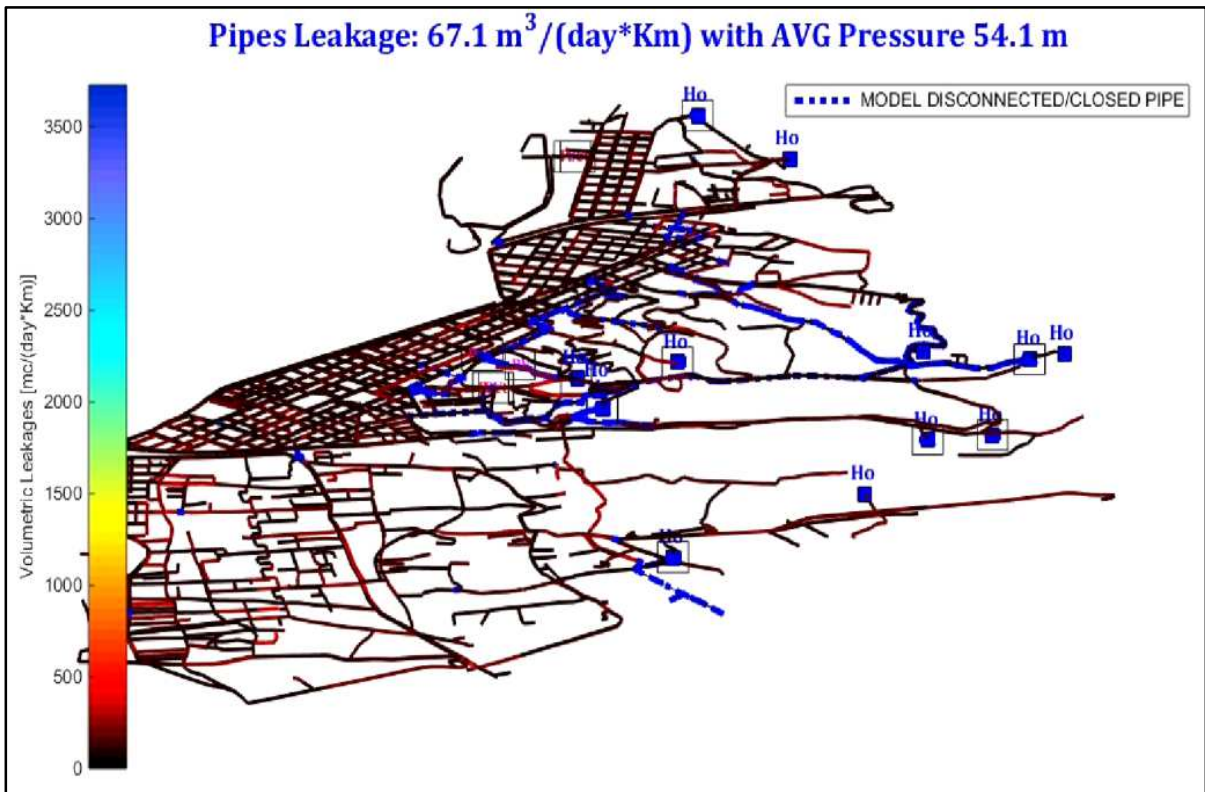


Fig.143. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo Macroindicatore M1a - Piano di Riabilitazione n.4

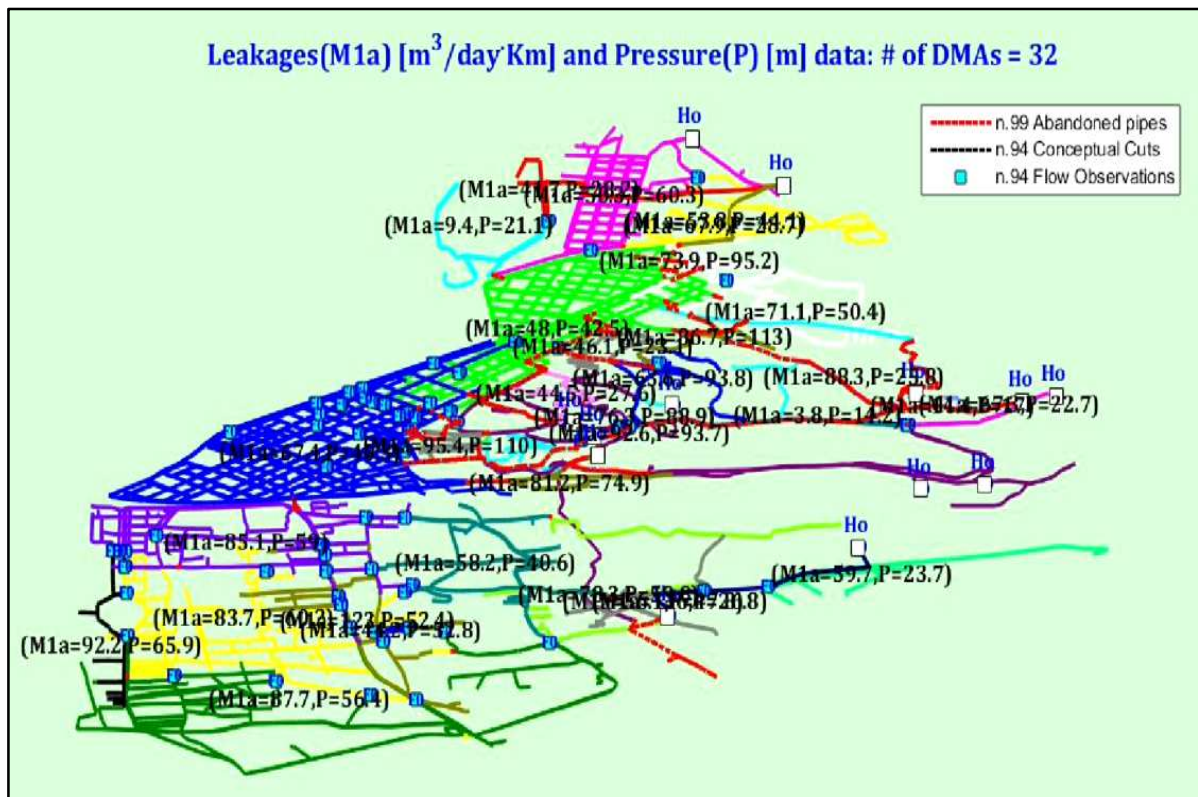


Fig.144. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo M1a nei DMA - Piano di Riabilitazione n.4

5.8.5. PIANO DI RIABILITAZIONE N.5

Il **Piano di Riabilitazione n.5** di progetto è stato predisposto imponendo un costo di intervento pari al **10%** del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria ed utilizzando un criterio di scelta delle tubazioni da sostituire che restituisca la maggiore *efficienza* in termini di rapporto tra le perdite lineari (parametro *M1a* della singola condotta sostituita) e costo di sostituzione della condotta stessa. Nel *Piano di Sostituzione n.5* sono state, pertanto, selezionate prioritariamente le condotte da sostituire che presentano un elevato valore di *perdite lineari M1a*, rapportato al costo di sostituzione della condotta stessa. Il *costo di sostituzione* della singola condotta da sostituire è stato calcolato come prodotto tra lunghezza specifica della condotta e *costo unitario di sostituzione* della stessa che è funzione del proprio *Diametro Nominale DN commerciale*. I risultati ottenuti dalla *distrettualizzazione idraulica* della rete di Reggio Calabria, riportati graficamente nelle figure a seguire, possono essere così sintetizzati:

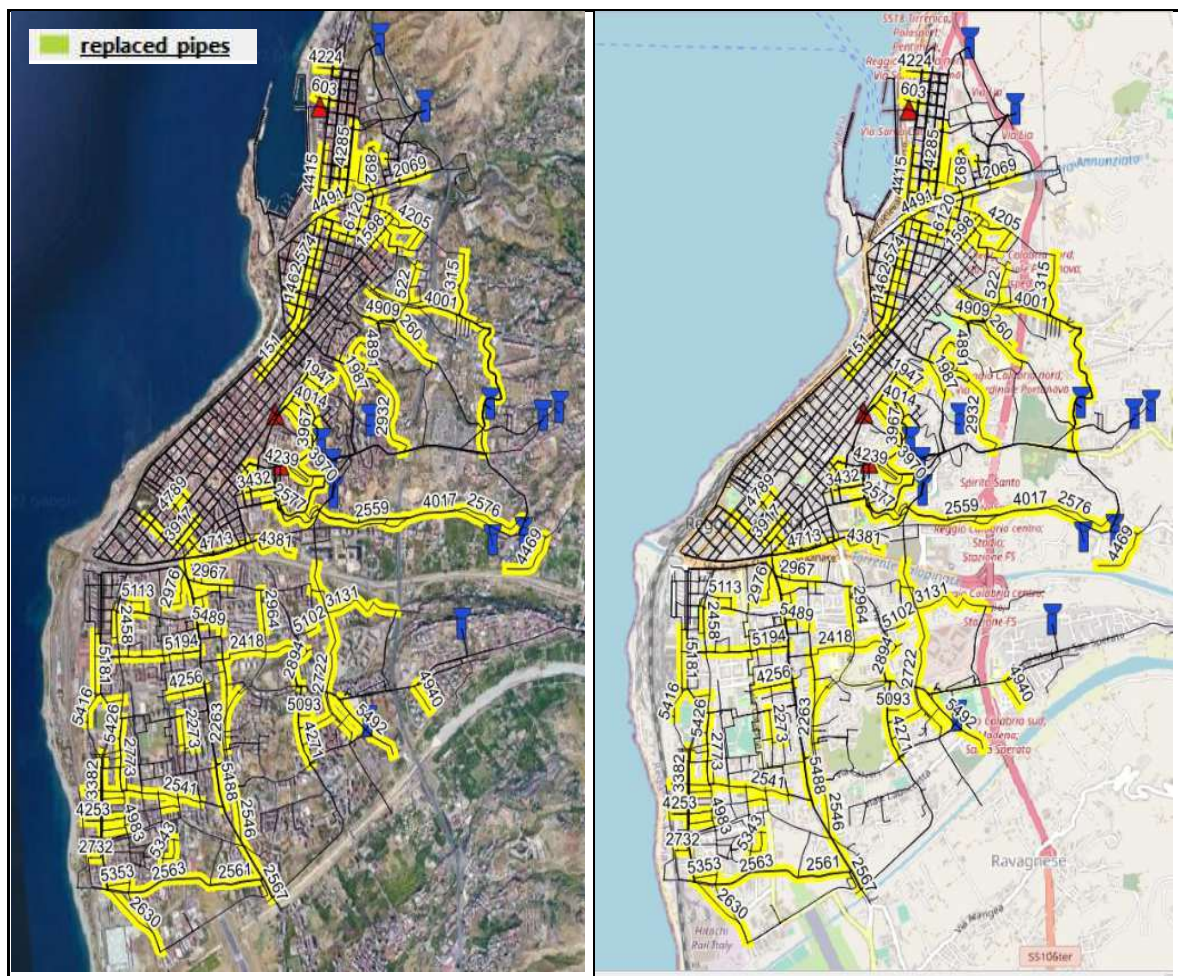


Fig.145. Stralcio Planimetrico delle condotte da sostituire - Piano di Riabilitazione n.5

PIANO DI RIABILITAZIONE N.5								
CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE MEDIA in rete [mt]	M1a [mc/km/g]	Perdite Volumetriche [mc/g]	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
Numero	Lunghezza [km]	Costo [€]				[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
129	32,288	9'276'708.00 €	54,70	62,24	19'856	19'308	7'047'420	49,30

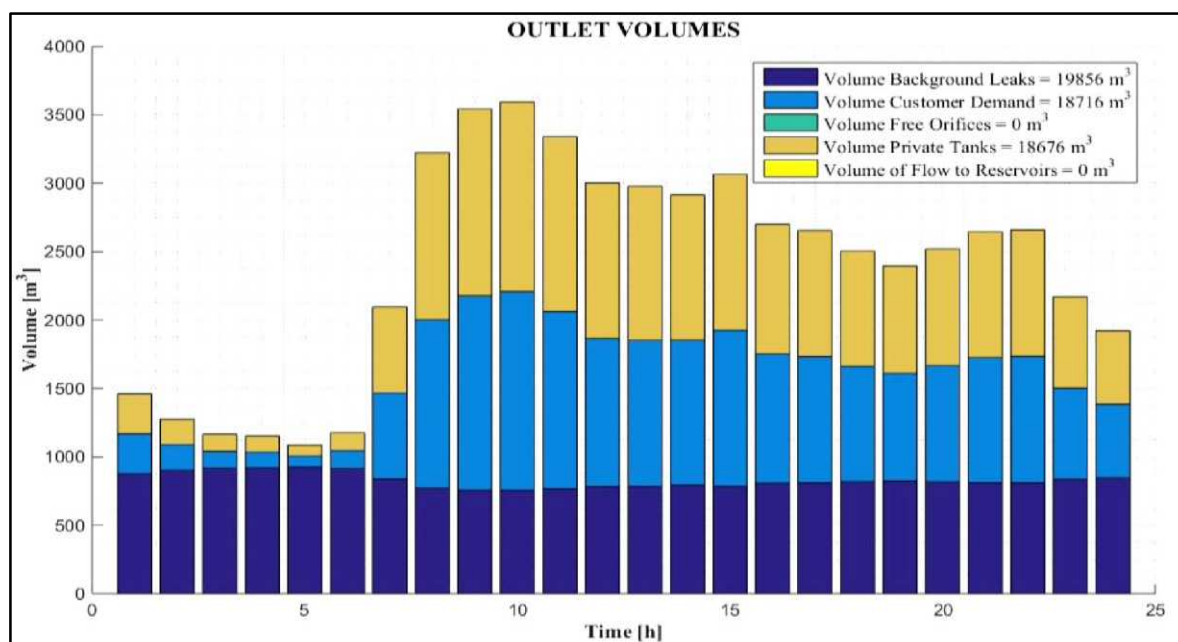


Fig.146. Componenti del pattern di della portata in ingresso - Piano di Riabilitazione n.5

- **Sostituzione di 129 condotte** sul totale complessivo di 7.869 tubazioni esistenti in rete;
- **Lunghezza totale di tubazioni sostituite pari a 32,288km** sul totale complessivo di 318,91km di tubazioni esistenti in rete;
- **Costo stimato** dei lavori previsti nel Piano di Riabilitazione n.5 pari ad **€.9.276.708,00**;
- **Riduzione della pressione media in rete** da 56,20mt nel funzionamento idraulico attuale della rete esistente, a **54,70mt** ottenuti nella configurazione di progetto;
- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a** (*perdite idriche lineari*) da un valore di $123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ ad un valore di $62,24 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete** (*Volume Background Leaks*) da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **19.856 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **19.308 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete** di risorsa idrica pari a circa **7.047.420mc**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **49,30%** rispetto alle perdite volumetriche stimate nel funzionamento attuale della rete.

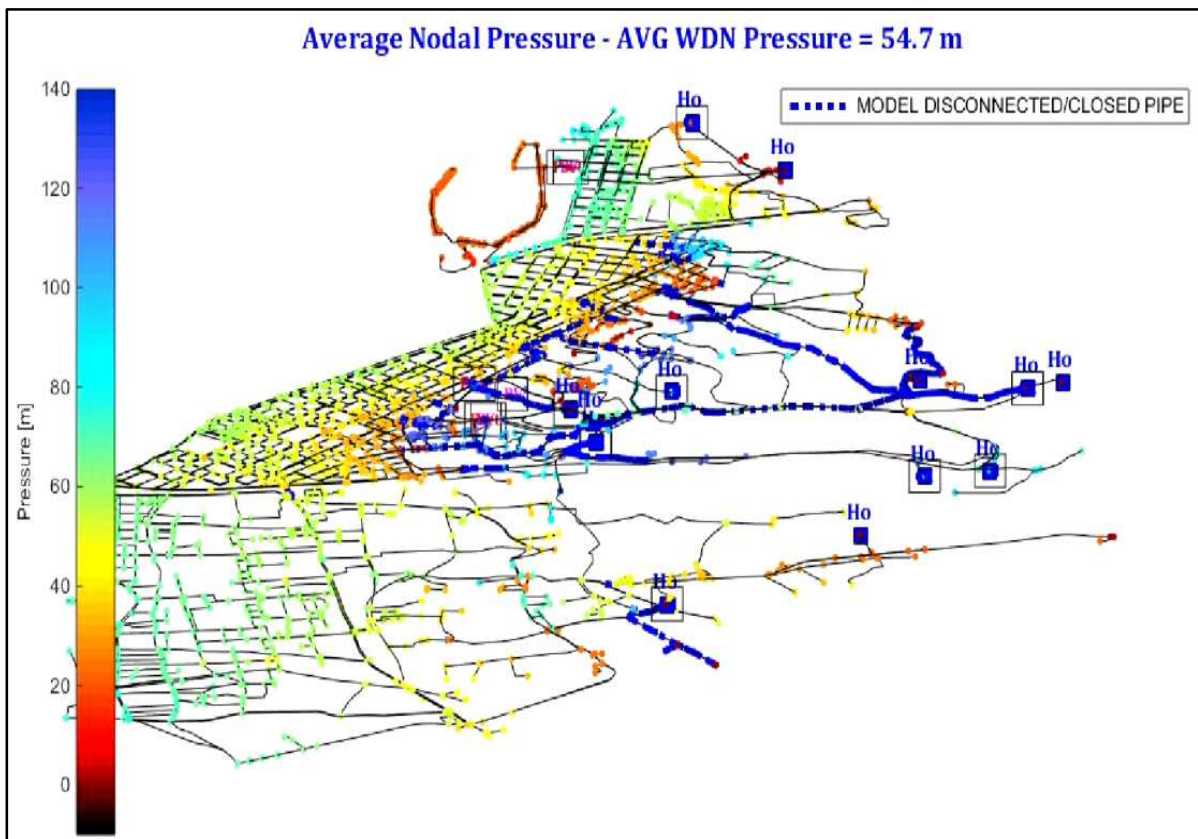


Fig.147. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria - Piano di Riabilitazione n.5

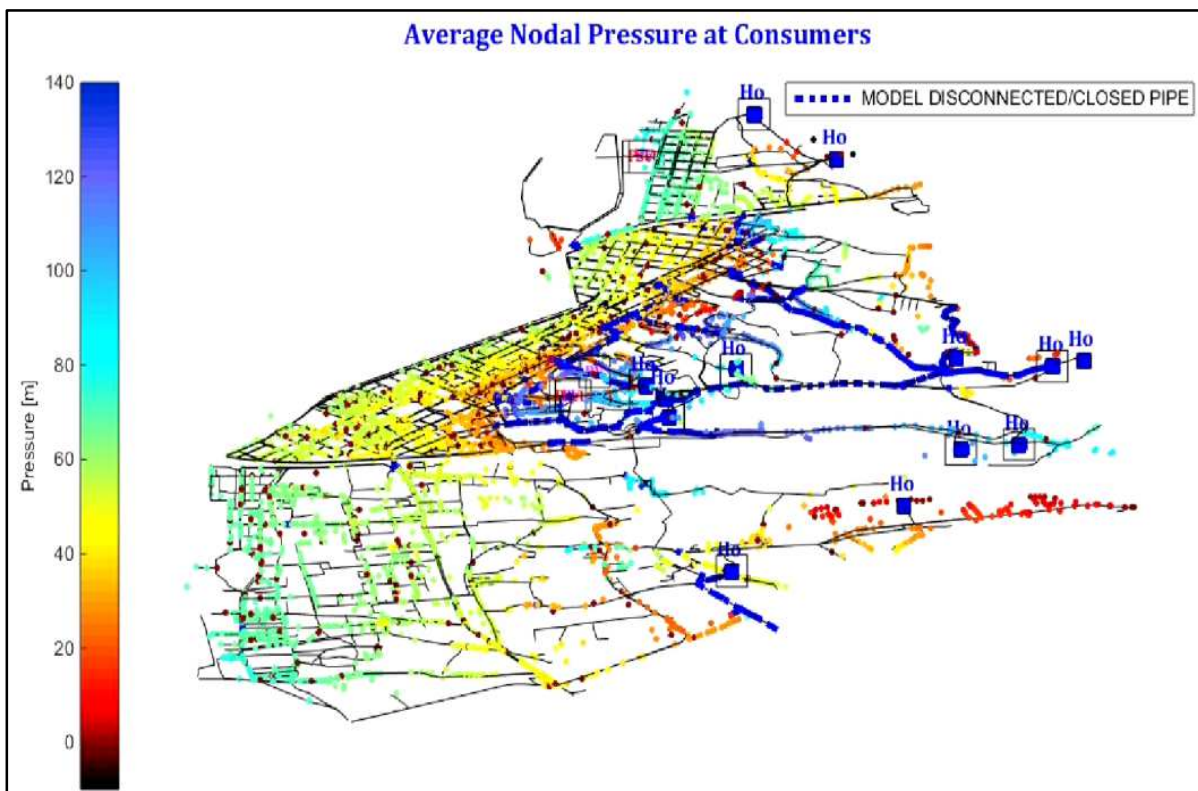


Fig.148. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Piano di Riabilitazione n.5

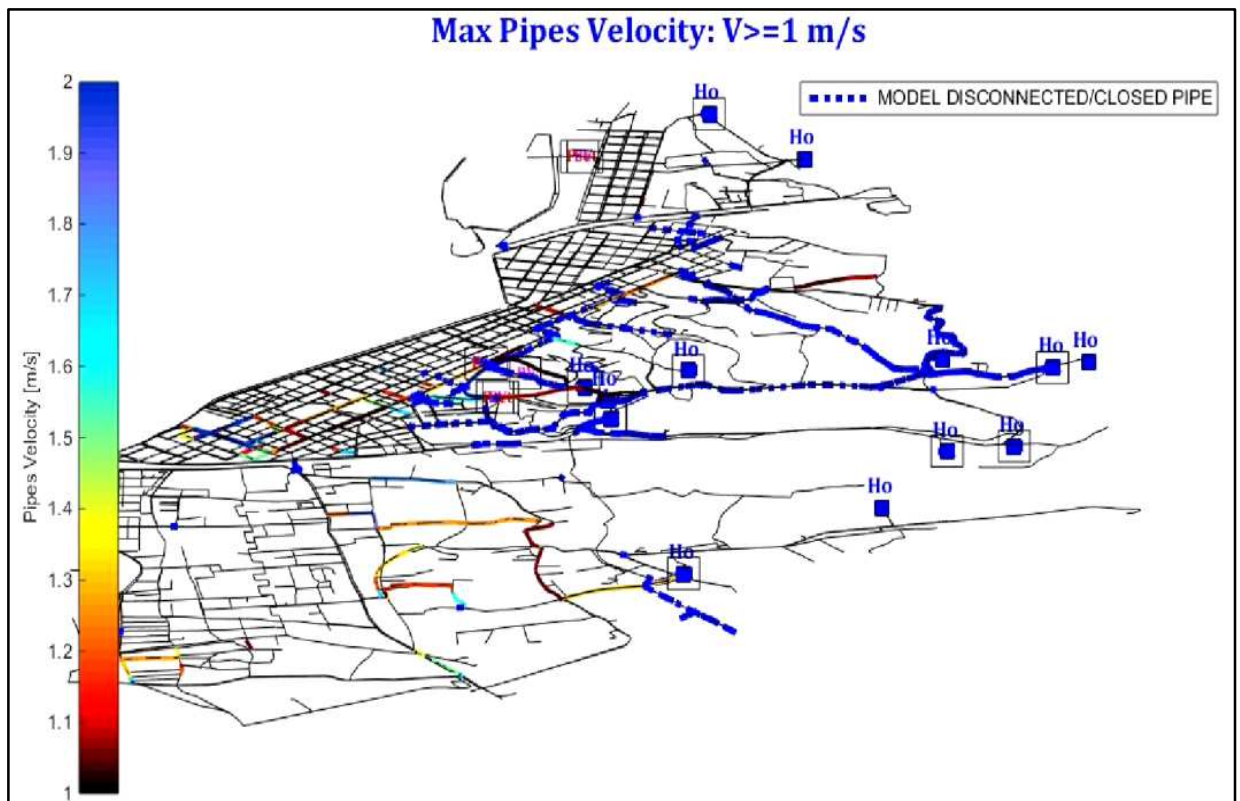


Fig.149. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.5

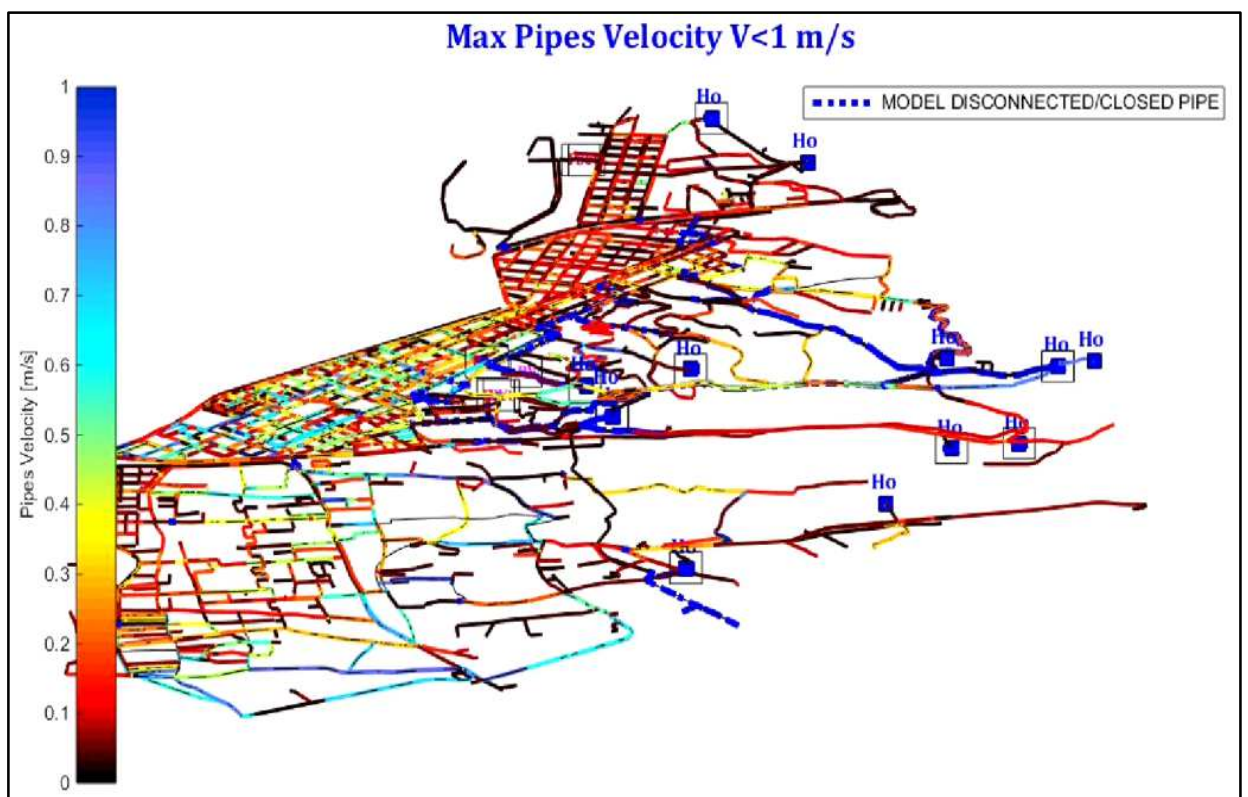


Fig.150. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.5

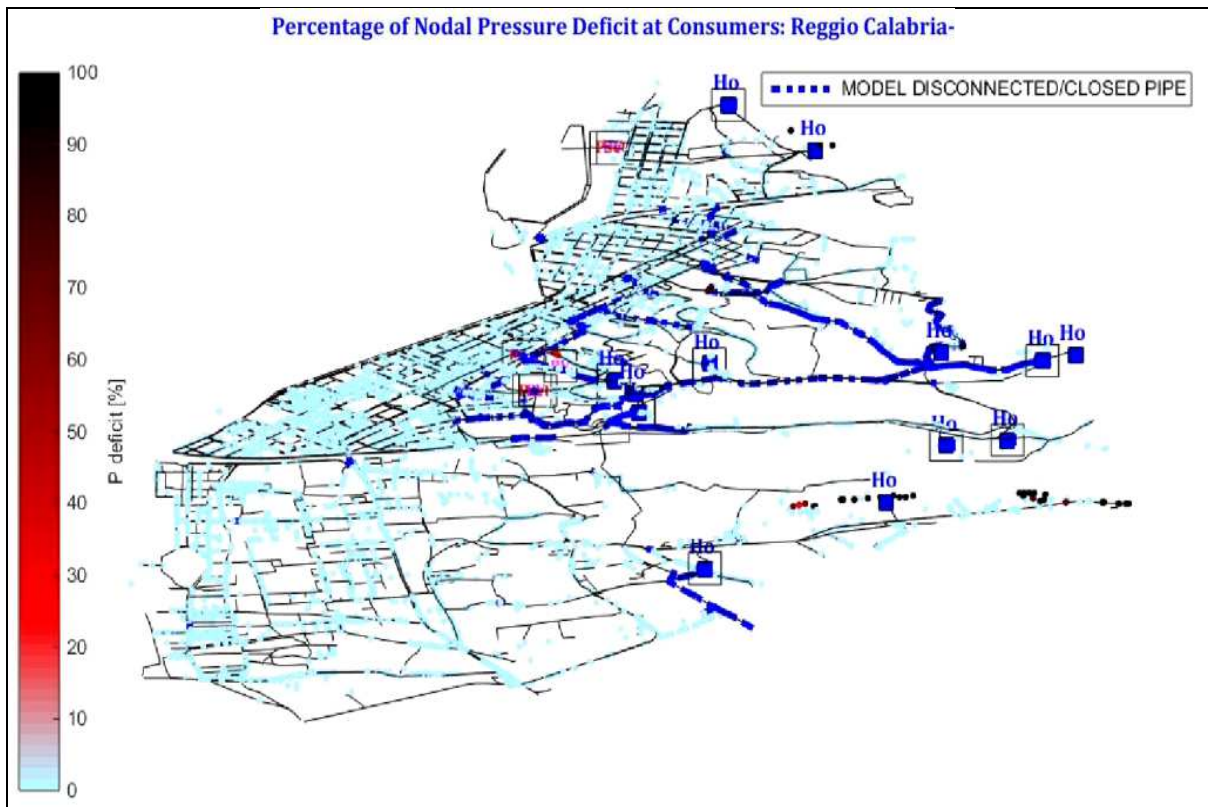


Fig.151. Percentuale Utenze in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.5

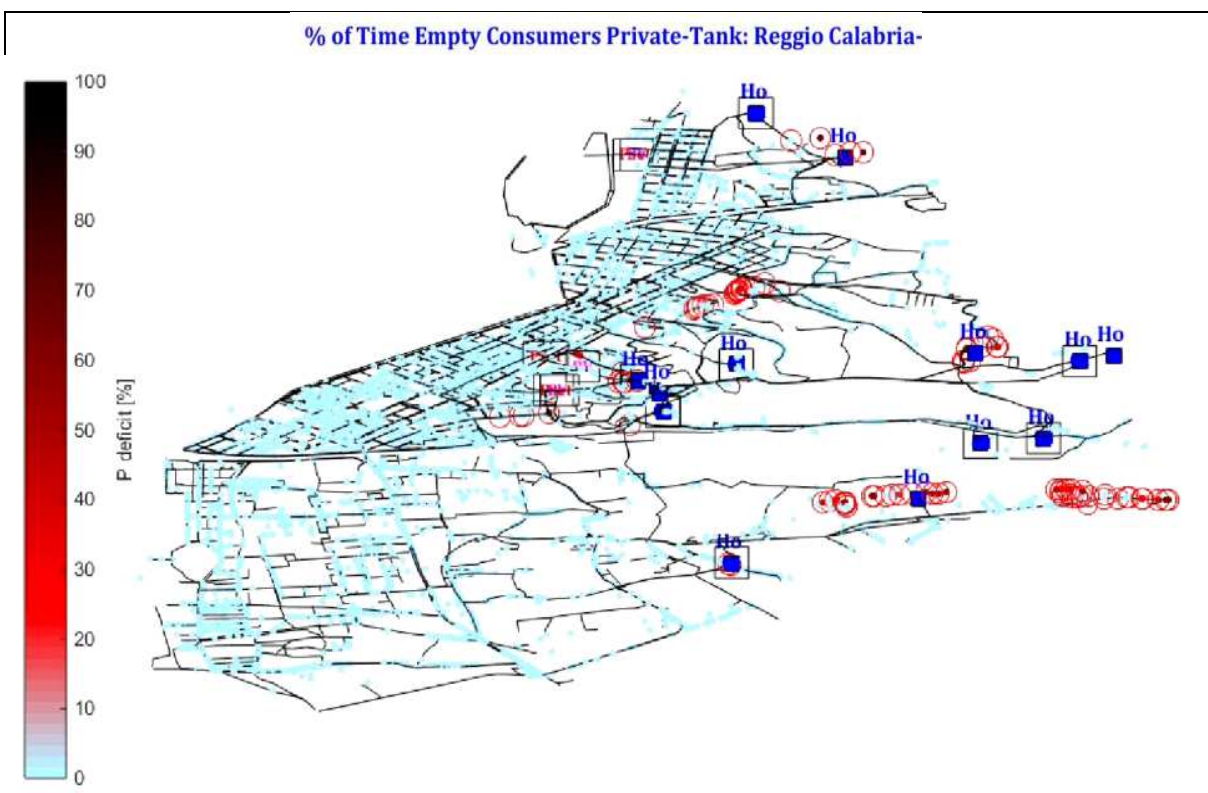


Fig.152. Percentuale di tempo singole Utenze in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.5

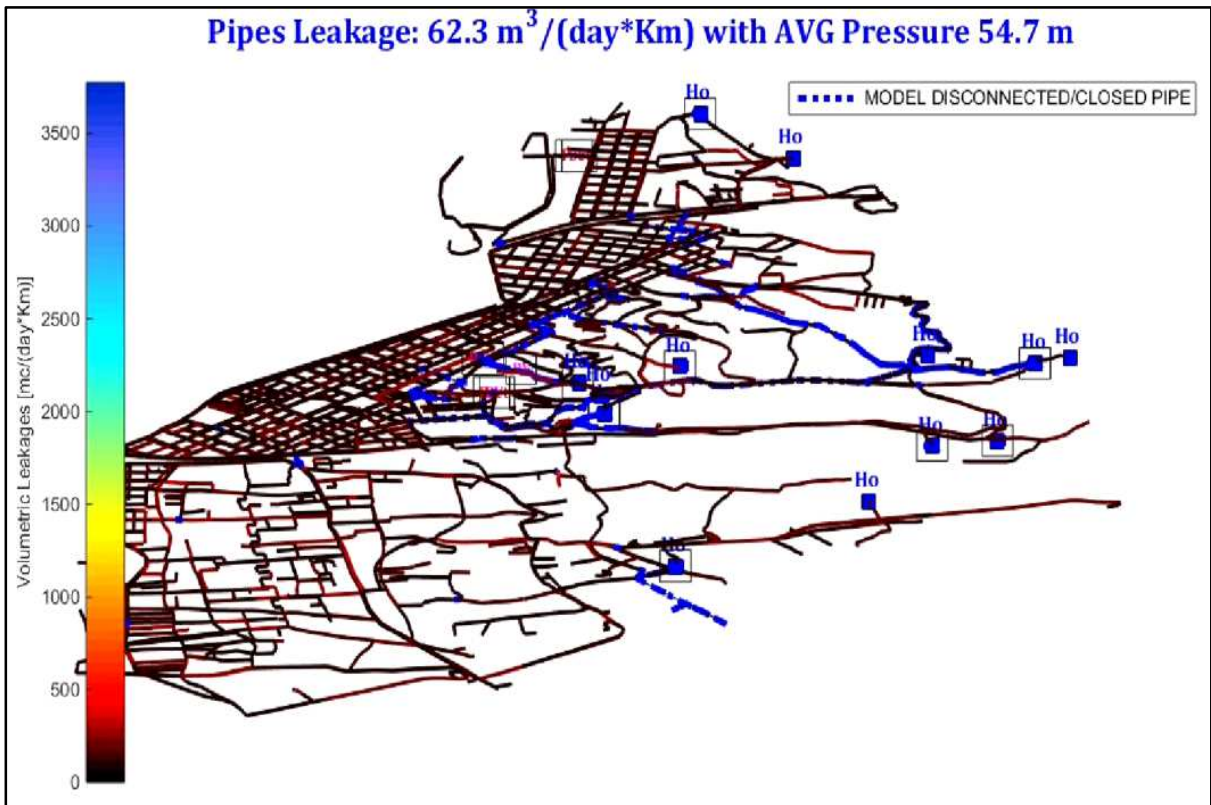


Fig.153. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo Macroindicatore M1a - Piano di Riabilitazione n.5

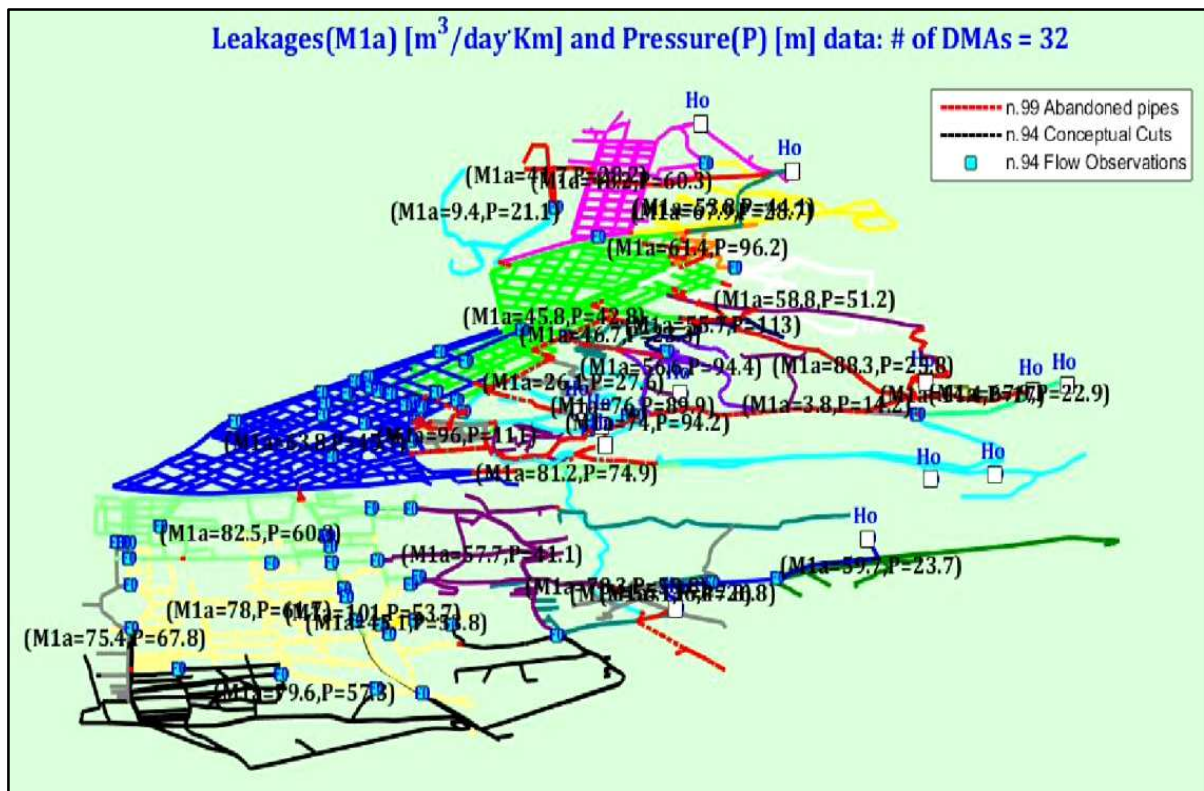


Fig.154. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo M1a nei DMA - Piano di Riabilitazione n.5

5.8.6. PIANO DI RIABILITAZIONE N.6

Il **Piano di Riabilitazione n.6** di progetto è stato predisposto imponendo un costo di intervento pari al **12%** del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria ed utilizzando un criterio di scelta delle tubazioni da sostituire che restituisca la maggiore *efficienza* in termini di rapporto tra le perdite lineari (parametro *M1a* della singola condotta sostituita) e costo di sostituzione della condotta stessa. Nel *Piano di Sostituzione n.6* sono state, pertanto, selezionate prioritariamente le condotte da sostituire che presentano un elevato valore di *perdite lineari M1a*, rapportato al costo di sostituzione della condotta stessa. Il *costo di sostituzione* della singola condotta da sostituire è stato calcolato come prodotto tra lunghezza specifica della condotta e *costo unitario di sostituzione* della stessa che è funzione del proprio *Diametro Nominale DN commerciale*. I risultati ottenuti dalla *distrettualizzazione idraulica* della rete di Reggio Calabria, riportati graficamente nelle figure a seguire, possono essere così sintetizzati:

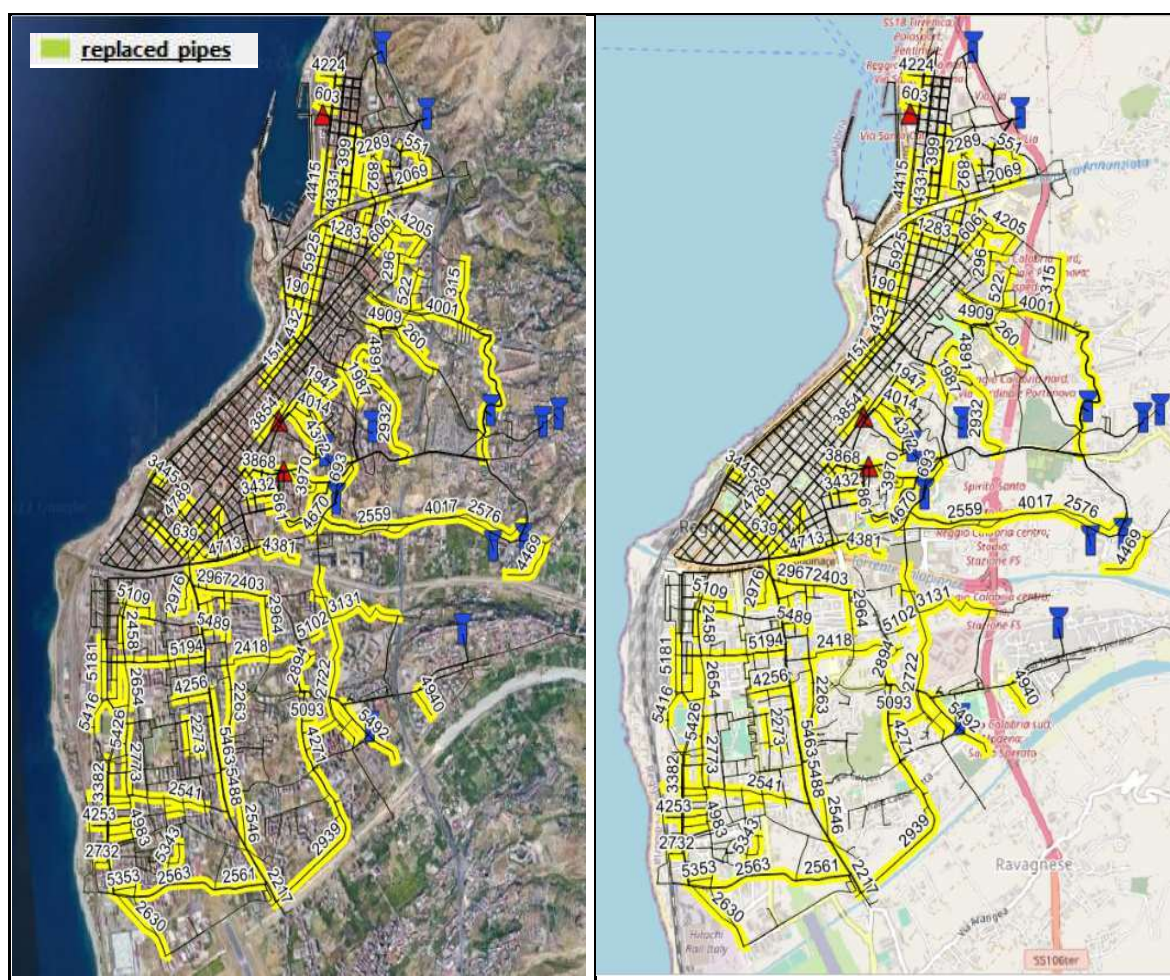


Fig.155. Stralcio Planimetrico delle condotte da sostituire - Piano di Riabilitazione n.6

PIANO DI RIABILITAZIONE N.6								
CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE MEDIA in rete [mt]	M1a [mc/km/g]	Perdite Volumetriche [mc/g]	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
Numero	Lunghezza [km]	Costo [€]				[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
157	38,310	11'110'653.00 €	55,10	58,18	18'555	20'609	7'522'285	52,62

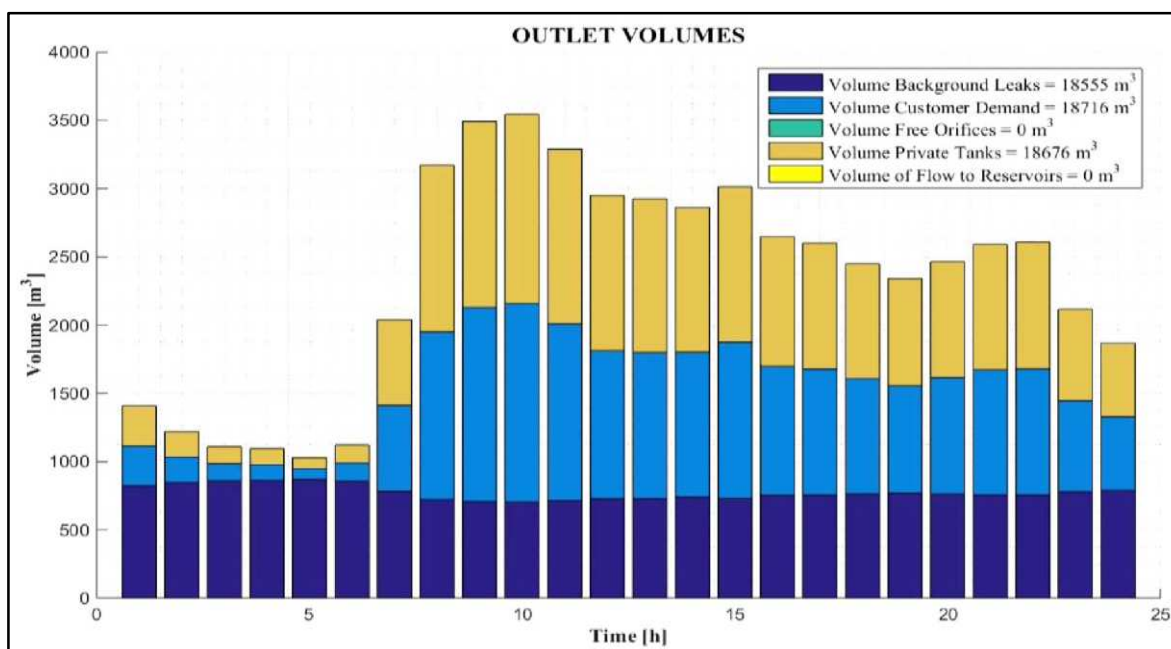


Fig.156. Componenti del pattern di della portata in ingresso - Piano di Riabilitazione n.6

- **Sostituzione di 157 condotte** sul totale complessivo di 7.869 tubazioni esistenti in rete;
- **Lunghezza totale di tubazioni sostituite pari a 38,310km** sul totale complessivo di 318,91km di tubazioni esistenti in rete;
- **Costo stimato** dei lavori previsti nel Piano Riabilitazione n.6 pari ad **€.11.110.653,00**;
- **Riduzione della pressione media in rete** da 56,20mt nel funzionamento idraulico attuale della rete esistente, a **55,10mt** ottenuti nella configurazione di progetto;
- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a** (*perdite idriche lineari*) da un valore di $123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ ad un valore di **$58,18 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$** ;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete** (*Volume Background Leaks*) da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **18.555 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **20.609 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete** di risorsa idrica pari a circa **7.522.285mc**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **52,62%** rispetto alle perdite volumetriche stimate nel funzionamento attuale della rete.

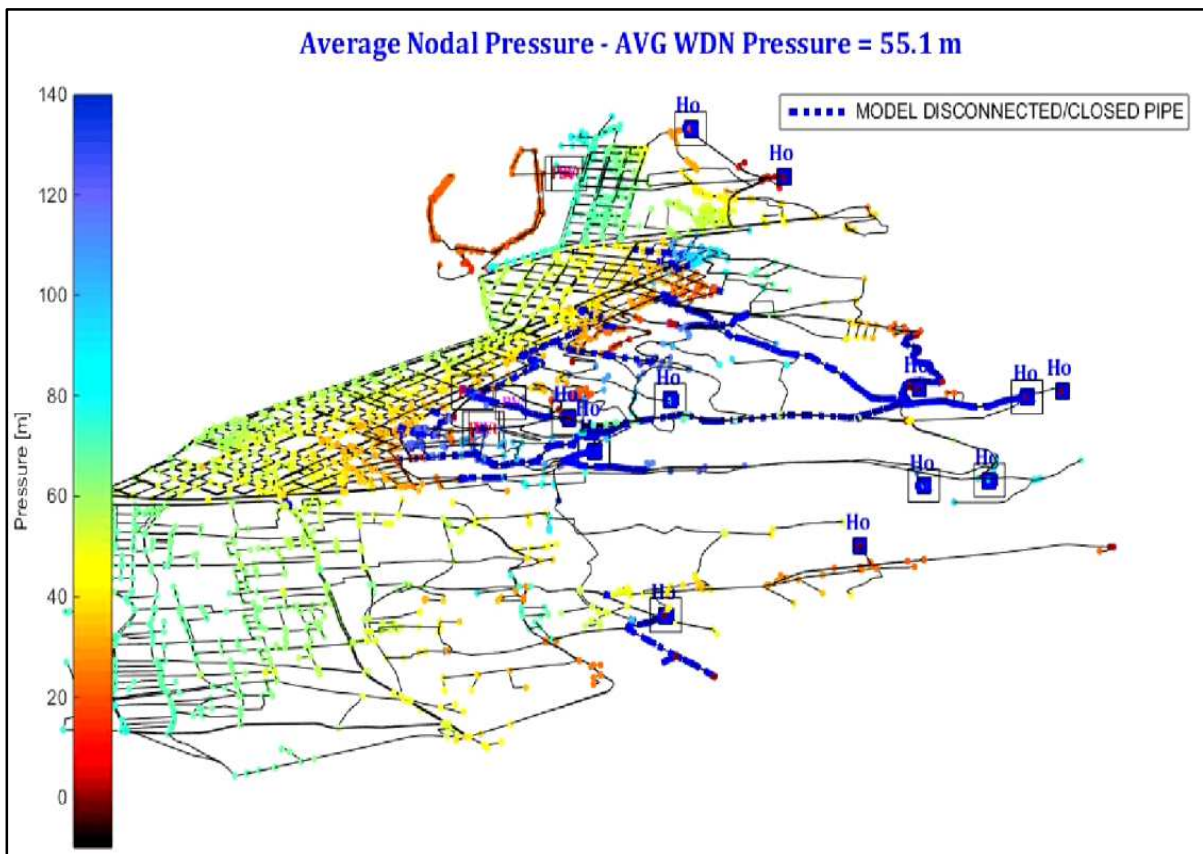


Fig.157. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria - Piano di Riabilitazione n.6

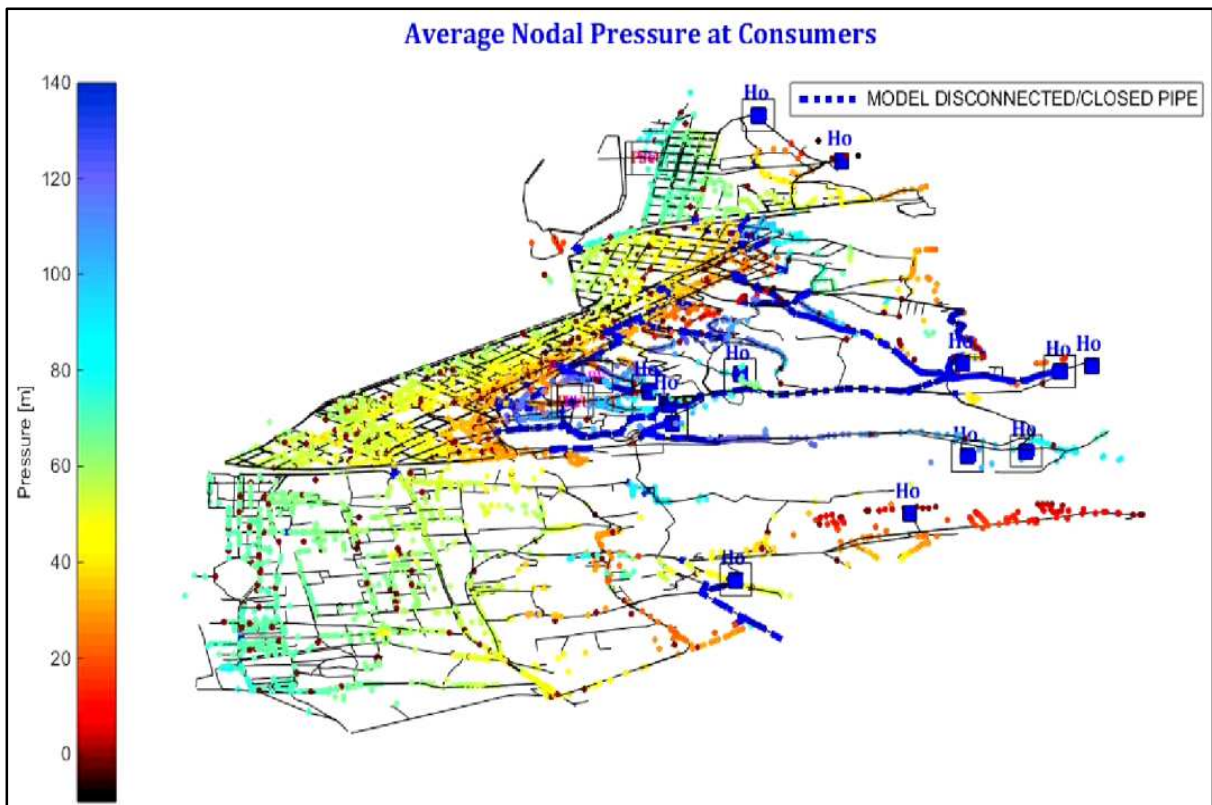


Fig.158. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Piano di Riabilitazione n.6

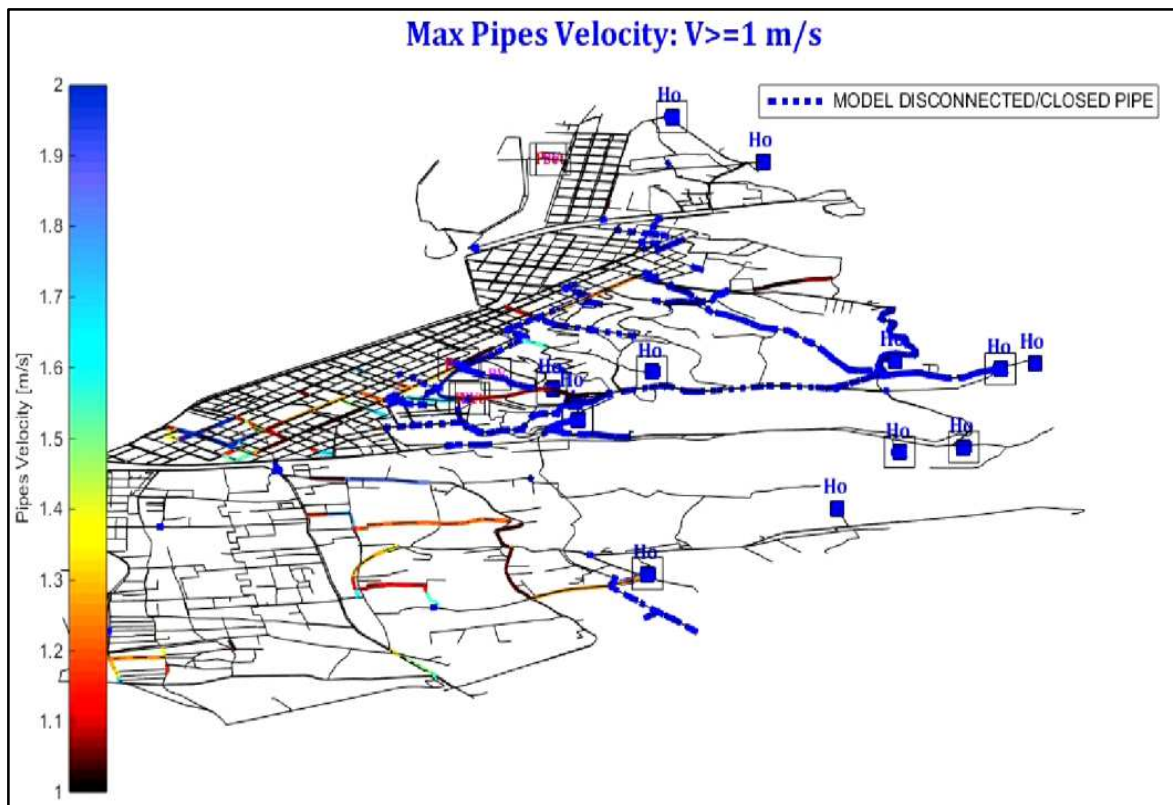


Fig.159. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.6

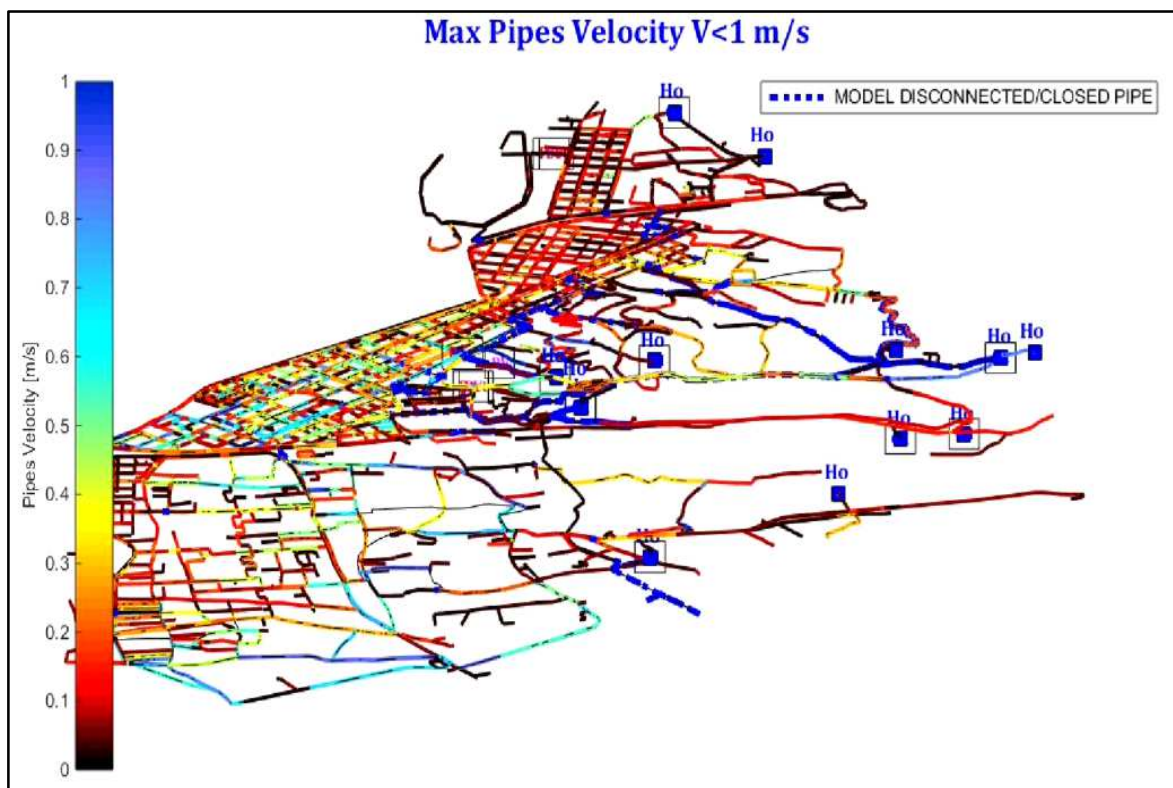


Fig.160. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.6

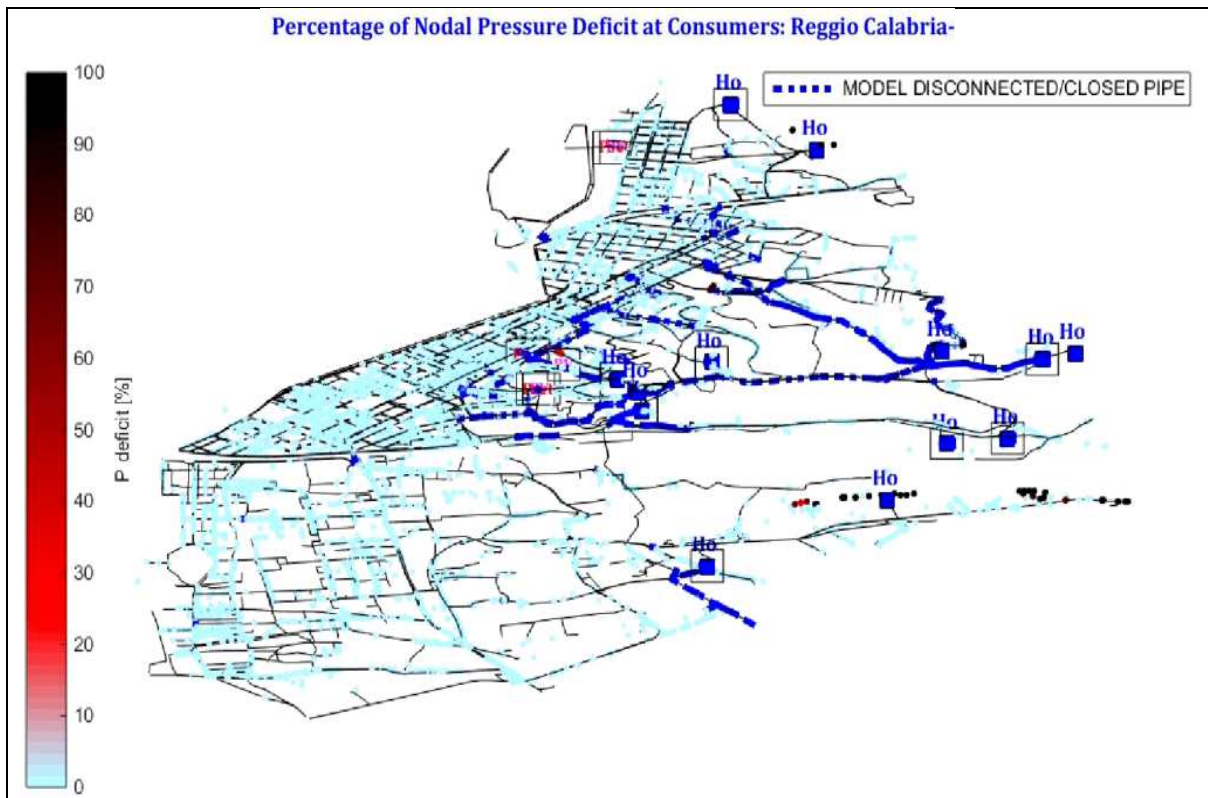


Fig.161. Percentuale UtENZE in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.6

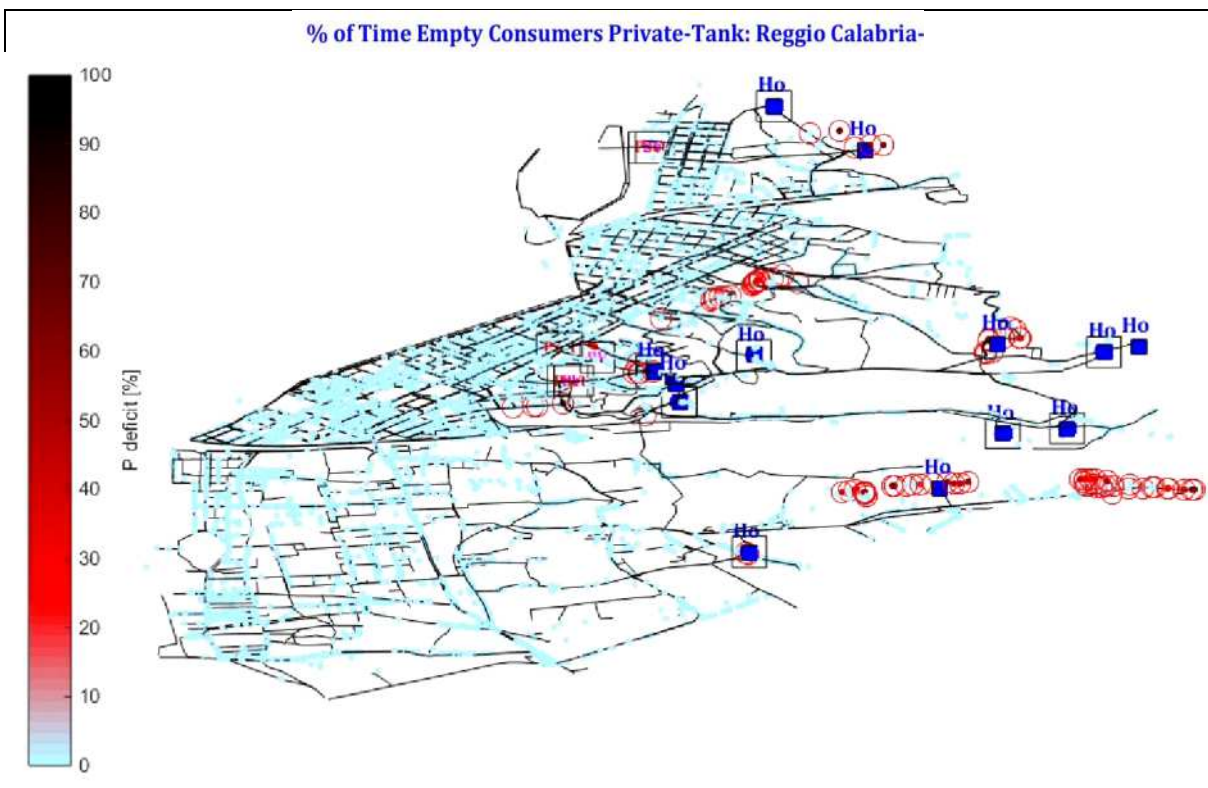


Fig.162. Percentuale di tempo singole UtENZE in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.6

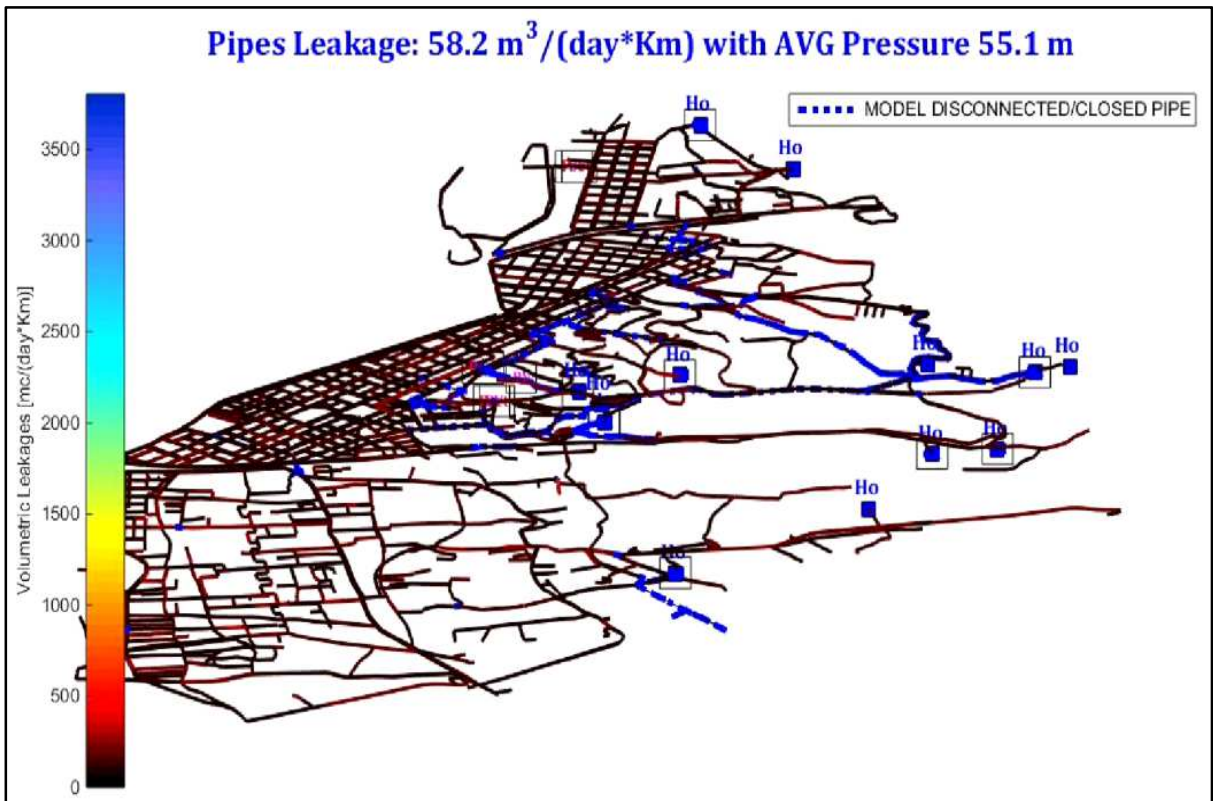


Fig.163. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo Macroindicatore M1a - Piano di Riabilitazione n.6

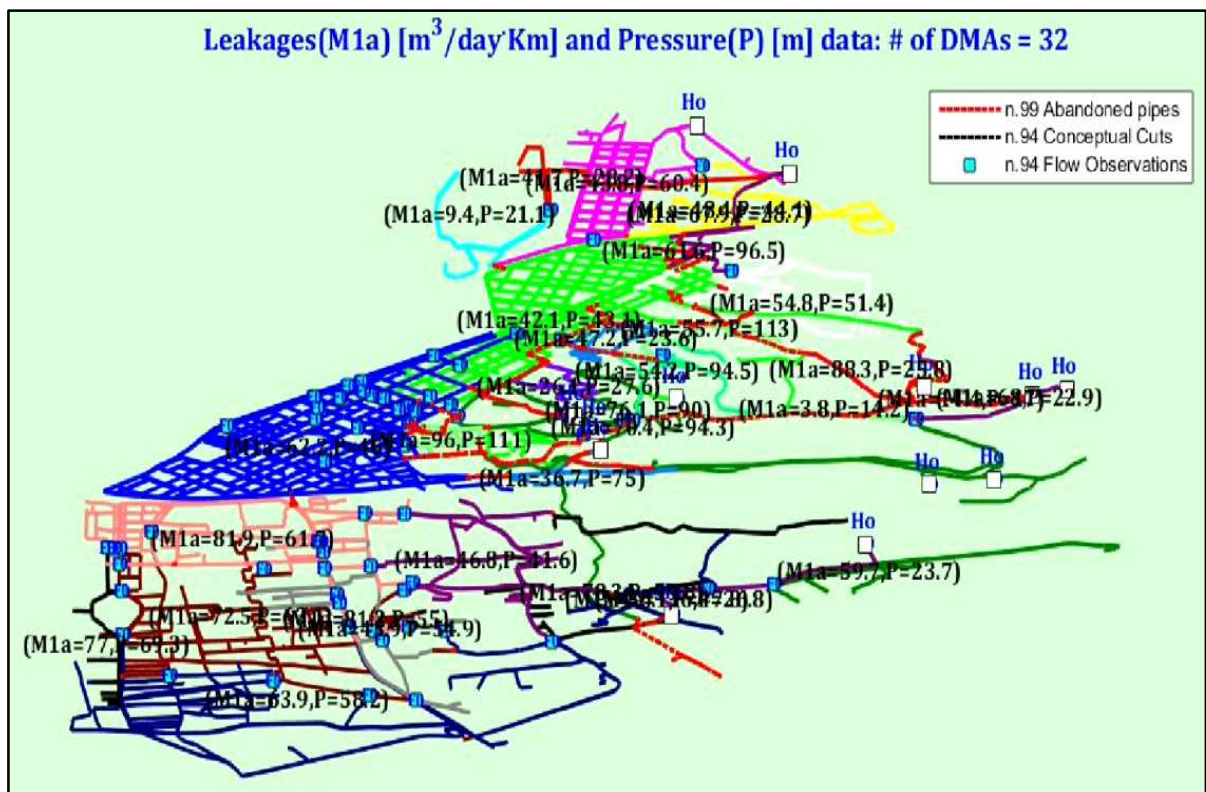


Fig.164. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo M1a nei DMA - Piano di Riabilitazione n.6

5.8.7. PIANO DI RIABILITAZIONE N.7

Il **Piano di Riabilitazione n.7** di progetto è stato predisposto imponendo un costo di intervento pari al **14%** del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria ed utilizzando un criterio di scelta delle tubazioni da sostituire che restituisca la maggiore *efficienza* in termini di rapporto tra le perdite lineari (parametro *M1a* della singola condotta sostituita) e costo di sostituzione della condotta stessa. Nel *Piano di Sostituzione n.7* sono state, pertanto, selezionate prioritariamente le condotte da sostituire che presentano un elevato valore di *perdite lineari M1a*, rapportato al costo di sostituzione della condotta stessa. Il *costo di sostituzione* della singola condotta da sostituire è stato calcolato come prodotto tra lunghezza specifica della condotta e *costo unitario di sostituzione* della stessa che è funzione del proprio *Diametro Nominale DN commerciale*. I risultati ottenuti dalla *distrettualizzazione idraulica* della rete di Reggio Calabria, riportati graficamente nelle figure a seguire, possono essere così sintetizzati:

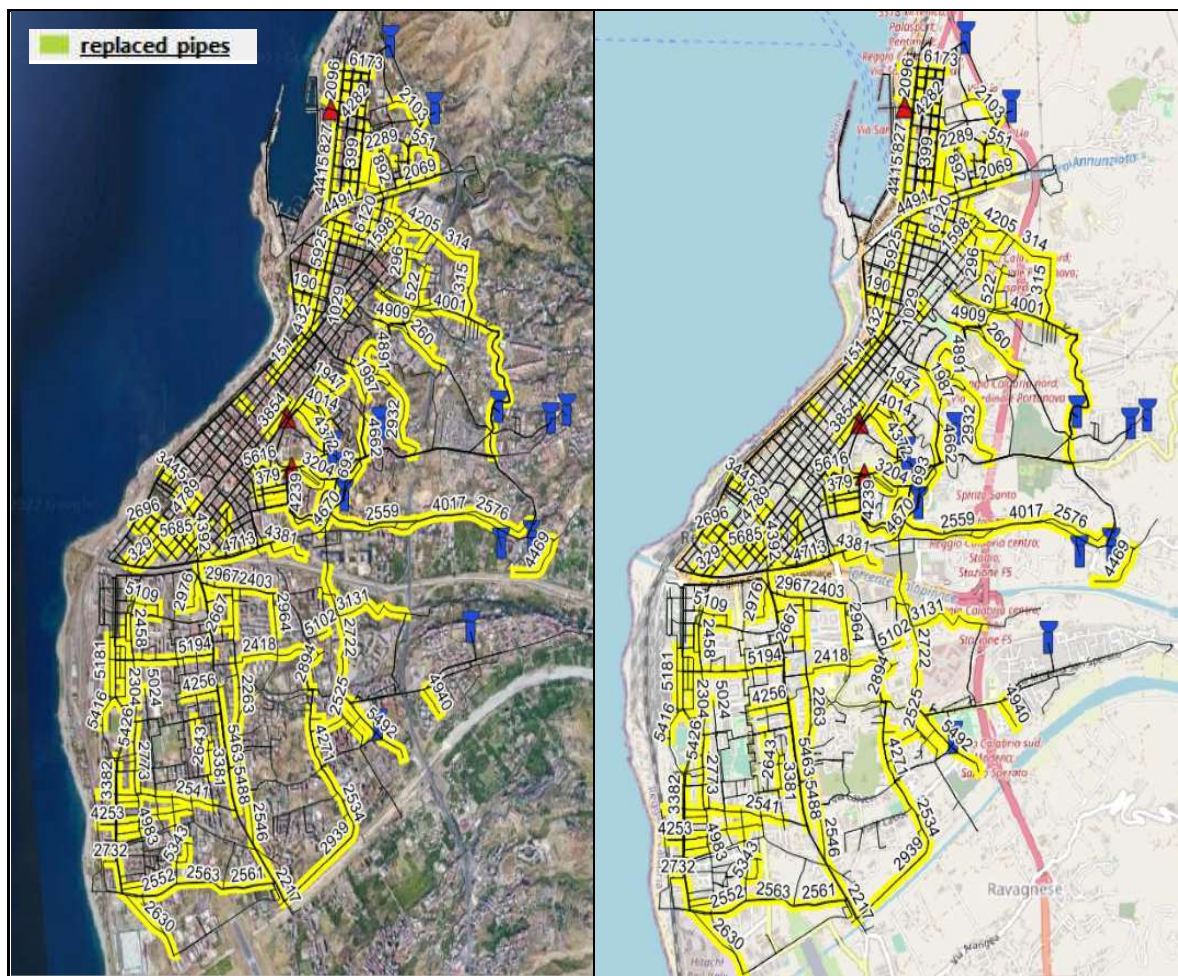


Fig.165. Stralcio Planimetrico delle condotte da sostituire - Piano di Riabilitazione n.7

PIANO DI RIABILITAZIONE N.7								
CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE MEDIA in rete [mt]	M1a [mc/km/g]	Perdite Volumetriche [mc/g]	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
Numero	Lunghezza [km]	Costo [€]				[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
210	44,785	12'962'372.00 €	55,40	54,62	17'420	21'744	7'936'560	55,52

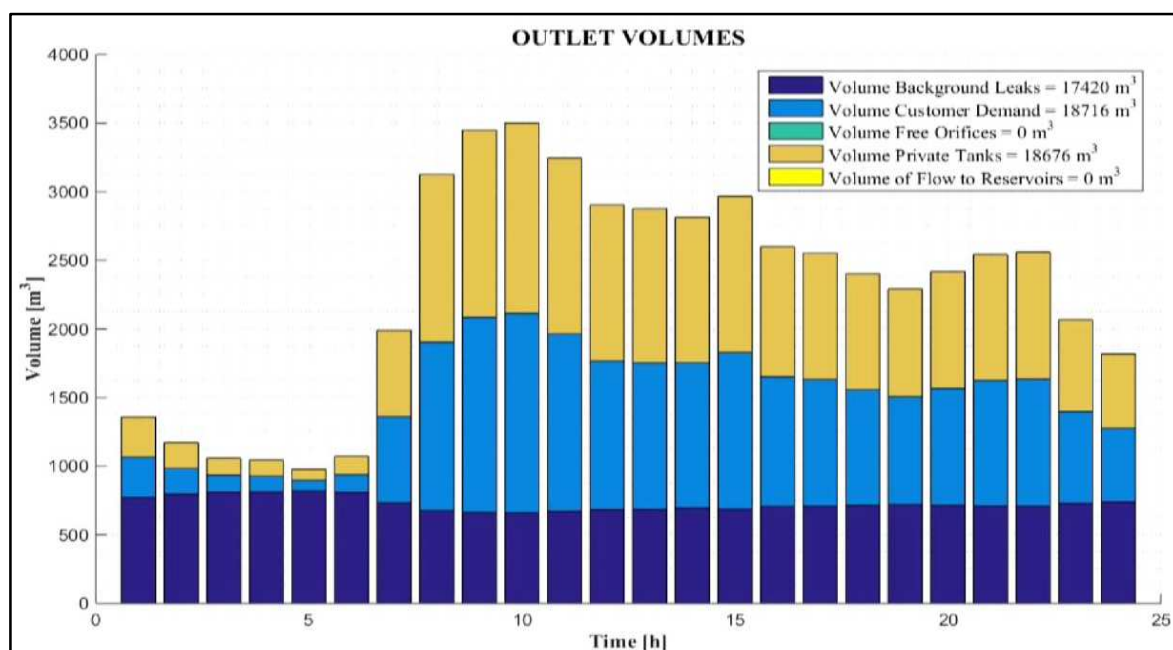


Fig.166. Componenti del pattern di della portata in ingresso - Piano di Riabilitazione n.7

- **Sostituzione di 210 condotte** sul totale complessivo di 7.869 tubazioni esistenti in rete;
- **Lunghezza totale di tubazioni sostituite pari a 44,785km** sul totale complessivo di 318,91km di tubazioni esistenti in rete;
- **Costo stimato** dei lavori previsti nel Piano Riabilitazione n.8 pari ad **€.12.962.372,00**;
- **Riduzione della pressione media in rete** da 56,20mt nel funzionamento idraulico attuale della rete esistente, a **55,40mt** ottenuti nella configurazione di progetto;
- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a** (*perdite idriche lineari*) da un valore di $123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ ad un valore di $54,62 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete** (*Volume Background Leaks*) da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **17.420 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **21.744 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete** di risorsa idrica pari a circa **7.936.560mc**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **55,52%** rispetto alle perdite volumetriche stimate nel funzionamento attuale della rete.

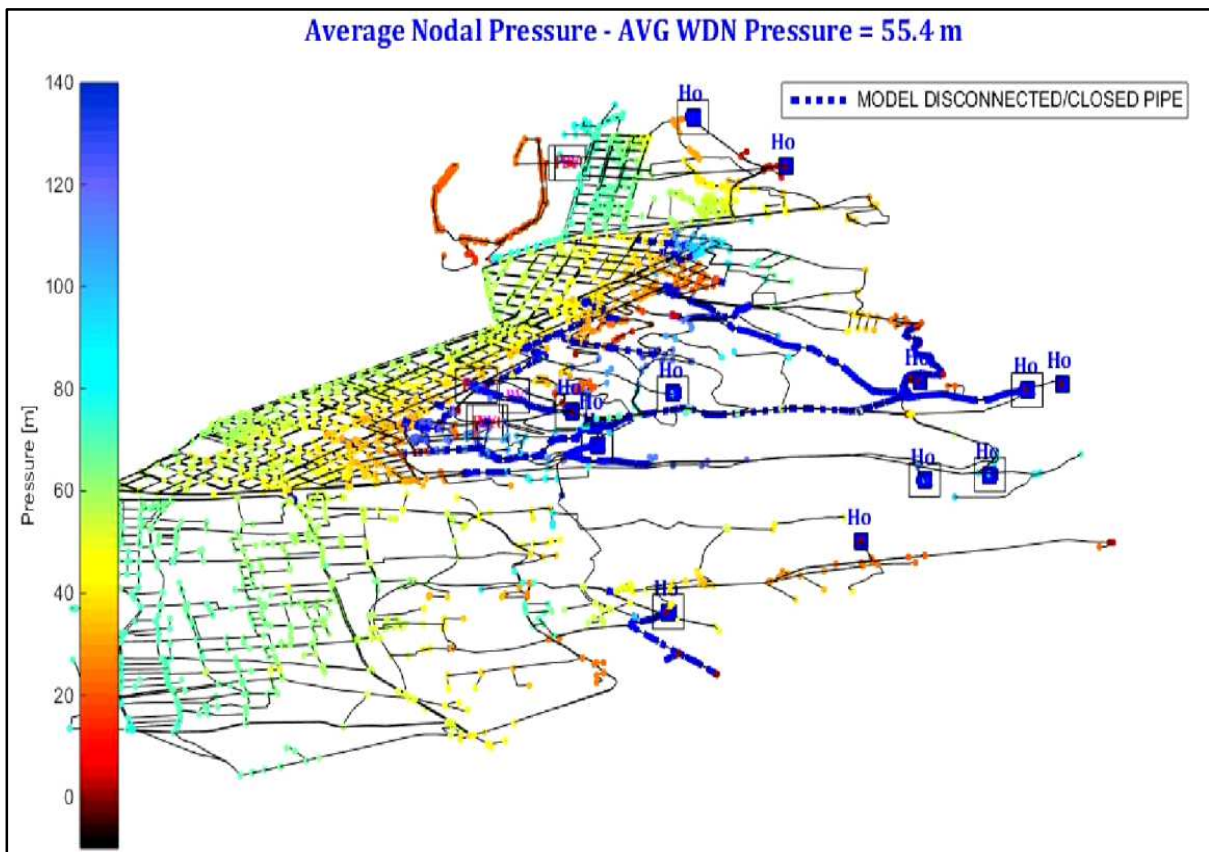


Fig.167. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria - Piano di Riabilitazione n.7

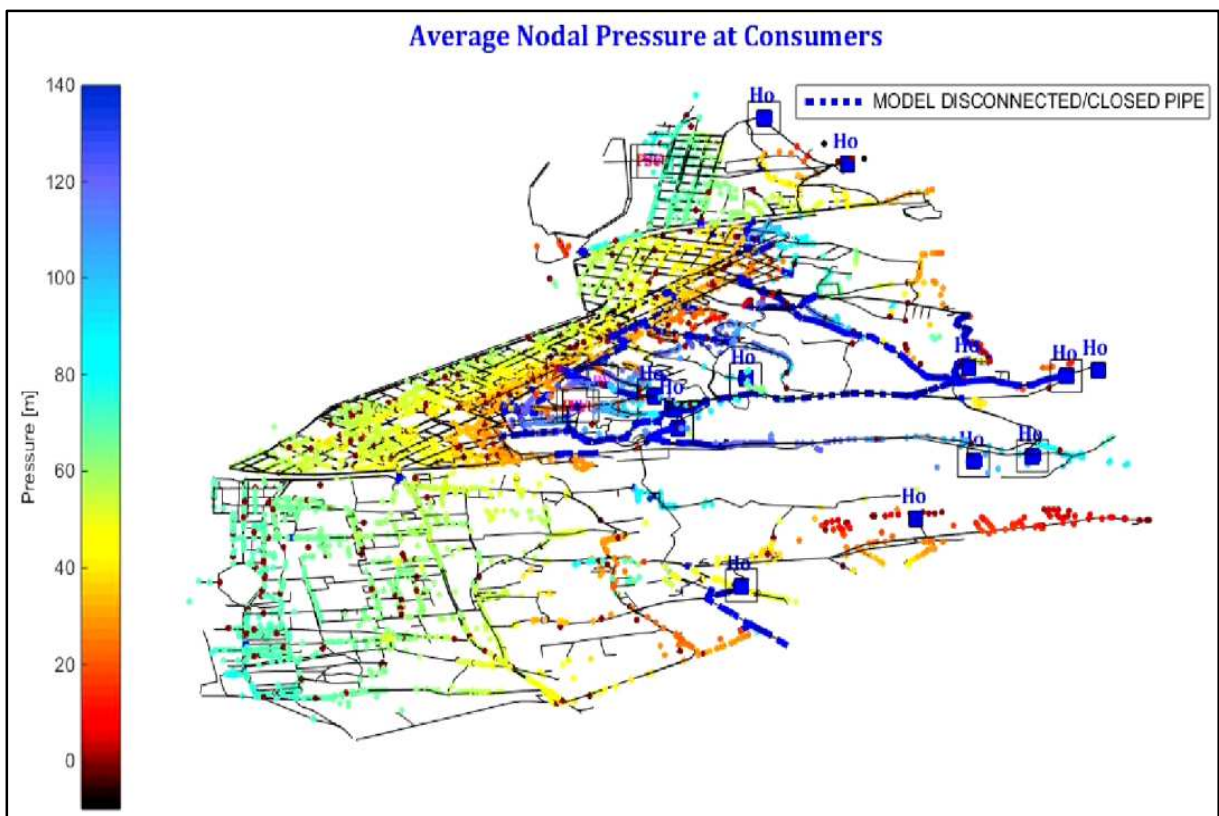


Fig.168. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Piano di Riabilitazione n.7

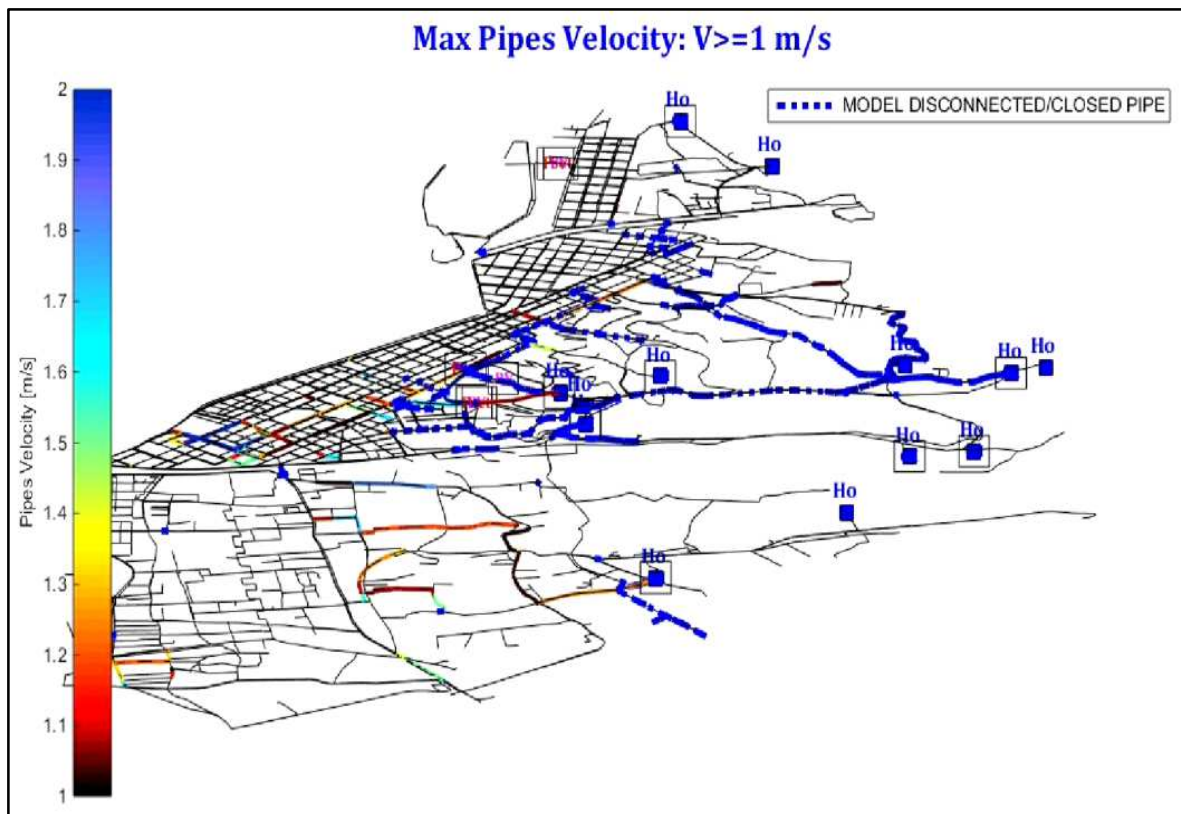


Fig.169. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.7

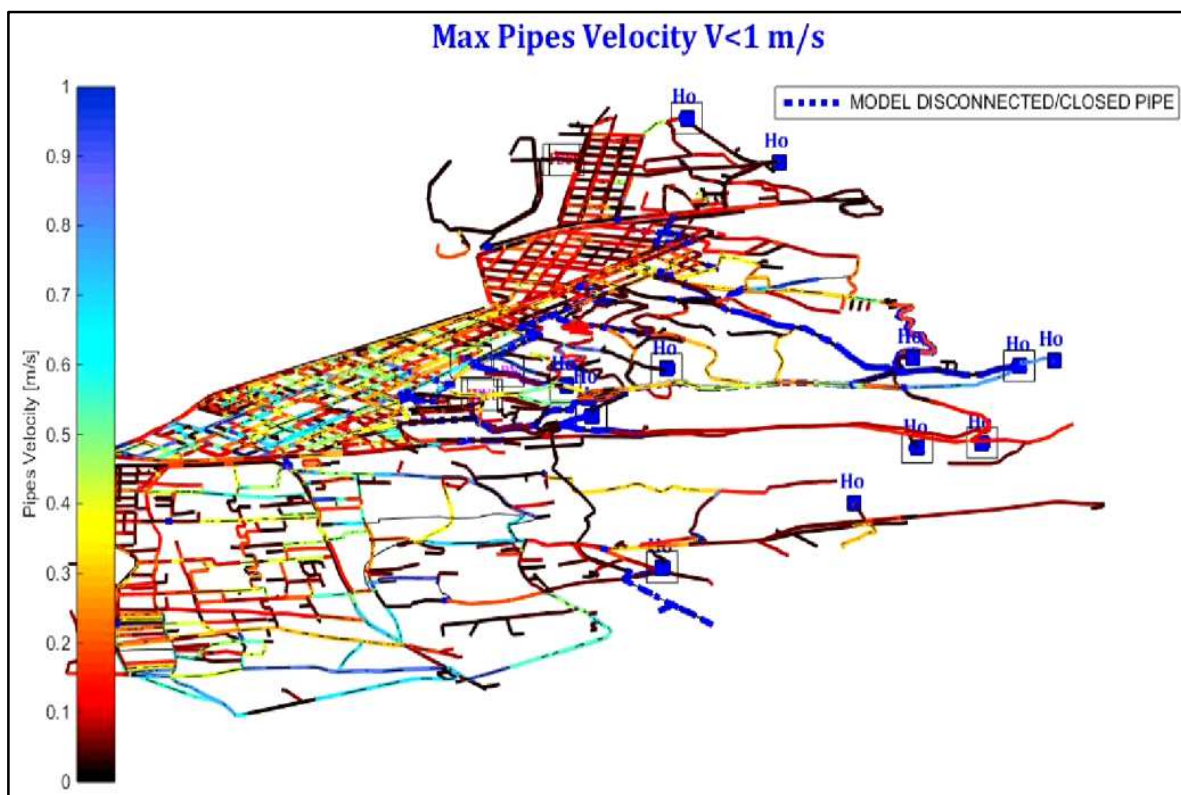


Fig.170. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.7

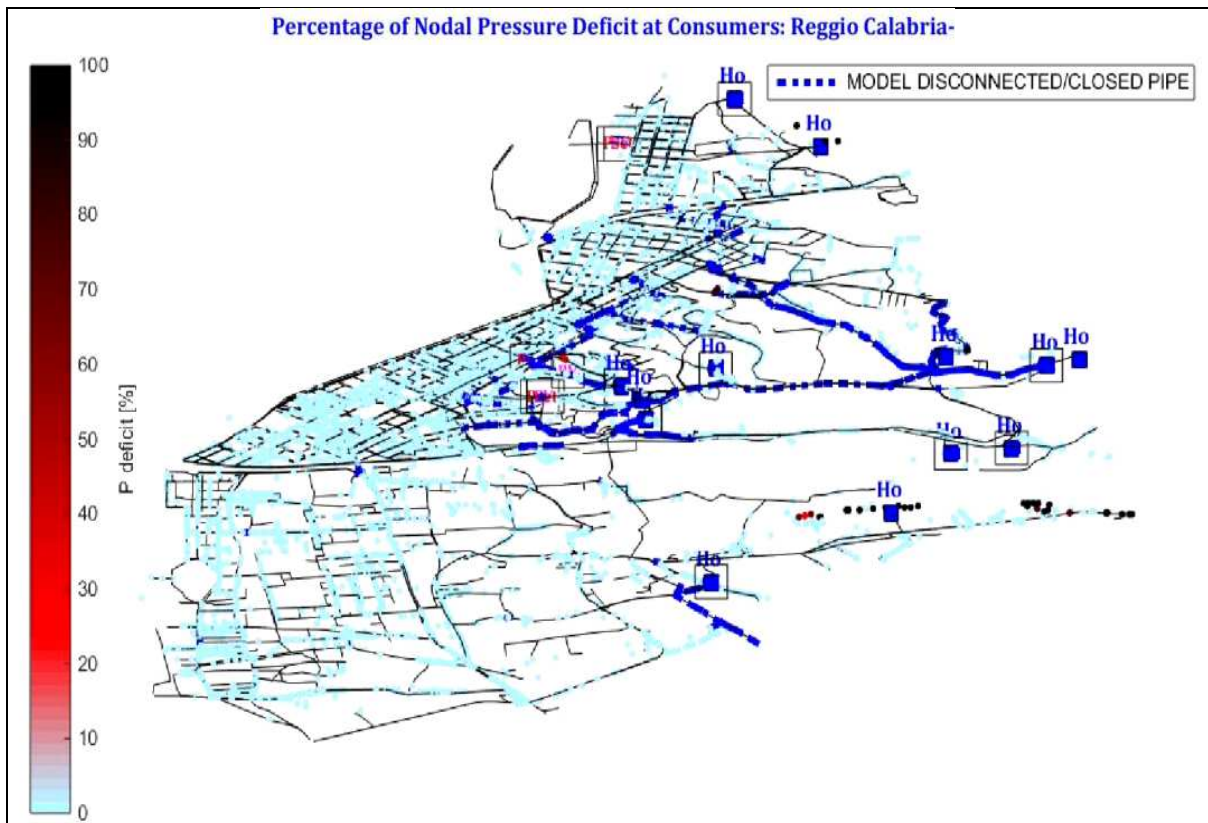


Fig.171. Percentuale Utenze in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.7

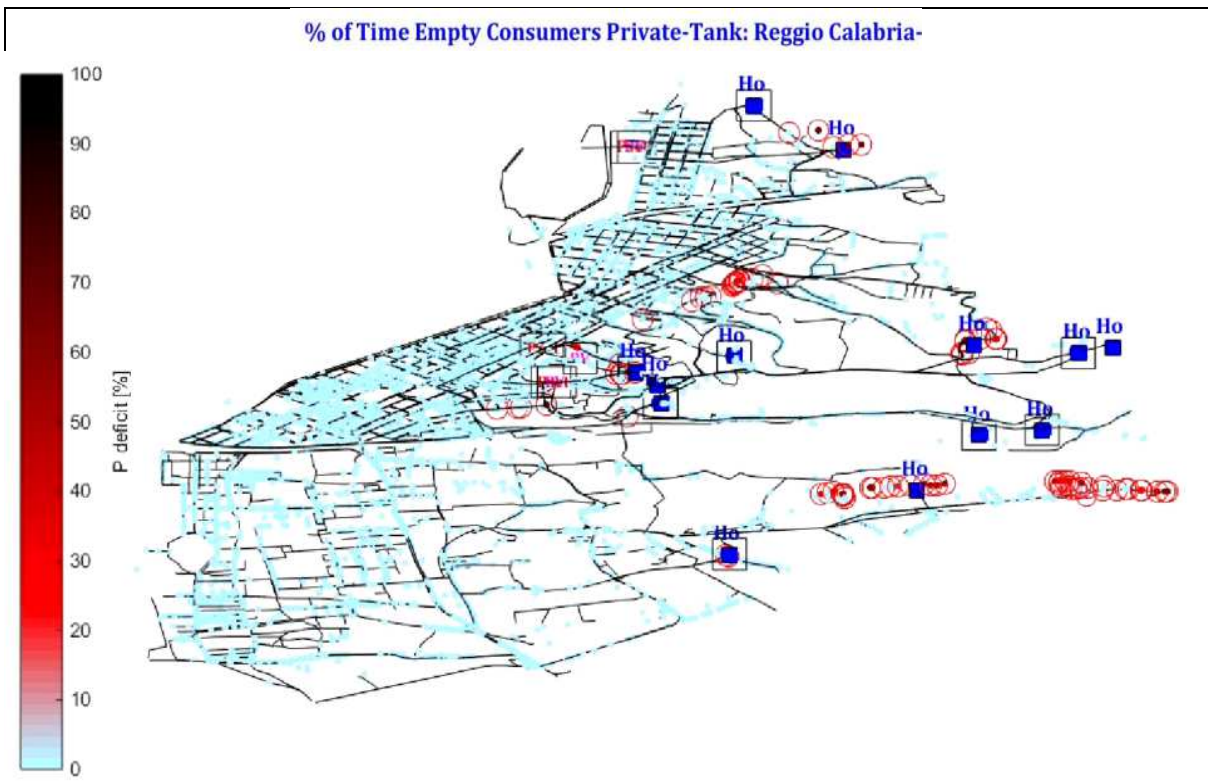


Fig.172. Percentuale di tempo singole Utenze in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.7

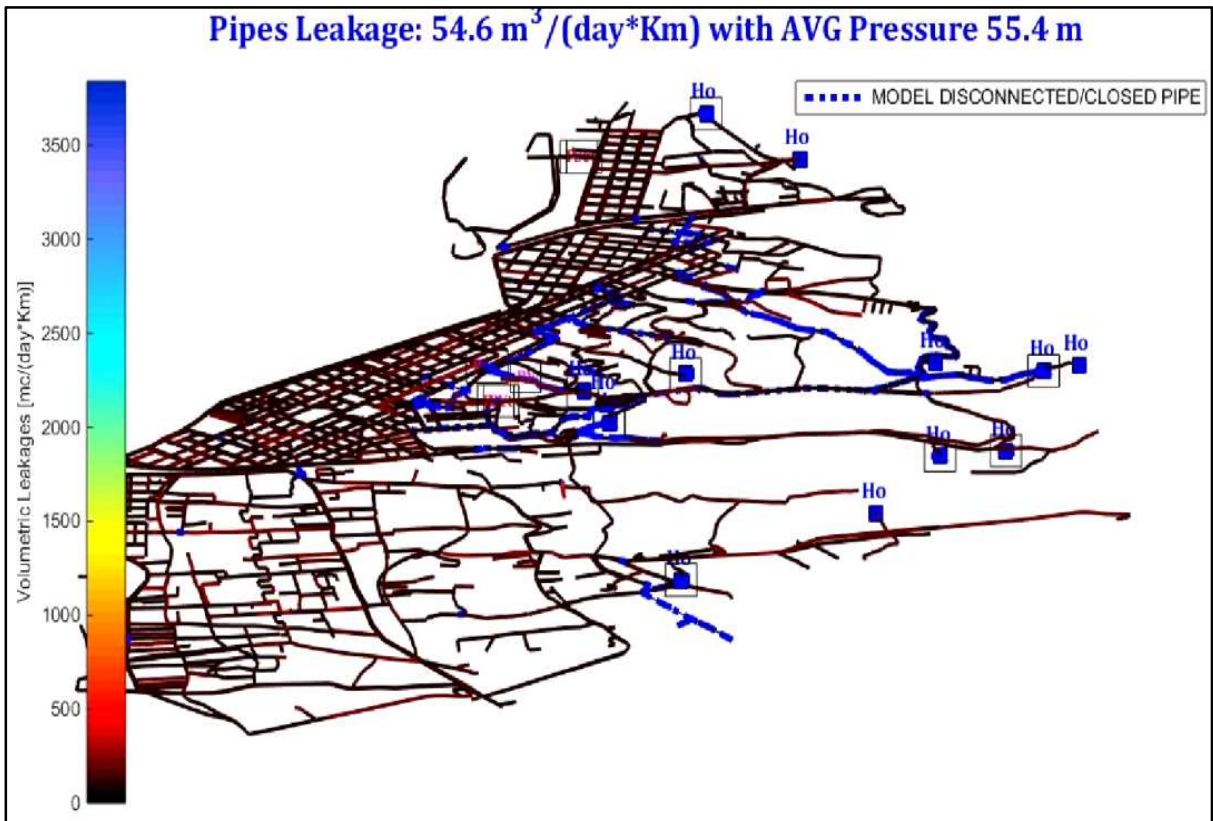


Fig.173. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo Macroindicatore M1a - Piano di Riabilitazione n.7

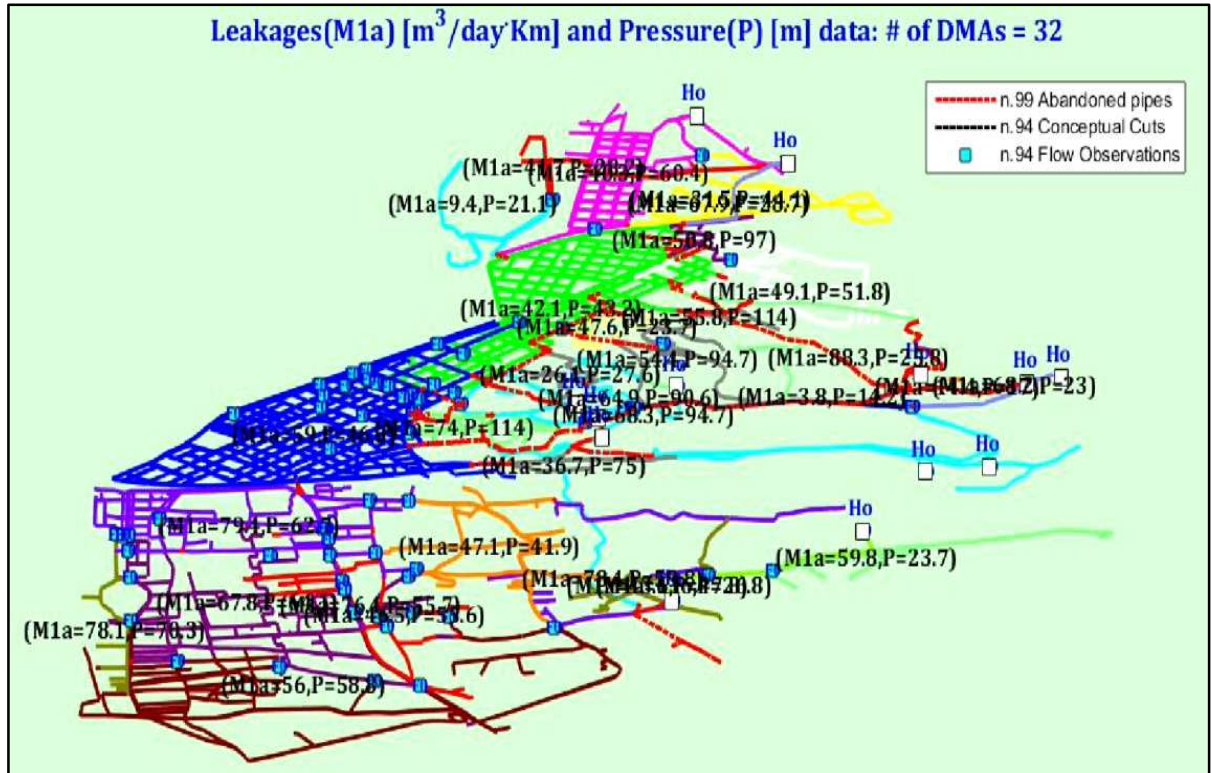


Fig.174. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo M1a nei DMA - Piano di Riabilitazione n.7

5.8.8. PIANO DI RIABILITAZIONE N.8

Il **Piano di Riabilitazione n.8** di progetto è stato predisposto imponendo un costo di intervento pari al **16%** del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria ed utilizzando un criterio di scelta delle tubazioni da sostituire che restituisca la maggiore *efficienza* in termini di rapporto tra le perdite lineari (parametro *M1a* della singola condotta sostituita) e costo di sostituzione della condotta stessa. Nel *Piano di Sostituzione n.8* sono state, pertanto, selezionate prioritariamente le condotte da sostituire che presentano un elevato valore di *perdite lineari M1a*, rapportato al costo di sostituzione della condotta stessa. Il *costo di sostituzione* della singola condotta da sostituire è stato calcolato come prodotto tra lunghezza specifica della condotta e *costo unitario di sostituzione* della stessa che è funzione del proprio *Diametro Nominale DN commerciale*. I risultati ottenuti dalla *distrettualizzazione idraulica* della rete di Reggio Calabria, riportati graficamente nelle figure a seguire, possono essere così sintetizzati:

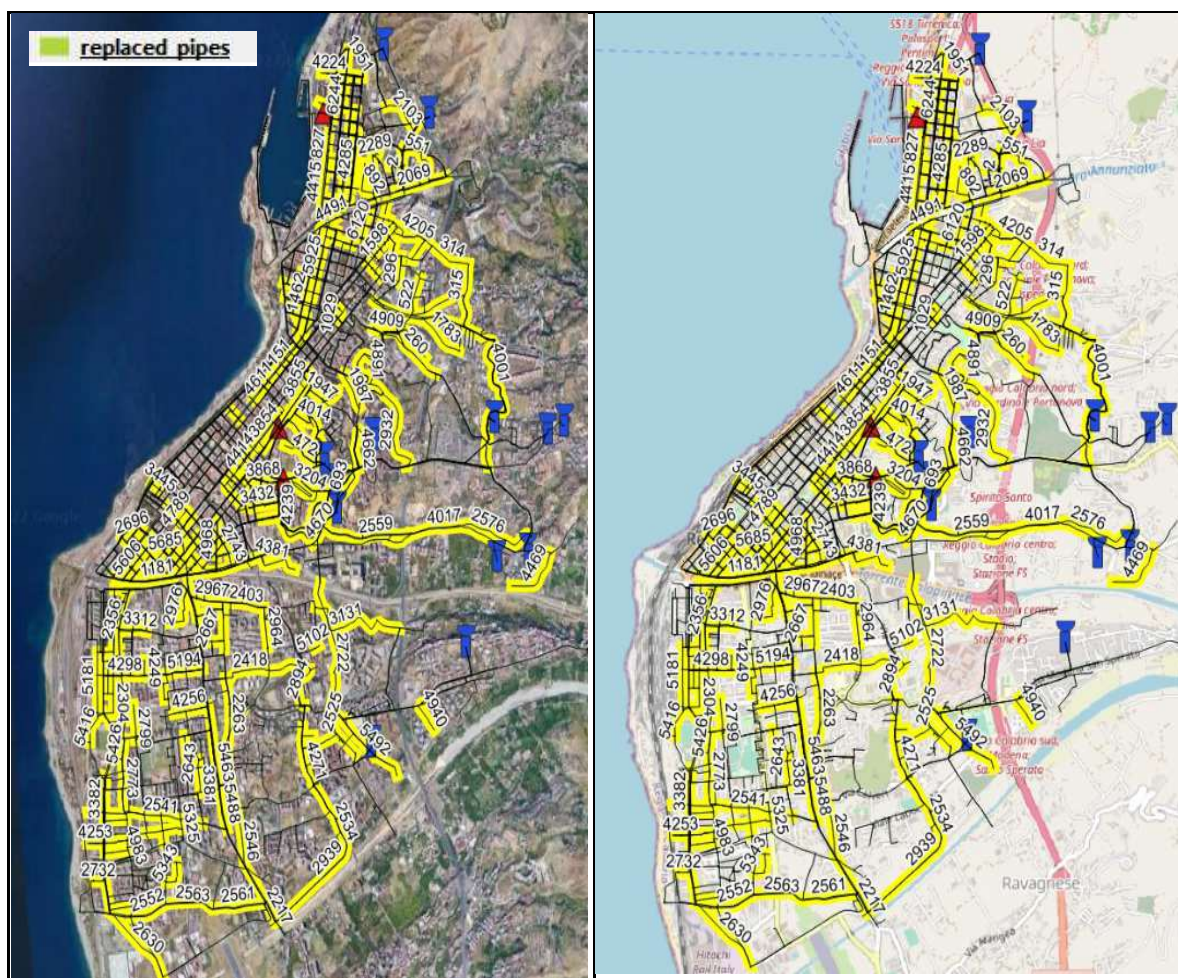


Fig.175. Stralcio Planimetrico delle condotte da sostituire - Piano di Riabilitazione n.8

PIANO DI RIABILITAZIONE N.8								
CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE MEDIA in rete [mt]	M1a [mc/km/g]	Perdite Volumetriche [mc/g]	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
Numero	Lunghezza [km]	Costo [€]				[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
246	51,316	14'837'035.00 €	55,80	51,50	16'424	22'740	8'300'100	58,06

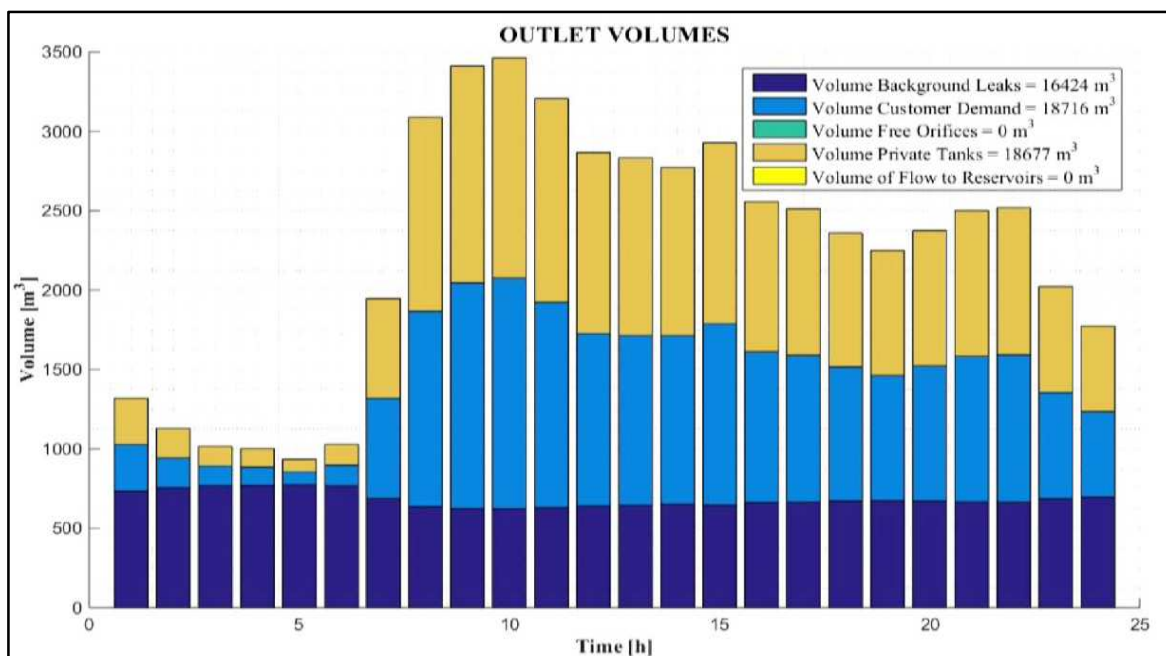


Fig.176. Componenti del pattern di della portata in ingresso - Piano di Riabilitazione n.8

- **Sostituzione di 246 condotte** sul totale complessivo di 7.869 tubazioni esistenti in rete;
- **Lunghezza totale di tubazioni sostituite pari a 51,316km** sul totale complessivo di 318,91km di tubazioni esistenti in rete;
- **Costo stimato** dei lavori previsti nel Piano Riabilitazione n.8 pari ad **€.14.837.035,00**;
- **Riduzione della pressione media in rete** da 56,20mt nel funzionamento idraulico attuale della rete esistente, a **55,80mt** ottenuti nella configurazione di progetto;
- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a (perdite idriche lineari)** da un valore di $123 \text{ m}^3/\text{km/g}$ ad un valore di $51,50 \text{ m}^3/\text{km/g}$;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete (Volume Background Leaks)** da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **16.424 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **22.740 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete** di risorsa idrica pari a circa **8.300.100mc**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **58,06%** rispetto alle perdite volumetriche stimate nel funzionamento attuale della rete.

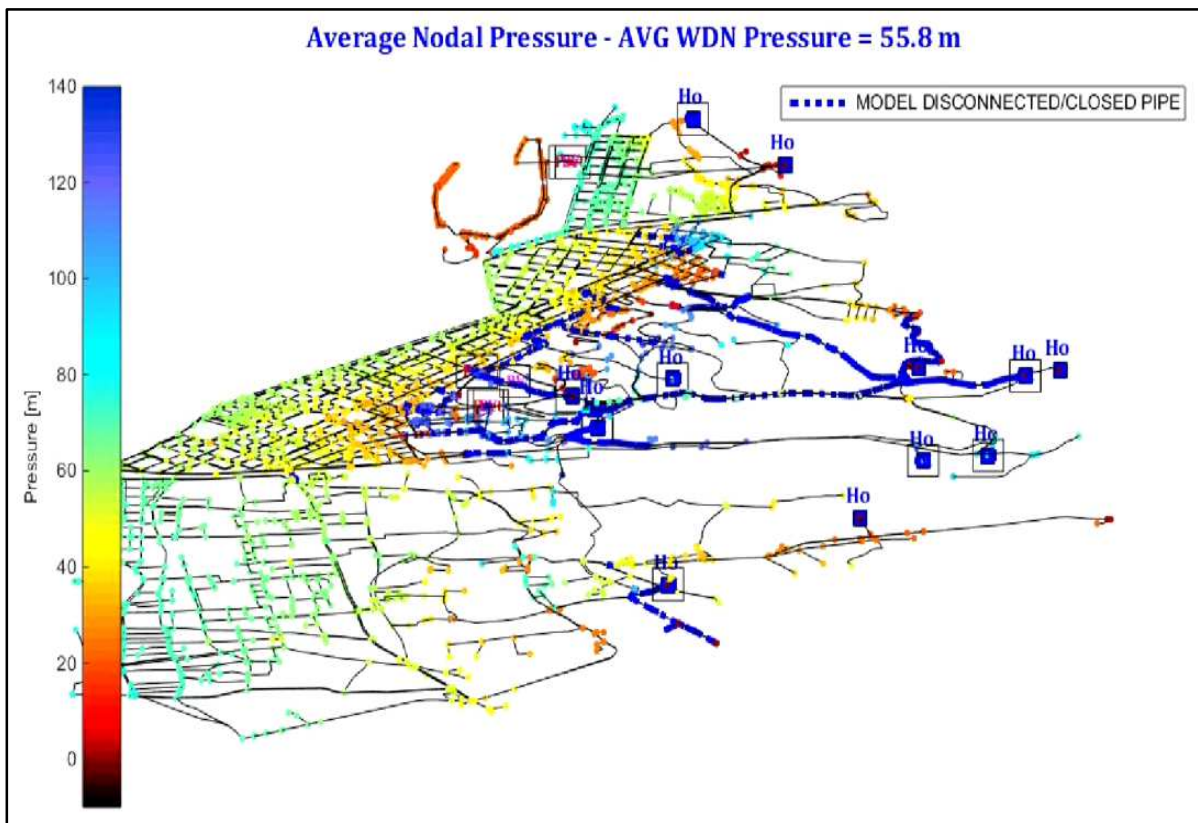


Fig.177. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria - Piano di Riabilitazione n.8

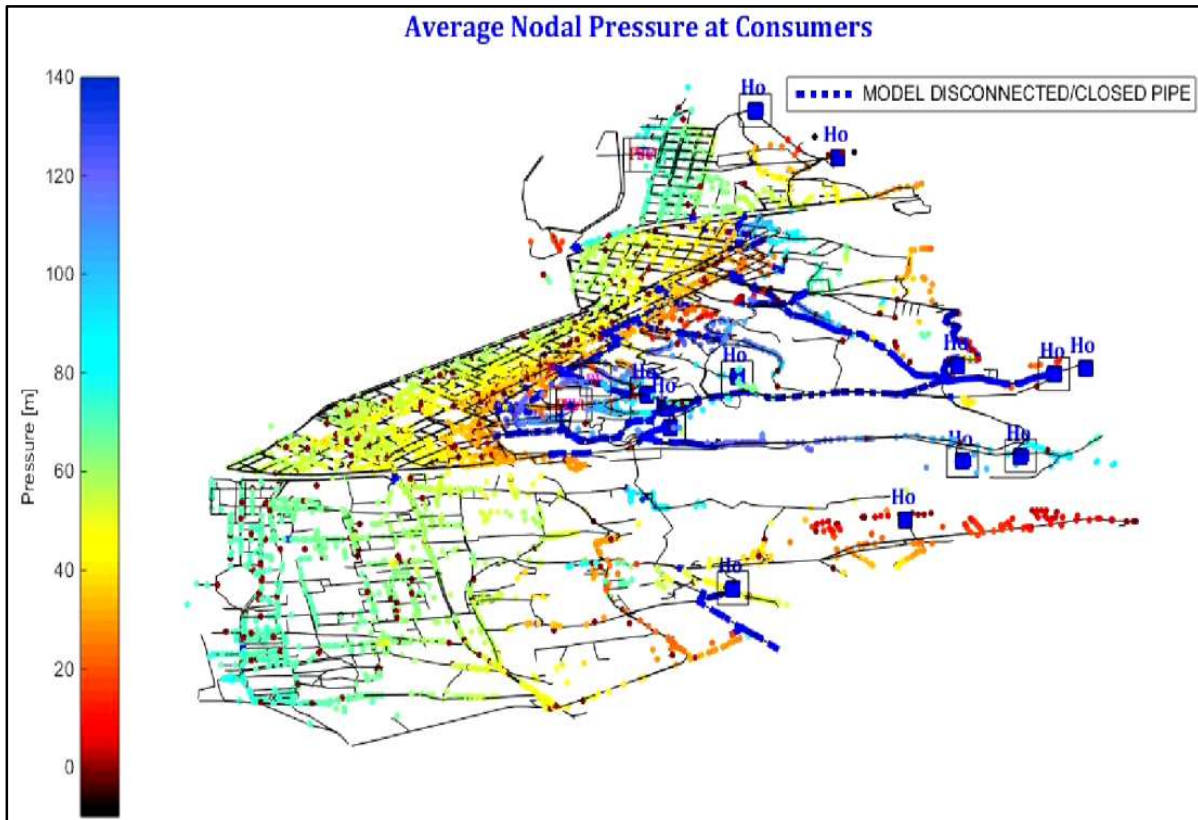


Fig.178. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Piano di Riabilitazione n.8

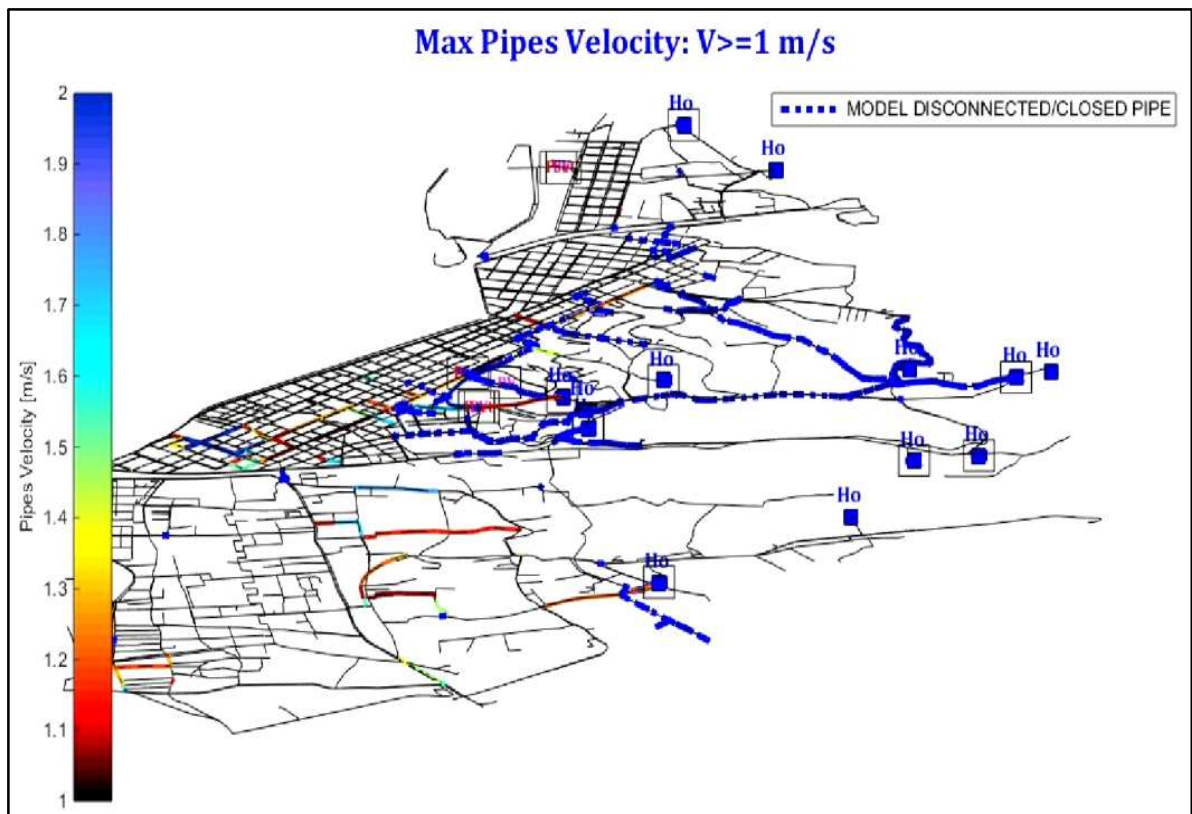


Fig.179. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.8

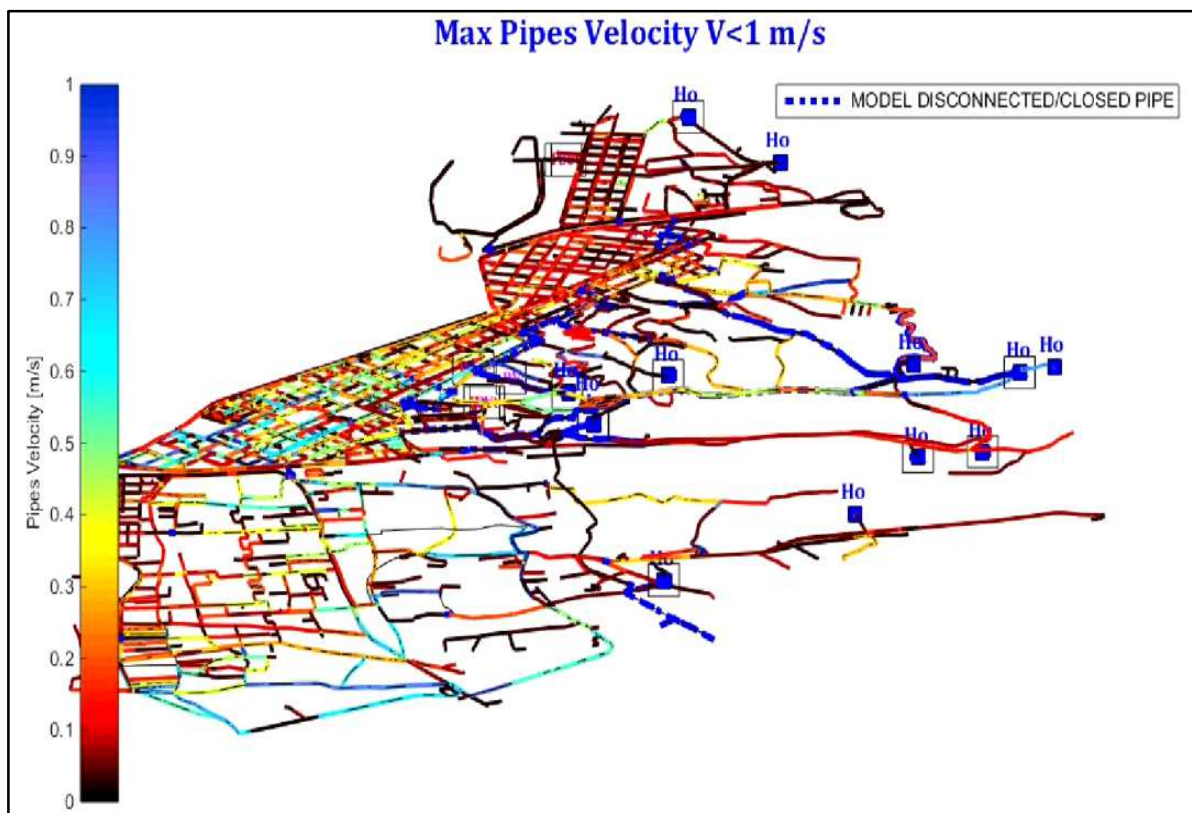


Fig.180. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.8

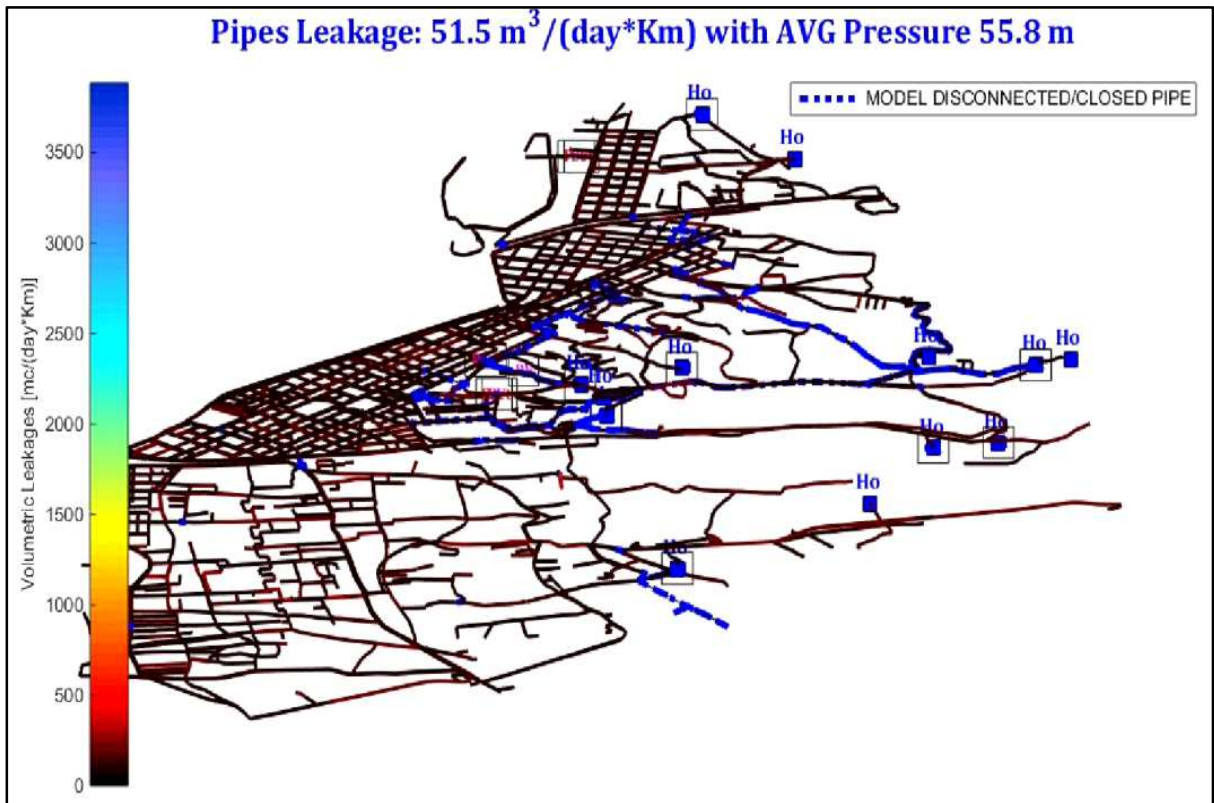


Fig.183. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo Macroindicatore M1a - Piano di Riabilitazione n.8

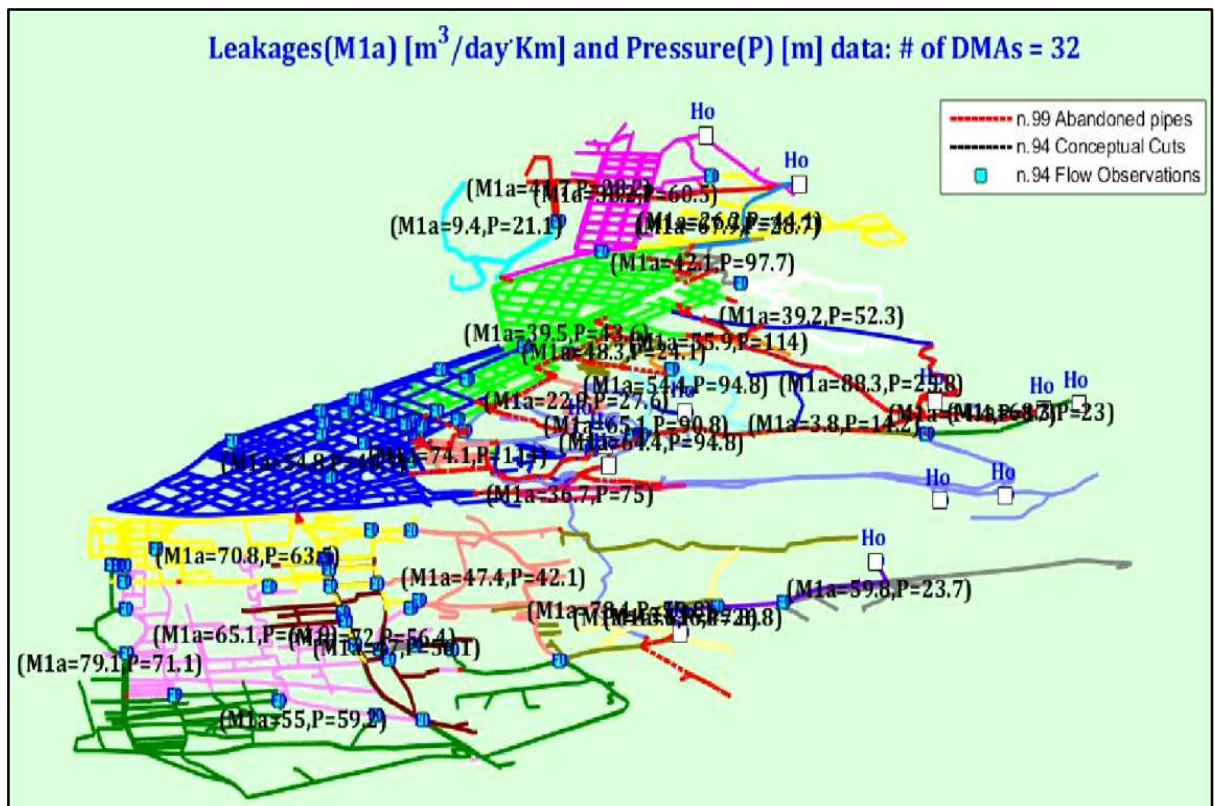


Fig.184. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo M1a nei DMA - Piano di Riabilitazione n.8

PIANO DI RIABILITAZIONE N.9								
CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE MEDIA in rete [mt]	M1a [mc/km/g]	Perdite Volumetriche [mc/g]	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
Numero	Lunghezza [km]	Costo [€]				[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
310	57,926	16'735'233.00 €	56,20	48,60	15'499	23'665	8'637'725	60,43

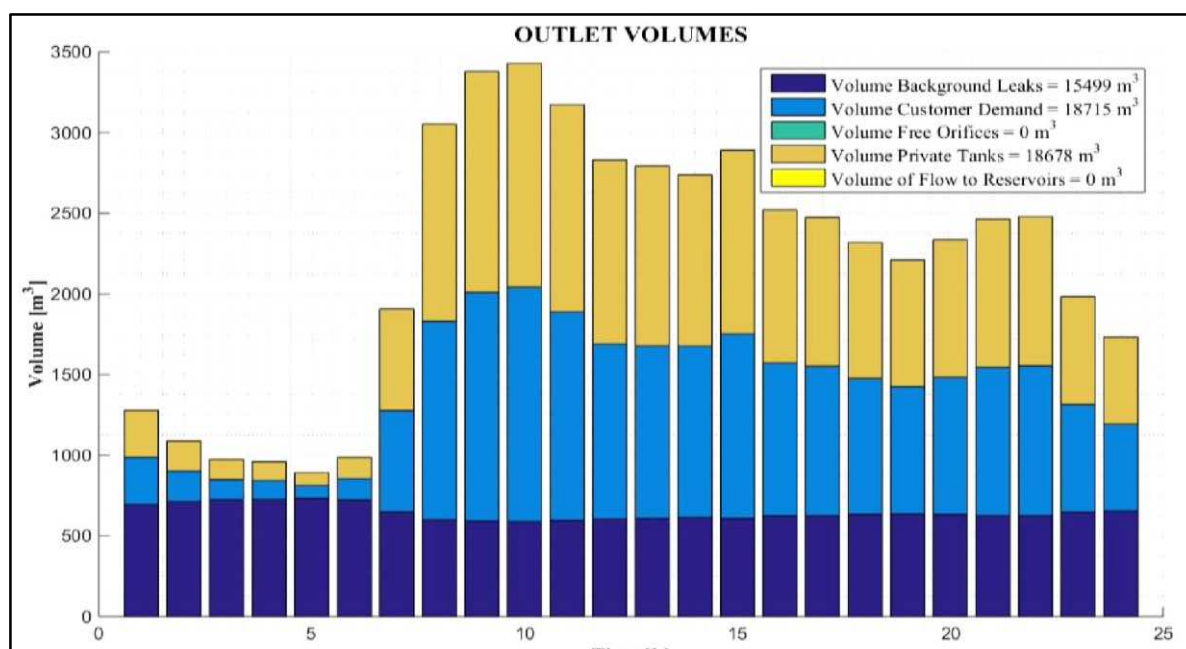


Fig.186. Componenti del pattern di della portata in ingresso - Piano di Riabilitazione n.9

- **Sostituzione di 310 condotte** sul totale complessivo di 7.869 tubazioni esistenti in rete;
- **Lunghezza totale di tubazioni sostituite pari a 57,926km** sul totale complessivo di 318,91km di tubazioni esistenti in rete;
- **Costo stimato** dei lavori previsti nel Piano Riabilitazione n.9 pari ad **€.16.735.233,00**;
- **Pressione media in rete:** 56,20mt nel funzionamento idraulico attuale della rete esistente; **56,20mt** ottenuti nella configurazione di progetto;
- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a (perdite idriche lineari)** da un valore di $123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ ad un valore di **$48,60 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$** ;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete (Volume Background Leaks)** da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **15.499 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **23.665 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete di risorsa idrica** pari a circa **8.637.725mc**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **60,43%** rispetto alle perdite volumetriche stimate nel funzionamento attuale della rete.

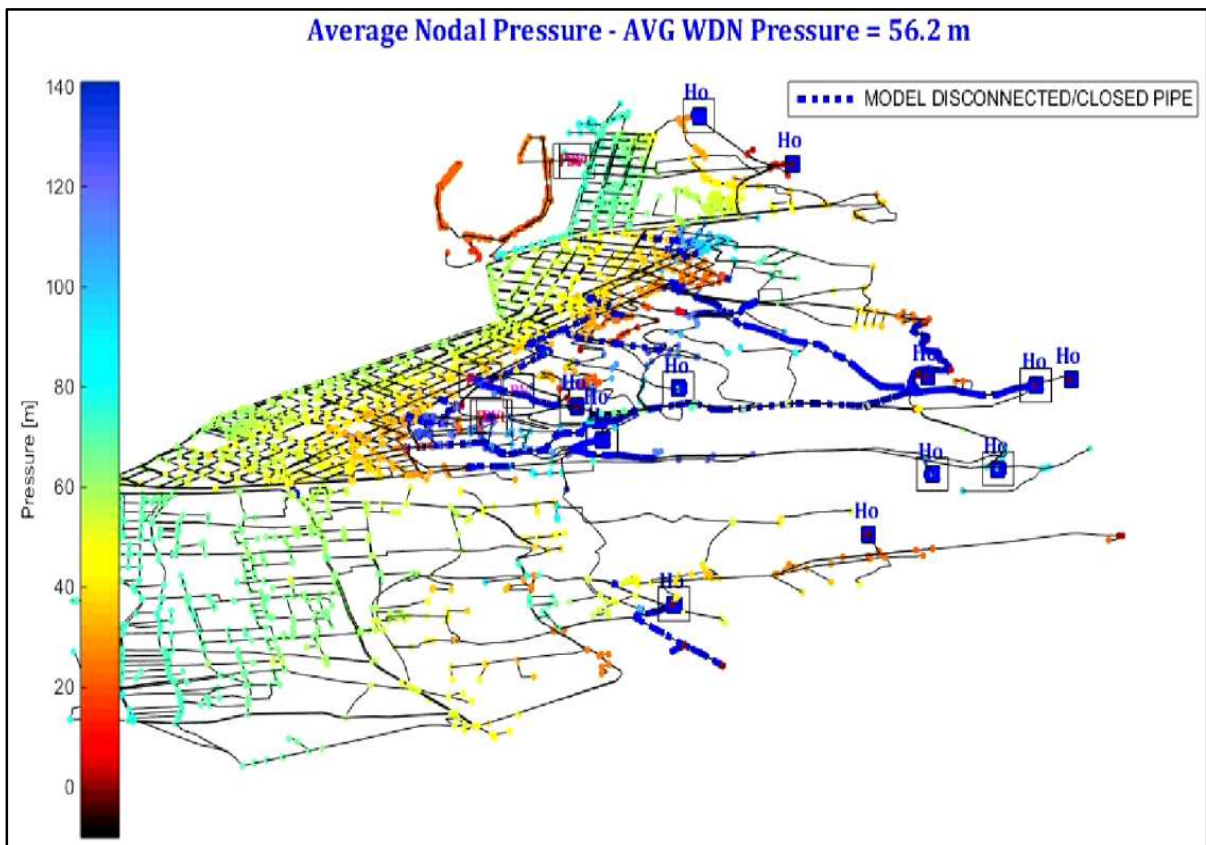


Fig.187. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria - Piano di Riabilitazione n.9

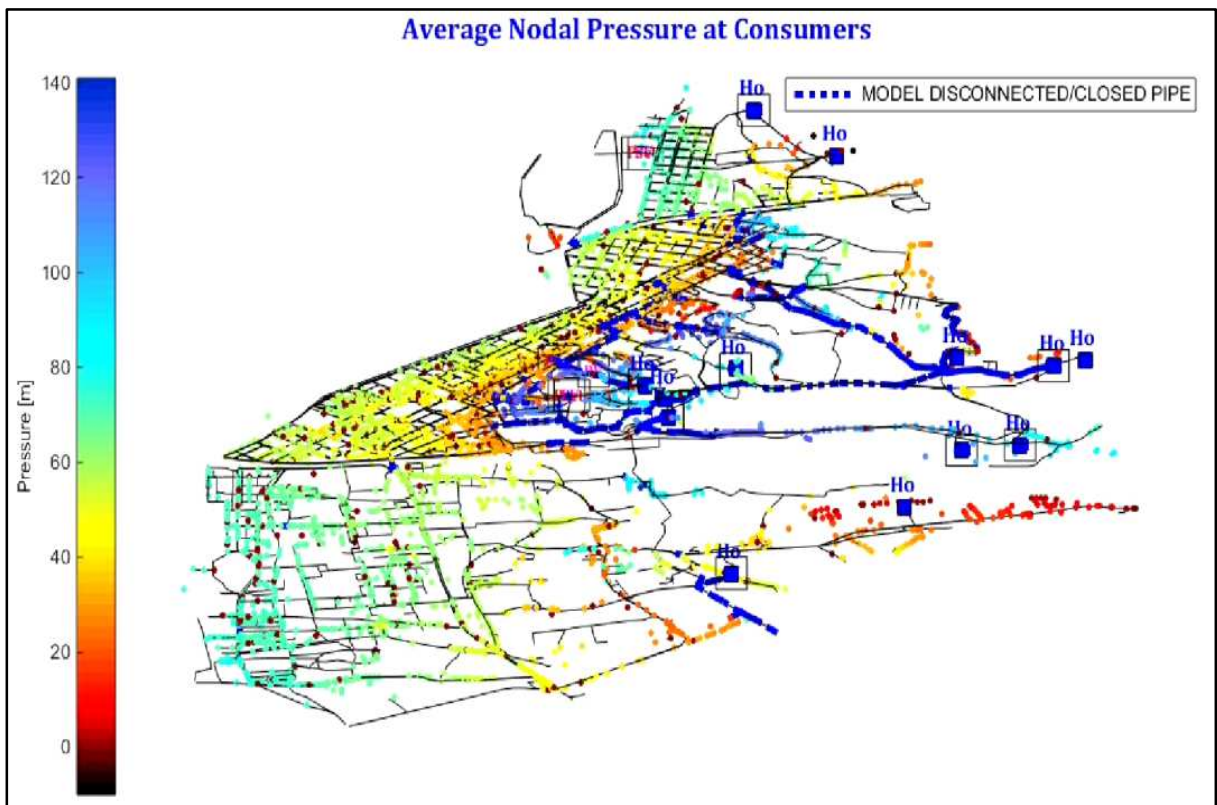


Fig.188. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Piano di Riabilitazione n.9

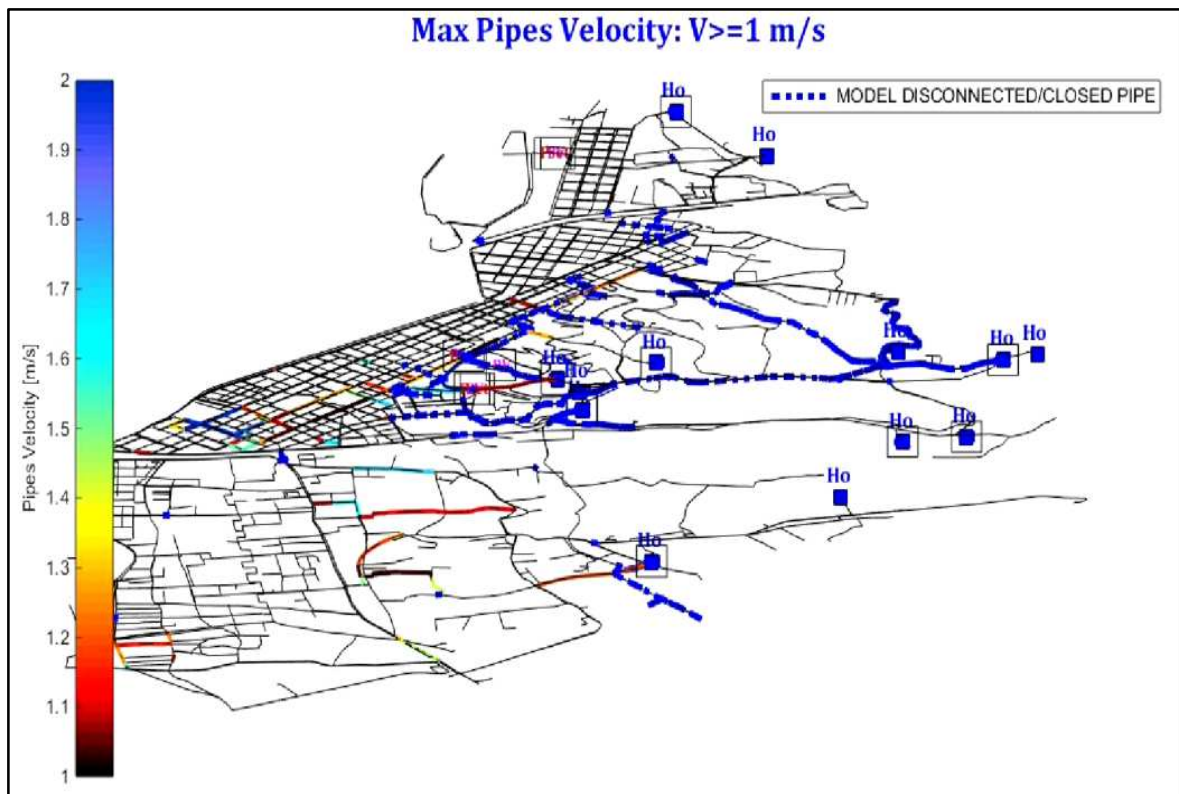


Fig.189. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.9

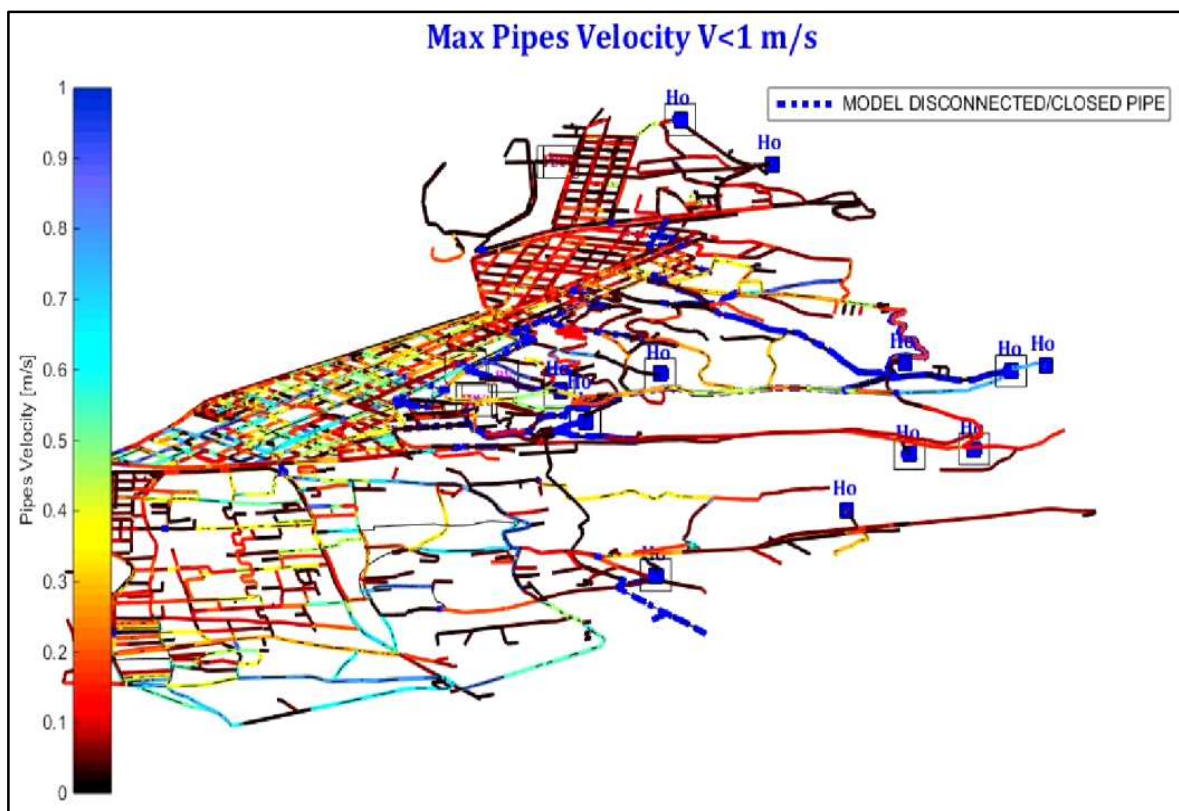


Fig.190. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.9

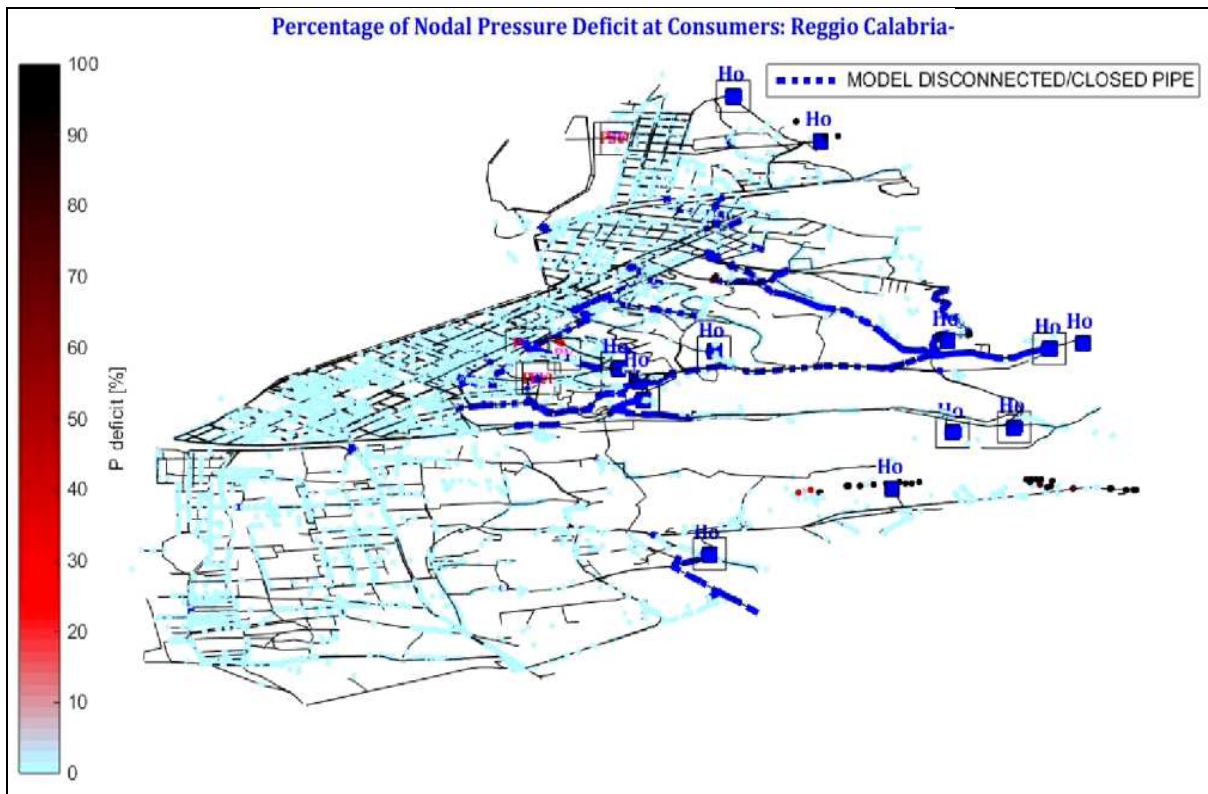


Fig.191. Percentuale Utenze in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.9

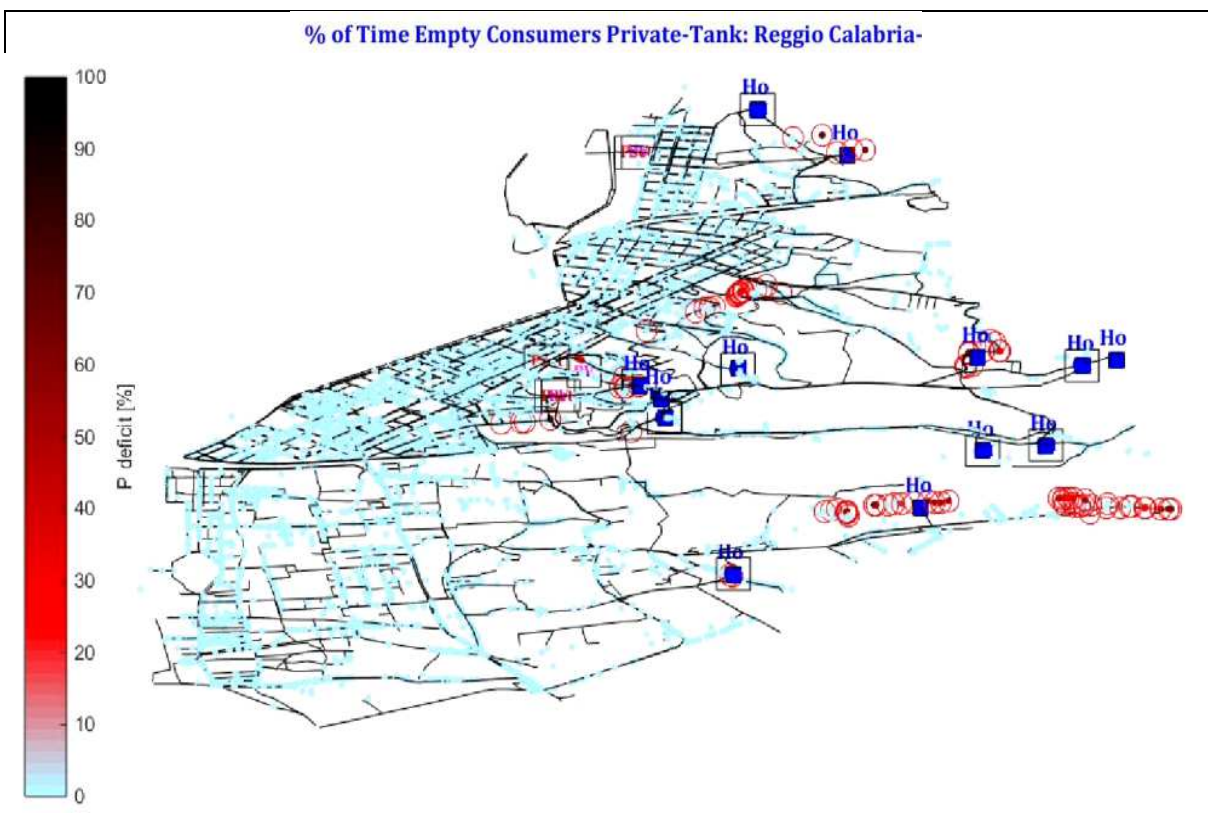


Fig.192. Percentuale di tempo singole Utenze in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.9

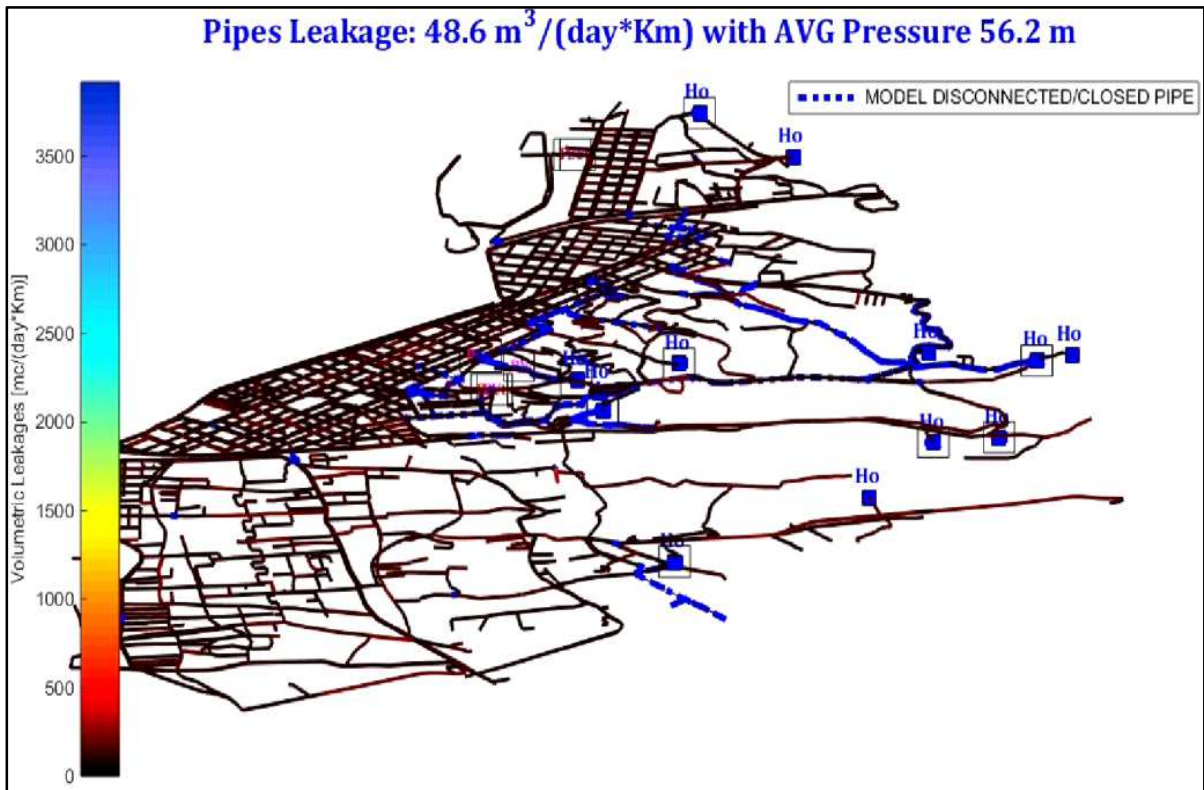


Fig.193. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo Macroindicatore M1a - Piano di Riabilitazione n.9

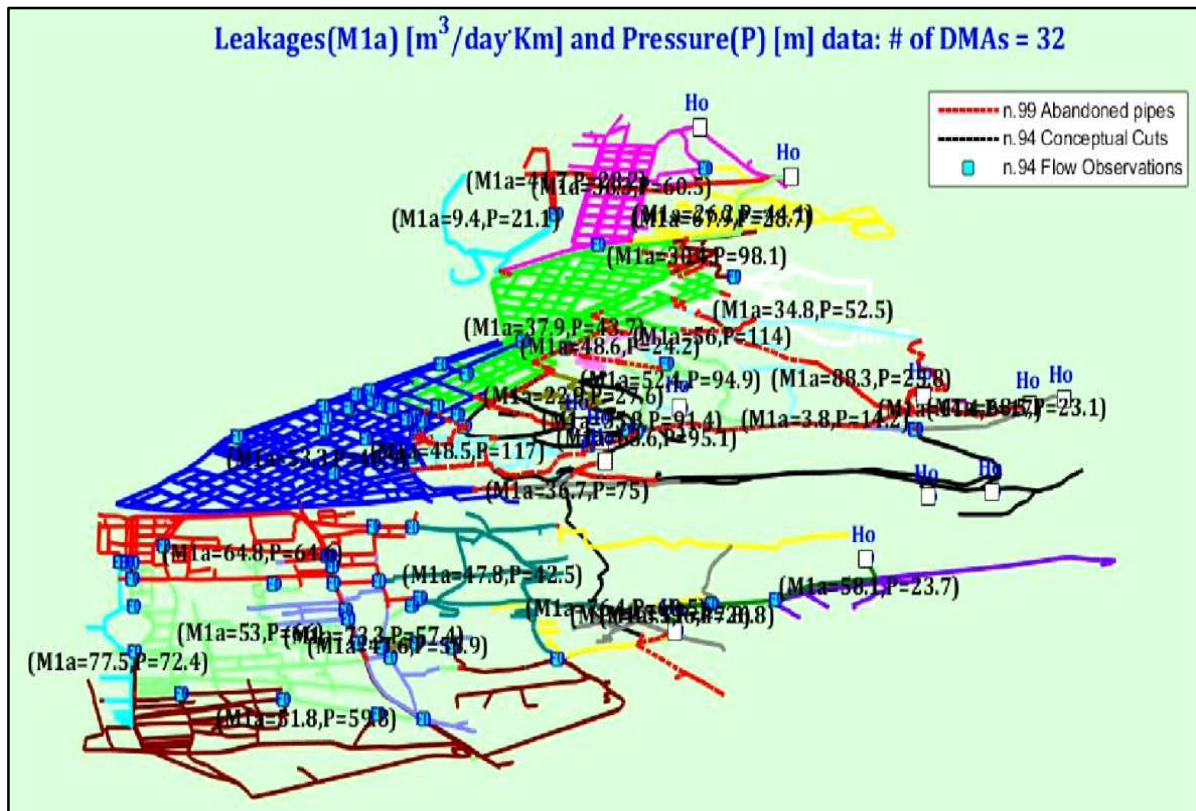


Fig.194. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo M1a nei DMA - Piano di Riabilitazione n.9

5.8.10. PIANO DI RIABILITAZIONE N.10

Il **Piano di Riabilitazione n.10** di progetto è stato predisposto imponendo un costo di intervento pari al **20%** del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria ed utilizzando un criterio di scelta delle tubazioni da sostituire che restituisca la maggiore *efficienza* in termini di rapporto tra le perdite lineari (parametro *M1a* della singola condotta sostituita) e costo di sostituzione della condotta stessa. Nel *Piano di Sostituzione n.10* sono state, pertanto, selezionate prioritariamente le condotte da sostituire che presentano un elevato valore di *perdite lineari M1a*, rapportato al costo di sostituzione della condotta stessa. Il *costo di sostituzione* della singola condotta da sostituire è stato calcolato come prodotto tra lunghezza specifica della condotta e *costo unitario di sostituzione* della stessa che è funzione del proprio *Diametro Nominale DN commerciale*. I risultati ottenuti dalla *distrettualizzazione idraulica* della rete di Reggio Calabria, riportati graficamente nelle figure a seguire, possono essere così sintetizzati:

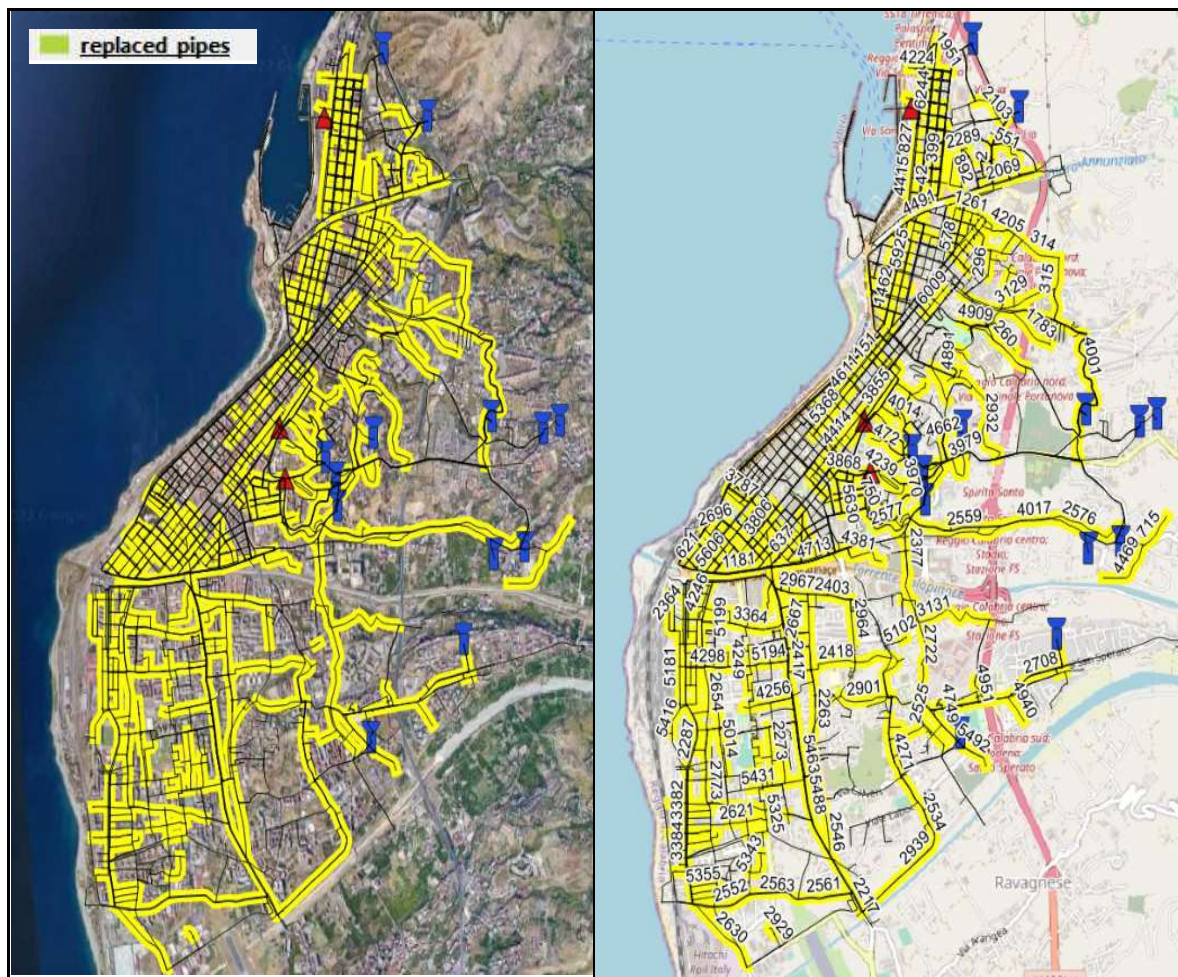


Fig.195. Stralcio Planimetrico delle condotte da sostituire - Piano di Riabilitazione n.10

PIANO DI RIABILITAZIONE N.10								
CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE MEDIA in rete [mt]	M1a [mc/km/g]	Perdite Volumetriche [mc/g]	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
Numero	Lunghezza [km]	Costo [€]				[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
350	64,464	18'691'890.00 €	56,50	45,92	14'643	24'521	8'950'165	62,61

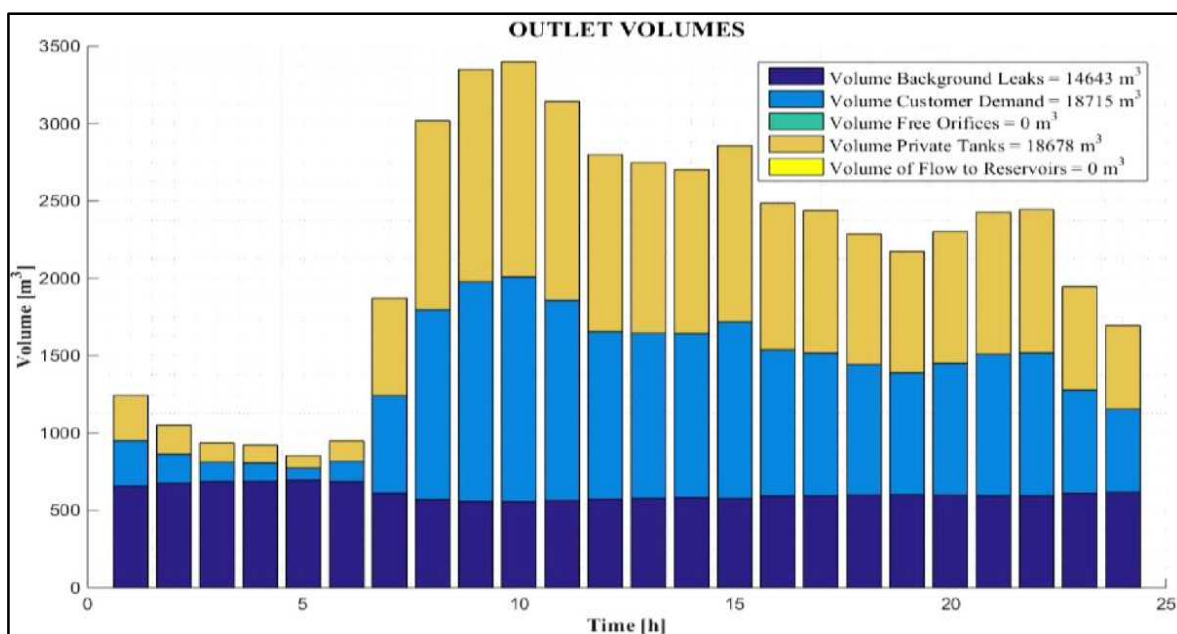


Fig.196. Componenti del pattern di della portata in ingresso - Piano di Riabilitazione n.10

- **Sostituzione di 350 condotte** sul totale complessivo di 7.869 tubazioni esistenti in rete;
- **Lunghezza totale di tubazioni sostituite pari a 64,464km** sul totale complessivo di 318,91km di tubazioni esistenti in rete;
- **Costo stimato** dei lavori previsti nel Piano Riabilitazione n.10 pari ad **€18.691.890,00**;
- **Pressione media in rete** da 56,20mt nel funzionamento idraulico attuale della rete esistente, a **56,50mt** ottenuti nella configurazione di progetto;
- **Riduzione del macroindicatore ARERA M1a** (*perdite idriche lineari*) da un valore di $123 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$ ad un valore di **$45,92 \text{ m}^3/\text{km}/\text{g}$** ;
- **Riduzione delle perdite volumetriche di rete** (*Volume Background Leaks*) da un valore di 39.164mc/giorno ad un valore di **14,643 mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **24,521 mc/giorno**;
- **Recupero complessivo annuale di volume immesso in rete** di risorsa idrica pari a circa **8.950.165**;
- **Riduzione percentuale in termine di perdite volumetriche** all'interno della rete pari a circa il **62,61%** rispetto alle perdite volumetriche stimate nel funzionamento attuale della rete.

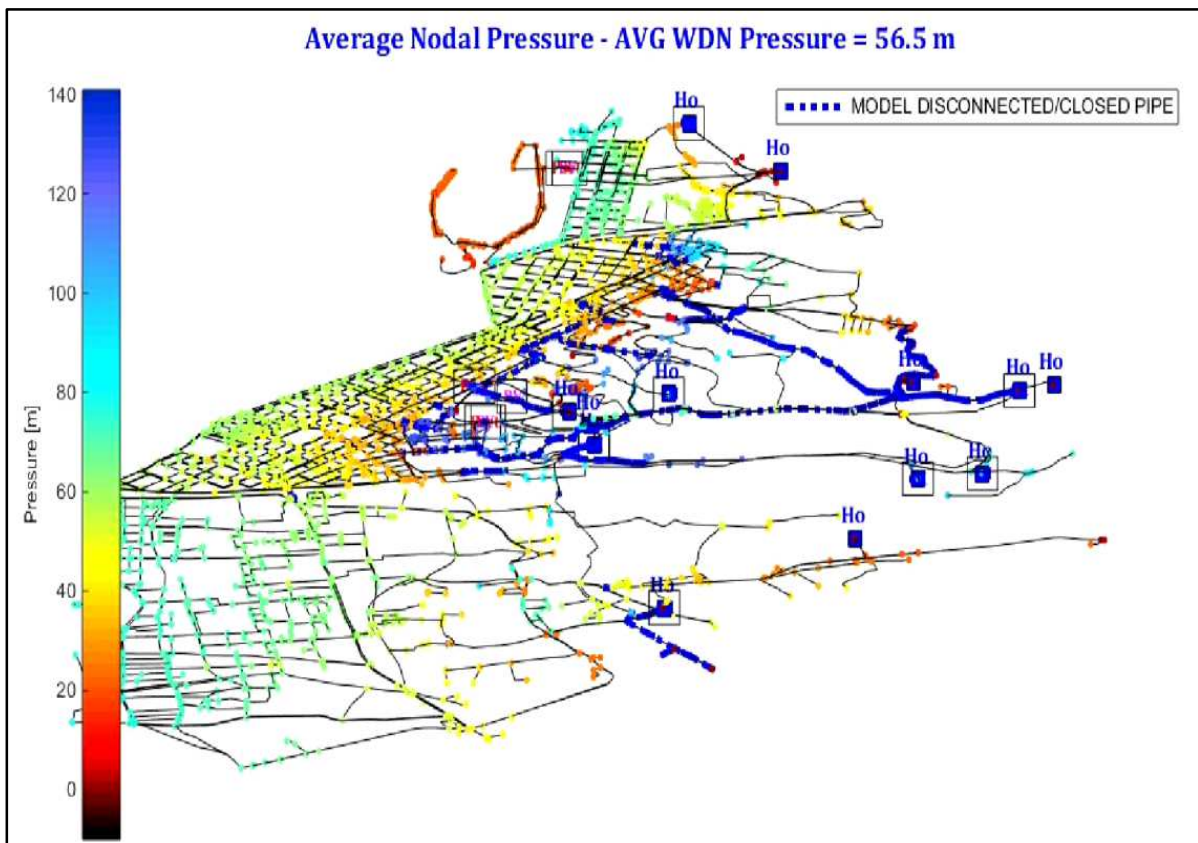


Fig.197. Distribuzione delle Pressioni medie nei nodi della rete di Reggio Calabria - Piano di Riabilitazione n.10

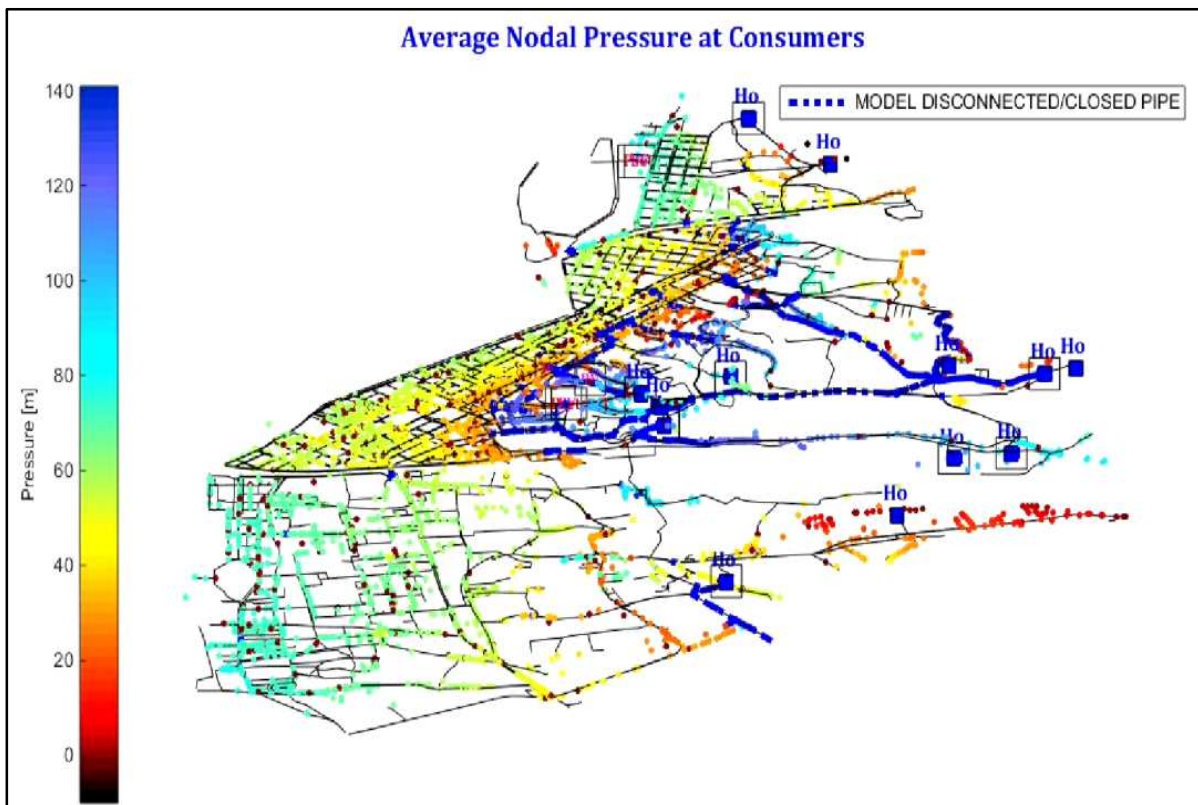


Fig.198. Distribuzione Pressioni medie nelle singole Utenze rete di Reggio Calabria – Piano di Riabilitazione n.10

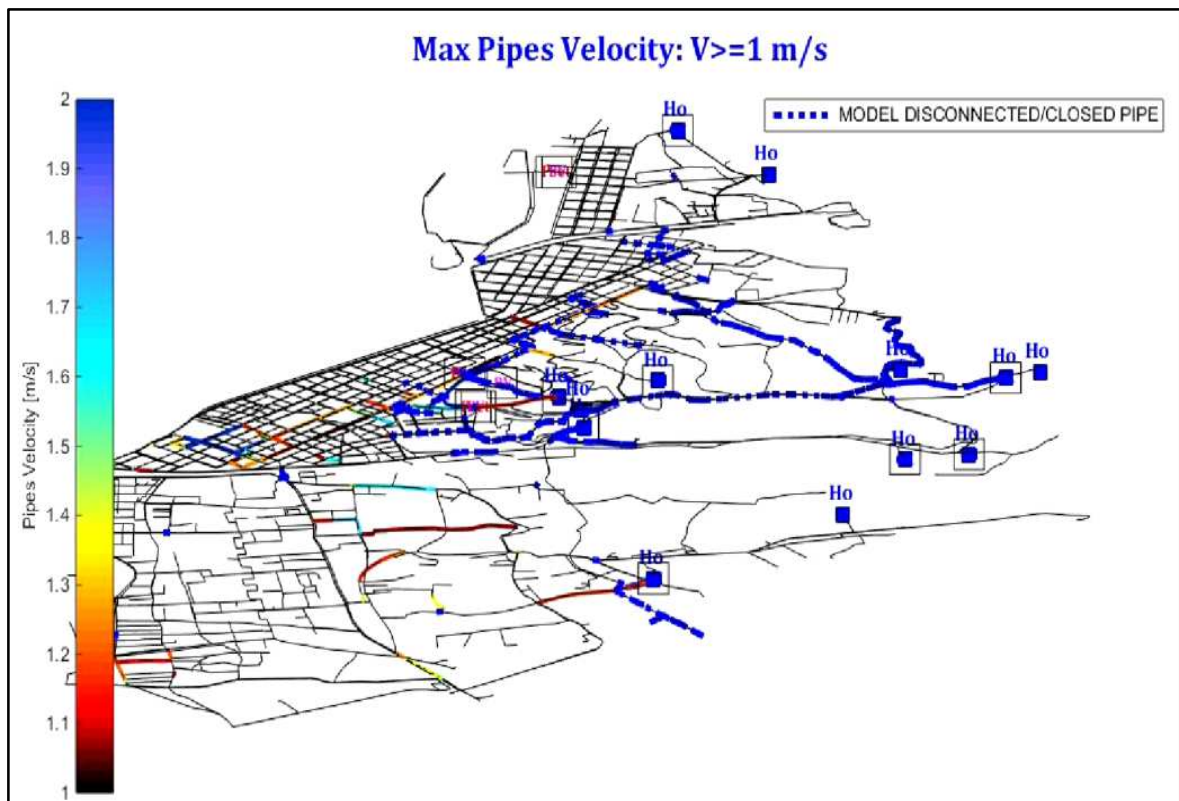


Fig.199. Distribuzione delle Velocità > 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.10

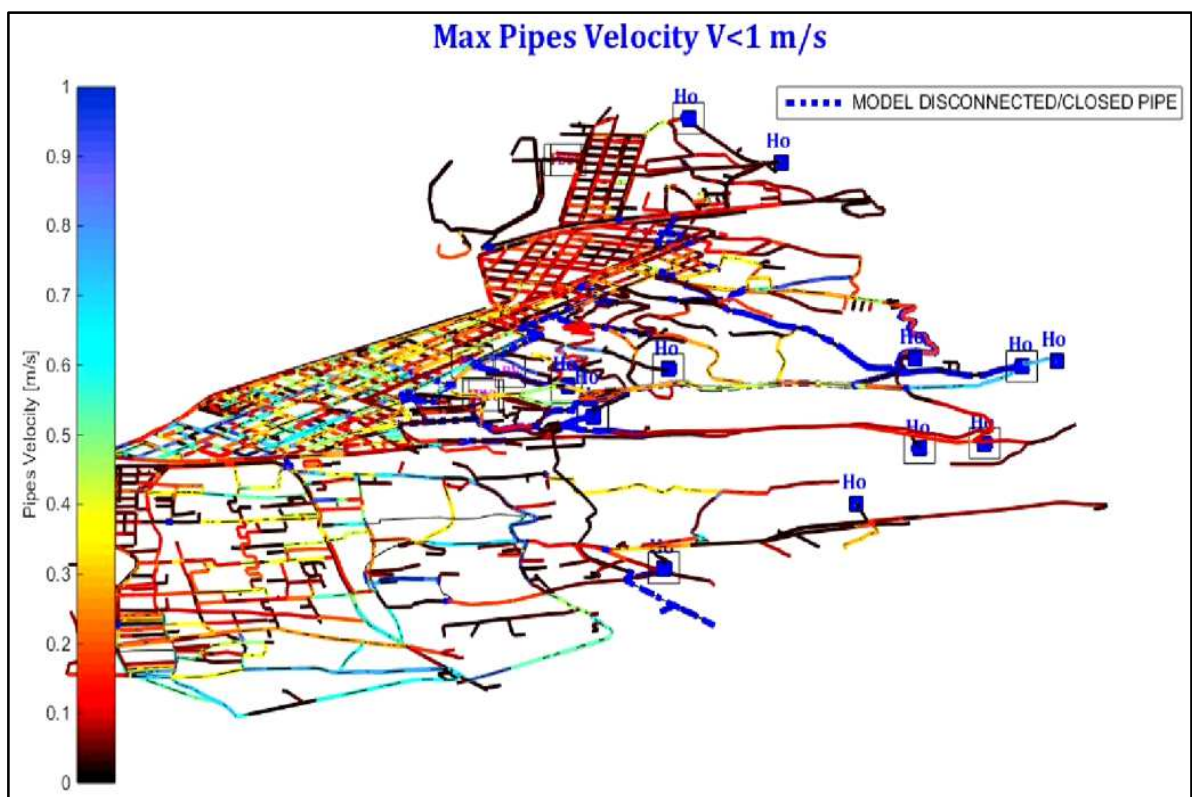


Fig.200. Distribuzione delle Velocità < 1 m/s nelle condotte – Piano di Riabilitazione n.10

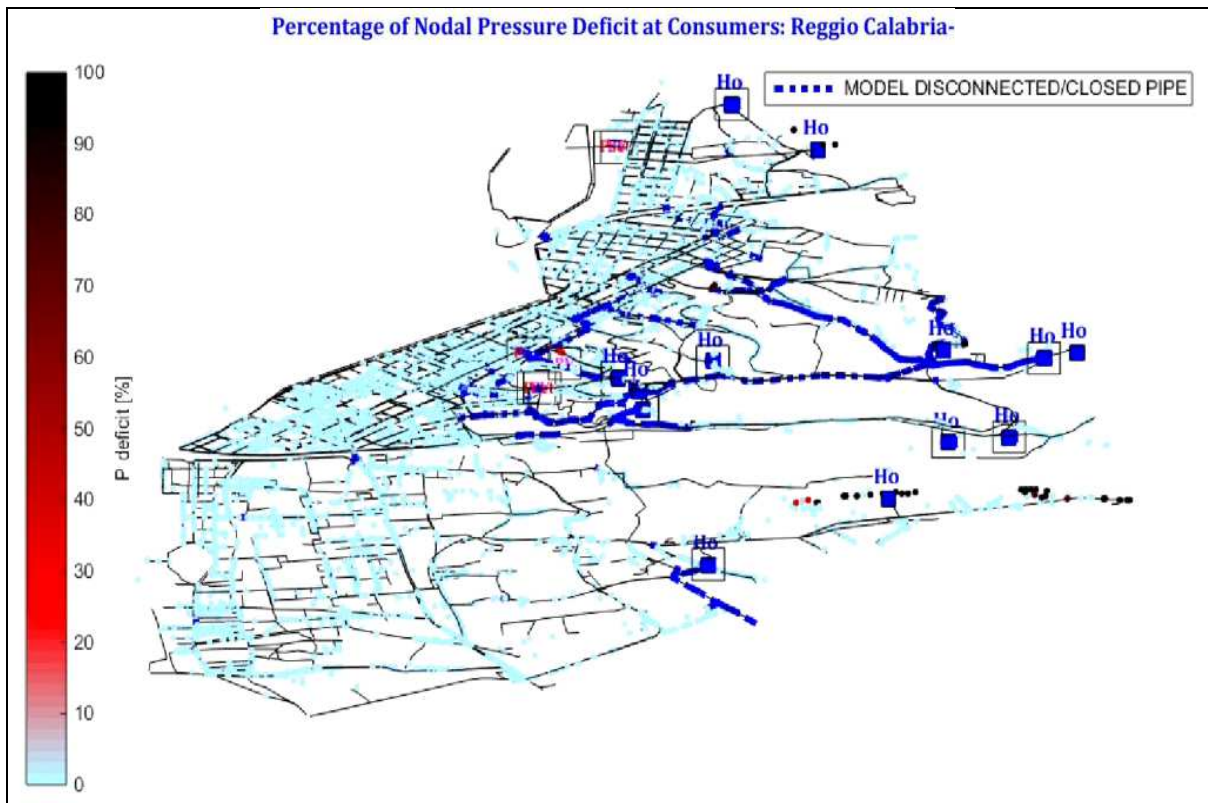


Fig.201. Percentuale UtENZE in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.10

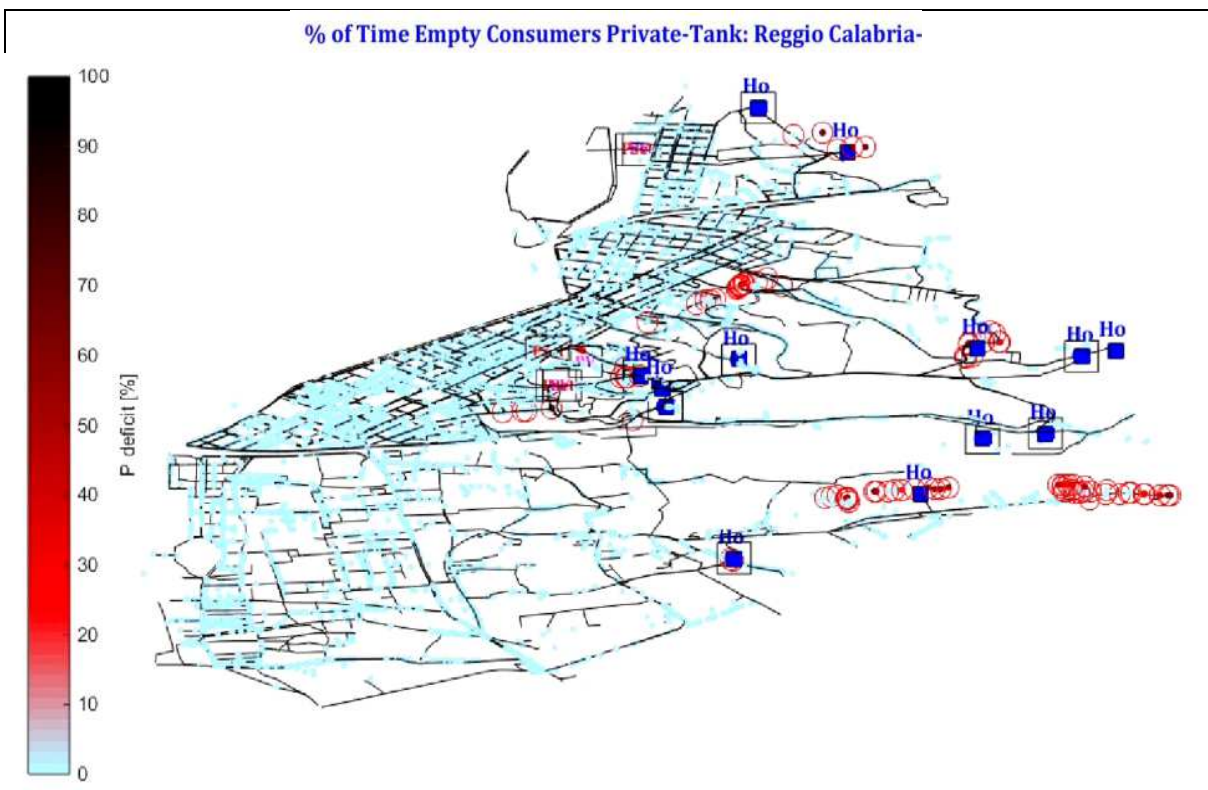


Fig.202. Percentuale di tempo singole UtENZE in “deficit” di pressione – Piano di Riabilitazione n.10

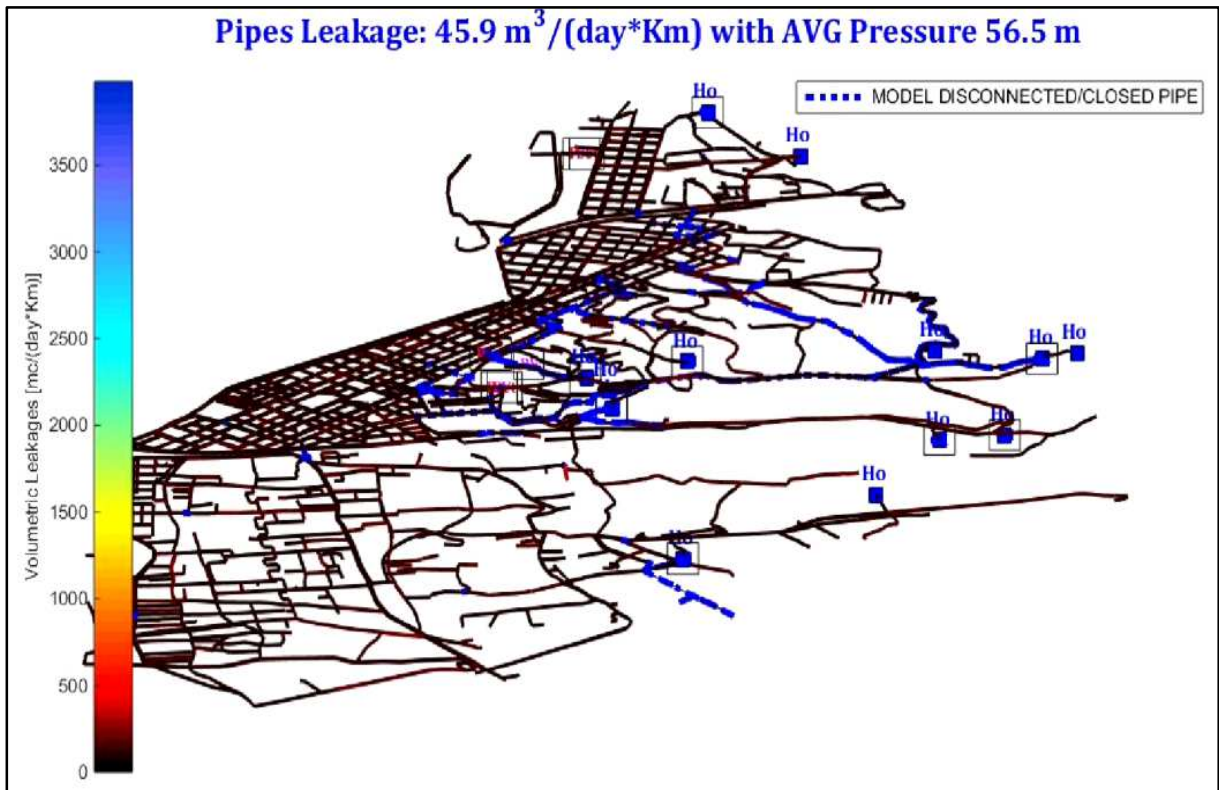


Fig.203. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo Macroindicatore M1a - Piano di Riabilitazione n.10

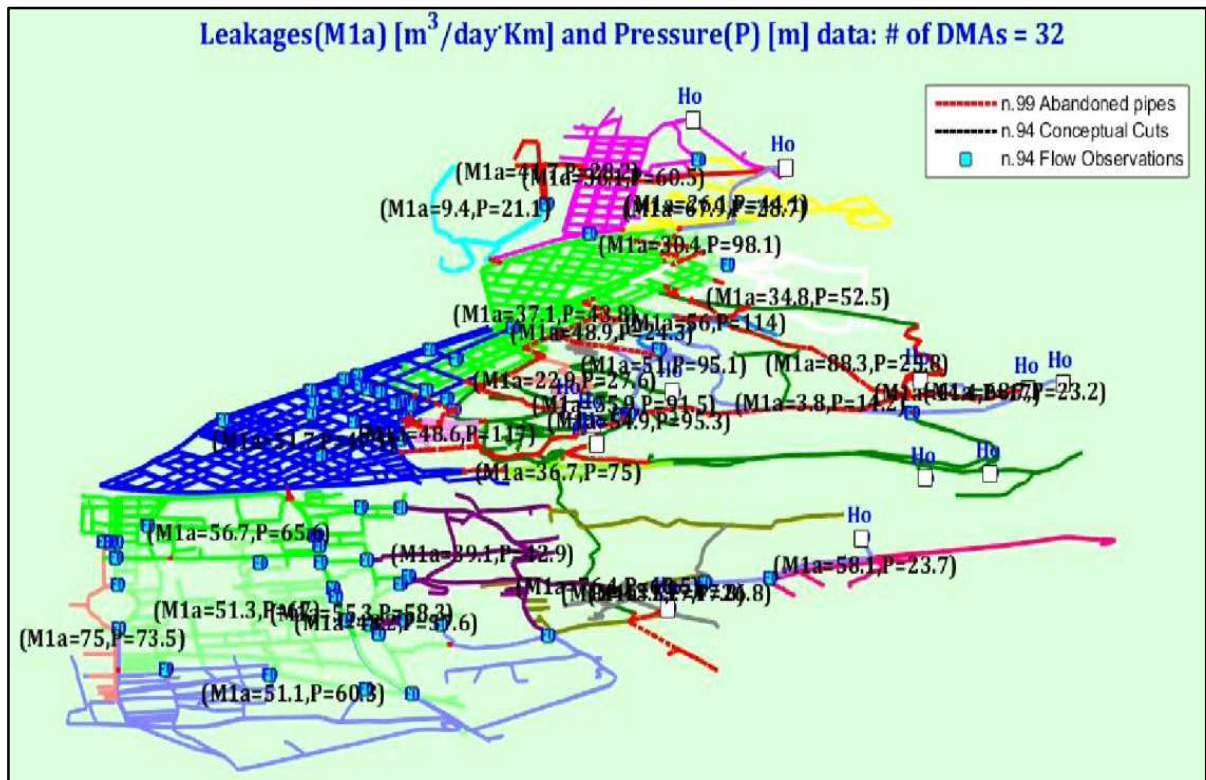


Fig.204. Distribuzione media perdite volumetriche e calcolo M1a nei DMA - Piano di Riabilitazione n.10

5.9. SINTESI dei RISULTATI OTTENUTI dalla SIMULAZIONE IDRAULICA SVILUPPATA nelle DIVERSE CONFIGURAZIONI della RETE ACQUEDOTTO

Vengono di seguito riportate le tabelle di sintesi dei risultati ottenuti, in termini di riduzione delle *perdite volumetriche*, dallo sviluppo della simulazione idraulica avanzata nelle diverse configurazioni di progetto, rispetto alle perdite reali attuali, calcolate nel modello idraulico calibrato della rete della Città di Reggio Calabria.

TABELLA DI SINTESI dei RISULTATI IDRAULICI NELLE DIVERSE CONFIGURAZIONI DI RETE							
CONFIGURAZIONE DI RETE	PRESSIONE MEDIA in rete [mt]	M1a [mc/km/g]	M1b [%]	Perdite Volumetriche [mc/g]	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
					[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
Modello Calibrato - Rete Esistente	56,20	122,80	67,66	39'164	-	-	-
Progetto DMA e Controllo delle Pressioni PCV	48,90	109,08	65,02	34'786	4'378	1'597'970	11,18%
Piano di Riabilitazione n.1 - 2%	51,50	89,61	60,42	28'577	10'587	3'864'255	27,03%
Piano di Riabilitazione n.2 - 4%	52,50	79,30	57,47	25'289	13'875	5'064'375	35,43%
Piano di Riabilitazione n.3 - 6%	53,50	72,01	55,09	22'964	16'200	5'913'000	41,36%
Piano di Riabilitazione n.4 - 8%	54,10	67,12	53,35	21'406	17'758	6'481'670	45,34%
Piano di Riabilitazione n.5 - 10%	54,70	62,24	51,48	19'856	19'308	7'047'420	49,30%
Piano di Riabilitazione n.6 - 12%	55,10	58,18	49,78	18'555	20'609	7'522'285	52,62%
Piano di Riabilitazione n.7 - 14%	55,40	54,62	48,21	17'420	21'744	7'936'560	55,52%
Piano di Riabilitazione n.8 - 16%	55,80	51,50	46,74	16'424	22'740	8'300'100	58,06%
Piano di Riabilitazione n.9 - 18%	56,20	48,60	45,30	15'499	23'665	8'637'725	60,43%
Piano di Riabilitazione n.10 - 20%	56,50	45,92	43,89	14'643	24'521	8'950'165	62,61%

Fig.205. Sintesi dei risultati idraulici ottenuti nelle diverse configurazioni della rete acquedotto di Reggio Calabria

Dall'analisi dei risultati idraulici è da evidenziare che nella configurazione di progetto ottenuta sulla base del progetto di *distrettualizzazione idraulica* della rete, attuata esclusivamente mediante una riconfigurazione dei flussi idrici del sistema ed un controllo delle pressioni in rete con l'inserimento di n.3 valvole di riduzione PCV in punti specifici del sistema acquedotto, si è passati da un valore di perdite volumetriche di rete (*Volume Background Leaks*) di 39.164mc/giorno, nella condizione attuale, ad un valore di **34.786mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **4.378 mc/giorno**, corrispondente ad un recupero complessivo annuale pari a circa **1.597.970mc** e ad una riduzione percentuale pari all'**11,18%**.

TABELLA DI SINTESI dei RISULTATI IDRAULICI - PIANI DI RIABILITAZIONE DI PROGETTO									
PIANO DI RIABILITAZIONE	CONDOTTE SOSTITUITE			PRESSIONE MEDIA in rete [mt]	MIa [mc/km/g]	Perdite Volumetriche [mc/g]	RECUPERO di RISORSA IDRICA		
	Numero	Lunghezza [km]	Costo [€]				[mc/g]	[mc/anno]	Riduzione [%]
N.1	21	6,027	1'726'955.00 €	51,50	89,61	28'577	10'587	3'864'255	27,03%
N.2	45	12,809	3'733'208.00 €	52,50	79,30	25'289	13'875	5'064'375	35,43%
N.3	71	20,014	5'765'408.00 €	53,50	72,01	22'964	16'200	5'913'000	41,36%
N.4	95	25,742	7'425'622.00 €	54,10	67,12	21'406	17'758	6'481'670	45,34%
N.5	129	32,288	9'276'708.00 €	54,70	62,24	19'856	19'308	7'047'420	49,30%
N.6	157	38,310	11'110'653.00 €	55,10	58,18	18'555	20'609	7'522'285	52,62%
N.7	210	44,785	12'962'372.00 €	55,40	54,62	17'420	21'744	7'936'560	55,52%
N.8	246	51,316	14'837'035.00 €	55,80	51,50	16'424	22'740	8'300'100	58,06%
N.9	310	57,926	16'735'233.00 €	56,20	48,60	15'499	23'665	8'637'725	60,43%
N.10	350	64,464	18'691'890.00 €	56,50	45,92	14'643	24'521	8'950'165	62,61%

Fig.206. Sintesi dei risultati idraulici ottenuti per i diversi Piani di Riabilitazione di progetto

Dall'analisi dei risultati idraulici ottenuti per i n.10 diversi *piani di riabilitazione* delle condotte della rete di progetto, predisposti imponendo un costo di intervento variabile tra il 2% ed il 20% del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria ed utilizzando un criterio di scelta delle tubazioni da sostituire che restituisca la maggiore *efficienza* in termini di rapporto tra perdite lineari (MIa della singola condotta sostituita) e costo di sostituzione della condotta stessa, è da evidenziare che:

- ✓ Nel *Piano di Riabilitazione n.1*, con un costo di investimento stimato pari ad **€.1.726.955,00** e la sostituzione di circa **6,27km** delle tubazioni maggiormente deteriorate di rete, si passa da un valore di perdite volumetriche di sistema (*Volume Background Leaks*) di 39.164mc/giorno, nella condizione attuale, ad un valore di **28.577mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **10.587mc/giorno**, corrispondente ad un recupero complessivo annuale pari a circa **3.864.255mc** e ad una riduzione percentuale pari all'**27,03%**.
- ✓ Nel *Piano di Riabilitazione n.10*, con un costo di investimento stimato pari ad **€.18.691.890,00** e la sostituzione di circa **64,464km** di tubazioni maggiormente deteriorate di rete, si passa da un valore di perdite volumetriche di sistema (*Volume Background Leaks*) di 39.164mc/giorno, nella condizione attuale, ad un valore di **14.643mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **24.521mc/giorno**, corrispondente ad un recupero complessivo annuale pari a circa **8.950.165mc** e ad una riduzione percentuale pari all'**62,61%**.

5.10. CONCLUSIONI E POSSIBILI FUTURI SVILUPPI

La modellazione numerica di reti idriche rappresenta un punto di riferimento indispensabile per una corretta *gestione* dei sistemi acquedottistici, oltre che un supporto essenziale per i gestori delle reti.

Soprattutto in questo periodo storico in cui risulta necessario garantire un uso più *razionale* della “*risorsa idrica*”, bene primario “collettivo” ed “economico” tutt’altro che illimitato, la *modellazione numerica avanzata* delle reti acquedotto rappresenta lo *strumento base* per lo sviluppo della *transizione digitale*, attraverso la quale poter *contenere gli sprechi* e le *perdite fisiche reali* e poter pianificare in modo ottimale, *efficace* ed *efficiente*, gli interventi infrastrutturali necessari per la riabilitazione delle reti, da attuarsi nel tempo in funzione del budget economico a disposizione del Gestore (*pianificazione dei Piani di Riabilitazione*).

Il tema di ricerca trattato risulta, pertanto, di interesse sia in campo scientifico che in campo professionale (*Pubbliche Amministrazioni, Enti Gestori del Sistema Idrico Integrato, progettisti*) in quanto sono stati approfonditi, in particolar modo con l’applicazione eseguita per il caso-studio applicato alla rete acquedotto della Città di Reggio Calabria, i diversi fenomeni idraulici e studiati i principali parametri e fattori tecnico-costruttivi che influenzano l’ottimale funzionamento dei sistemi idrici, con particolare riferimento alle *perdite fisiche* esistenti all’interno delle reti di distribuzione.

Lo sviluppo di una modellizzazione idraulica avanzata delle reti (di tipo “*pressure-driven*”) finalizzata alla minimizzazione delle perdite fisiche, supportata da una adeguata ingegnerizzazione e modellazione numerica della rete, può dare la possibilità al Gestore del Sistema Idrico Integrato di poter ottimizzare le scelte di carattere *tecnico-economico* e *gestionale* del sistema, garantendo un controllo attivo dell’acquedotto ed una più efficace pianificazione degli interventi.

L’approccio di *asset management* e l’*iter metodologico* proposto nella presente tesi è stato concepito al fine di aumentare la robustezza dell’iter decisionale e progettuale, con particolare riferimento alla *distrettualizzazione della rete*, ad un *controllo efficace delle pressioni* e ad una *pianificazione ottimale della riabilitazione delle condotte*.

La *modellizzazione fenomenologica avanzata del comportamento idraulico della rete acquedotto reale* riveste, pertanto, il ruolo di *strumento metodologico* di supporto

fondamentale alle diverse attività di gestione e progettazione della riabilitazione delle reti acquedotto.

Vengono in tal modo superati i limiti della *modellazione classica*, di EPANET e dei software package commerciali basati su tale motore di calcolo idraulico, consentendo di poter considerare le *perdite volumetriche* in funzione della *pressione media*, a livello delle singole condotte ed, in generale, il funzionamento più realistico del sistema.

Alla base dell'*iter metodologico* proposto vi è, pertanto, la modellazione idraulica avanzata della rete acquedotto che, nella presente tesi di dottorato, è stata effettuata utilizzando i servizi di *Digital Water* attraverso la modellazione del gemello digitale (*Digital Twin*) della rete reale, generato dalla piattaforma WNetXL. Il *Digital Twin* della rete acquedotto studiata ha fornito una rappresentazione digitale della *topologia* e del *comportamento idraulico del sistema*, integrata in ambiente GIS con geo-referenziazione di tutti gli elementi del sistema, inclusi i contatori di utenza attivi e non attivi, utile per le finalità progettuali e gestionali.

Nel caso reale della rete di Reggio Calabria sono state considerate, ad esempio, le differenti tipologie di utenza presenti nella rete acquedotto (reali altezze geodetiche dei singoli contatori *georeferenziati*, autoclavi con serbatoi privati, etc.) ed anche le condizioni di *pressione insufficiente* per il corretto servizio alle utenze stesse.

L'utilizzo di procedure di ottimizzazione multi-obiettivo e vincolate ha consentito, basandosi su analisi idrauliche avanzate e con particolare attenzione alle componenti che determinano i *bilanci idrici di massa*, di poter ottenere soluzioni progettuali *efficienti* (nel rapporto costi/benefici) ed *efficaci* (vincolate alle specificità dei singoli acquedotti), ma anche *robuste* e *flessibili* nell'applicazione, di supporto sia alle scelte progettuali che in prospettiva gestionale per il Gestore.

A conferma di quanto sopra riportato, le analisi idrauliche effettuate nel caso-studio della rete acquedotto di Reggio Calabria a supporto della “*gestione*” del sistema, hanno mostrato le potenzialità dell'*iter metodologico* proposto; sono stati infatti ottenuti dallo sviluppo delle simulazioni idrauliche avanzate delle diverse *configurazioni di progetto* della rete, ampi margini di recupero delle perdite attuati mediante la “*distrettualizzazione idraulica*” ed un “*controllo efficace delle pressioni*” seguito dalla “*sostituzione pianificata ed ottimizzata delle condotte*” (Piani di Riabilitazione di Progetto).

Dall'analisi dei risultati idraulici, riportati in sintesi al paragrafo 5.9, è da evidenziare che nella configurazione di progetto ottenuta esclusivamente mediante una *riconfigurazione dei flussi idrici del sistema* ed un *controllo delle pressioni in rete*, si è passati da un valore di perdite volumetriche di rete (*Volume Background Leaks*) di 39.164mc/giorno, nella condizione attuale, ad un valore di **34.786mc/giorno**, con un recupero giornaliero di risorsa idrica pari a **4.378 mc/giorno**, corrispondente ad un recupero complessivo annuale pari a circa **1.597.970mc** e ad una riduzione percentuale di perdite volumetriche pari all'**11,18%**.

Per quanto attiene invece i risultati ottenuti attraverso la progettazione dei diversi **Piani di Riabilitazione**, predisposti imponendo un costo di intervento variabile tra il **2%** ed il **20%** del costo complessivo di sostituzione di tutte le condotte esistenti della rete acquedotto di Reggio Calabria, si sono ottenuti recuperi complessivi annuali di risorsa idrica compresi tra i **3.864.255mc** (*Piano di riabilitazione n.1 corrispondente ad un costo di investimento stimato pari ad €1.726.955,00 con la sostituzione di circa 6,27km delle tubazioni*) ed i **8.950.165mc** (*Piano di riabilitazione n.10 corrispondente ad un costo di investimento stimato pari ad €18.691.890,00 con la sostituzione di circa 64,464km delle tubazioni*).

Le analisi e le verifiche idrauliche effettuate all'interno del caso-studio della rete acquedotto di Reggio Calabria, sviluppato in base alle ipotesi semplificative puntualmente riportate al paragrafo 5.1 a causa della carenza di dati e misure di campo della rete esistente, rivestono il valore di un valido "*caso reale*" di studio "*dimostrativo*" della potenziale *efficacia* e della *efficienza* della metodologia strutturata proposta. Da tale studio sono stati, infatti, ottenuti risultati idraulici verosimili rispetto alla configurazione nota della rete acquedotto. È comunque opportuno precisare che senza l'ausilio di ulteriori approfondimenti di campo inerenti la rete reale "*struttura topologica esistente*" e senza specifiche "*misure di portate e pressioni orarie*" da effettuarsi sui nodi della rete acquedotto, i risultati ottenuti non sono, al momento, completamente utilizzabili per supportare in modo ottimale attività gestionale e/o progettuale del sistema.

La razionalità della **metodologia strutturata** proposta nella presente tesi è stata definita e sviluppata per essere *replicabile* e per rispondere alle specificità delle *reti calabresi* utilizzando i dati disponibili e sulla base di assunzioni tecnicamente coerenti con il contesto reale. I risultati dell'applicazione hanno permesso di evidenziare le opportunità offerte dalla *transizione digitale* per la *gestione delle reti idriche*, quale infrastruttura strategica per la crescita socio-economica e sostenibile del territorio.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Todini, E. and Pilati, S. (1988). A gradient method for the solution of looped pipe networks. *Computer Applications in Water Supply*, John Wiley & Sons, Vol.1, 1-20
- Todini, E. (2003). A more realistic approach to the “extended period simulation” of water distribution networks. *Advances in Water Supply Management*, 173-184
- Giustolisi, O., Savic, D.A., Kapelan, Z. (2008). Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. *J. Hydr. Eng.*, 134
- ARERA (2017) Deliberazione 27 Dicembre 2017 917/2017/R/IDR “Regolazione della Qualità Tecnica del Servizio Idrico Integrato ovvero di ciascuno dei singoli servizi che lo compongono (RQTI)
- Giustolisi, O. & Walski, T.M. 2012 A Demand Components in Water Distribution Network Analysis. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 138(4), 356 -367
- Wagner, J.M., Shamir, U. & Marks, D.H. 1988 Water distribution reliability: simulation methods. *J. Water Res. Plan. Manage.*, 114(3), 276–294
- Laucelli, D., Simone, A., Berardi, L., Giustolisi, O. (2017). Optimal Design of DMAs for Leakages Reduction. *J. Water Res. Plan. Manage.* 143
- Giustolisi, O., Ridolfi, L. (2014). A new modularity-based approach to segmentation of water distribution network. *J. Hydr., Eng.*, 140
- Giustolisi, O., Ridolfi, L. (2014). A novel infrastructure modularity index for the segmentation of water distribution networks. *Water Resource Research*, 50
- Simone, A., Giustolisi, O., Laucelli, D. (2016). A proposal of optimal sampling design using a modularity strategy. *Water Resource Research*, 52
- Simone, A., Laucelli, D., Berardi, L., Giustolisi, O. (2017). Modularity index for optimal sensor placement in WDNs. *SimHydro 2017: Choosing the right model in applied hydraulics*, 14-16 June 2017, Sophia Antipolis
- Laucelli D., Berardi L., Ugarelli, R., Simone A., Giustolisi O. (2016) Supporting Real-time Pressure Control in Opegård Municipality with WDNNetXL. In: “12th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2016) - Smart Water for the Future” *Procedia Engineering*, 154, 71-79
- Giustolisi, O., Berardi, L., & Laucelli, D. 2012a Accounting for directional devices in WDN modeling. *J. Hydr. Eng.*, 138(10), 858-869
- Giustolisi, O., Berardi, L., Laucelli, D. 2014 Modeling local water storages delivering customer-demands in WDN models, *J. Hydr. Eng.*, 140(1), 89-104
- Girvan, M. & Newman, M., 2002, Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 (12), 7821–7826

-
- Giustolisi, O., Ridolfi, L., Simone, A. (2019). "Tailoring Centrality Metrics for Water Distribution Networks." *Water Resource Research*, USA., 55, 2348–2369
 - Simone A., Ciliberti F.G., Laucelli D.B., Berardi L., Giustolisi O. (2020) Edge between-ness for water distribution networks domain analysis. *Journal of Hydroinformatics*, IWA-IAHR, UK, 22 (1): 121–131
 - ARERA - Autorità per l'energia elettrica, il gas e il sistema idrico, Volume I stato dei servizi, Relazione annuale sullo stato dei servizi – Volume I, 2019
 - ISTAT, Giornata mondiale dell'acqua, le statistiche dell'Istat, 2019
 - REGIONE CALABRIA – Allegato al Decreto n.552 del 3/02/2016 - Programma di lavoro di avvio della procedura di affidamento della nuova concessione di gestione del Sistema Idrico Integrato dell'ATO Regione Calabria, 2016
 - IRETI, Acquedotti dati anno 2016
 - Todini, E. and Pilati, S. (1988). A gradient method for the solution of looped pipe networks. *Computer Applications in Water Supply*, John Wiley & Sons, Vol.1
 - Todini, E. (2003). A more realistic approach to the "extended period simulation" of water distribution networks. *Advances in Water Supply Management*
 - Giustolisi, O., Savic, D.A., Kapelan, Z. (2008). Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. *J. Hydr. Eng.*
 - Giustolisi, O. & Walski, T.M. 2012 A Demand Components in Water Distribution Network Analysis. *J. Water Resour. Plan. Manage.*
 - Wagner, J.M., Shamir, U. & Marks, D.H. 1988 Water distribution reliability: simulation methods. *J. Water Res. Plan. Manage.*
 - Becciu G., Paoletti A., "Fondamenti di costruzioni idrauliche", Utet Scienze Tecniche, 2010.
 - Di Natale M. (2008) La distrettualizzazione delle reti idriche per il controllo delle perdite: il sito pilotadi Monterusciello (Pozzuoli). *Atti del convegno "Aspetti economici e tecnici nella gestione delle reti di distribuzione idrica"*, Ferrara
 - Brand, W. (2008). Prelocalizzazione e localizzazione delle perdite mediante tecniche acustiche e di altro tipo. In B. Brunone, M. Ferrante, & S. Meniconi, *Ricerca e controllo delle perdite nelle reti di condotte* (p. 276-332). Città Studi Edizioni.
 - Fantozzi, M. (2008). Bilancio idrico e indicatori di performance per la gestione delle perdite secondo l'approccio dell'International Water Association (IWA. In B. Brunone, M. Ferrante, & S. Meniconi, *Ricerca e controllo perdite reti di condotte* . Città Studi Edizioni.
 - Artina S., Naldi G., Marchi A., Bragalli C., Lenzi C., Liserra T., Dal controllo della pressione al recupero energetico nei sistemi di distribuzione idrica, *Atti del XXXI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Perugia, 2008.

- Bovolín, V., Lubritto, M., & Villani, P. (2007). Analisi delle perdite in un sistema di distribuzione idrica in pressione: relazione tra leggi di efflusso locale e globale. Atti del III seminario su "La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto". Perugia.
- EPA. (2006), Real Time Control of Urban Drainage Networks. EPA.
- Milano V. (2006), Dipendenza delle perdite di una tubazione dalla pressione di esercizio
- Araujo L.S., Ramos H., Coelho S.T., Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management, Water Resources Management, 2006.
- Artina S., Bragalli C., Liserra T., Mazzei A., Resenterra M., Scoppa C., Sfarcich B., Strategie di riduzione delle perdite idriche attraverso DSS (Sistemi di Supporto alle Decisioni), Estratto de L'Acqua, 3/2006.
- Luigi Da Deppo, Claudio Datei, Virgilio Fiorotto e Paolo Salandin, "Acquedotti", Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Idraulica, 2005.
- Artina S., Bragalli C., Giunchi D., Liserra T., Stima delle perdite idriche proposta dal DM 99/97 e da IWA con monitoraggio in telelettura, Atti del I Convegno Nazionale di Idraulica Urbana-Acqua e Città, Sorrento, 2005.
- Cascetta F., Di Nardo A., Di Natale M. (2004) - Distrettualizzazione delle reti idriche: riflessioni e indicazioni metodologiche, Atti del convegno "Verso una gestione più efficiente delle perdite nei sistemi idrici secondo l'approccio della International Water Association (IWA), Genova
- Gilardoni A., Marangoni A., "Il settore idrico italiano: Strategie e modelli di businnes", FrancoAngeli, 2004.
- Artina, S., Bragalli, C., & Sacchi, S. (2003). Simulazione perdite, domanda vincolata ed erogazione turnata. Seminario su "La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto" (p. 17-31). Perugia: Morlacchi Editore.
- Farley, M., & Trow, S. (2003). Losses in water distribution networks. A practitioner's guide to assessment, monitoring and control. Londra: IWA Publishing.
- Rossman L.A., Epanet 2, Users manual, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, 2000
- Milano V. (2000), Acquedotti - Guida alla progettazione – Hoepli.
- D.Citrini, G. Noseta, "Idraulica", Istituto di Idraulica del Politecnico di Milano, 2000.
- D.M. LL.PP. 08.01.1997, n.99, Regolamento sui criteri e sul metodo in base ai quali valutare le perdite degli acquedotti e delle fognature, G.U. 18.04.1997, n.90. (1999).
- D.P.C.M. 04.03.1996, Disposizioni in materia di risorse idriche, G.U. 14.03.1996, n.62. (1996).
- G. Ippolito, "Appunti di costruzioni idrauliche", Liguori, 1995.
- Legge 5.01.1994, n.36 e s.m.i., Disposizioni in materia di risorse idriche, G.U. 19.01.1994, n.14.