POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

ANALISI DEL COMPORTAMENTO IDRAULICO DI RETI ACQUEDOTTISTICHE

STUDIO DELLA RETE IDRICA DI REALTOWN

POLITECNICO
DI TORINO

Relatore
Prof. Fulvio Boano

Correlatore:
Prof. Luca Ridolfi

Laureando
Alex Mango

Luglio 2018

Sommario

Lo sviluppo tecnologico ha permesso l'apertura di nuovi orizzonti e metodologie per la gestione di reti acquedottistiche esistenti e per la realizzazione di nuovi tratti. In tale ambito, la modellazione numerica occupa sicuramente una posizione di primo piano e consente la nascita di nuove applicazioni. Coerentemente con quanto sopra delineato, l'oggetto di questa tesi è lo studio del comportamento idraulico di una rete che serve un comune di circa 50'000 abitanti. L'analisi è condotta da un punto di vista statistico e si basa sul modello numerico della rete suddetta, il quale è stato realizzato nell'ambito di una tesi di dottorato, in collaborazione con Smat. Lo scopo è quello di analizzare, con l'aiuto di strumenti statistici di base, il comportamento nello spazio e nel tempo delle principali grandezze idrauliche. Successivamente vengono analizzate le correlazioni che sussistono fra i vari elementi della rete, al fine di valutarne il comportamento globale e locale e di comprenderne il funzionamento in modo dettagliato. Il fine ultimo è quello di dimostrare la complessità del sistema dinamico acquedotto e confutare la credenza diffusa che lo fa apparire come un semplice sistema di condotte aventi lo scopo di trasportare l'acqua da un punto A (la zona di produzione) ad un punto B (l'utente finale).

Ringraziamenti

Indice

Elenco delle tabelle v

Elenco delle figure vi

1 INTRODUZIONE 1
1.1 Struttura della tesi 2

2 I SISTEMI DINAMICI 5
2.1 Cenni sui software di modellazione di reti idriche 7
2.1.1 Il software EPANET 8

3 CASO STUDIO: LA RETE ACQUEDOTTISTICA DI REALTOWN 11
3.1 Descrizione della rete 11
3.2 Componenti del sistema 13
3.3 Schema di funzionamento 21

4 RISULTATI DELLE ANALISI 24
4.1 Analisi di input, forzanti ed output 24
4.1.1 Analisi degli input: domande ai nodi 24
4.1.2 Analisi delle forzanti: pompe e serbatoi 29
4.1.3 Analisi degli output: pressioni e portate 32
4.2 Analisi delle correlazioni 37

5 CONCLUSIONI GENERALI 52

A 55
A.1 Correlazioni livelli-pressioni e livelli-portate: influenza della distanza . 58
A.2 Influenza delle pompe 66

Bibliografia 70

Elenco delle tabelle

3.1 Portate medie emunte dai pozzi e profondità 14
3.2 Potenza nominale delle pompe e loro collocazione 15
3.3 Regole di accensione e spegnimento delle pompe 20

Elenco delle figure

2.1 Modello della rete idrica: le domande costituiscono gli input del sistema. I livelli dei serbatoi, insieme alle prevalenze e alle portate delle pompe influenzano la distribuzione nello spazio e nel tempo degli output, rappresentati da pressioni e portate in rete. 6
2.2 Pattern delle domande 6
2.3 Interfaccia grafica di EPANET 8
3.1 Zone di produzione, stoccaggio e pompaggio 12
3.2 Distribuzione dei diametri delle condotte 13
3.3 Curve caratteristiche delle pompe di pescaggio dai pozzi 16
3.4 Curve di rendimento delle pompe di pescaggio dai pozzi 17
3.5 Curve caratteristiche delle pompe di rilancio 18
3.6 Curve di rendimento delle pompe di rilancio 19
3.7 Schema di funzionamento della rete 22
4.1 Componenti del bilancio idrico proposto dall'IWA 25
4.2 Andamento temporale delle domande 26
4.3 Richieste idriche medie giornaliere 27
4.4 Deviazioni standard delle domande 27
4.5 Percentili delle domande ai nodi; la curva rossa rappresenta la cumulata delle domande medie, mentre la curva blu tiene conto delle serie temporali delle domande nelle 24 ore per ciascun nodo. 28
4.6 Carichi idraulici medi imposti da pompe e serbatoi, espressi in metri s.l.m. 30
4.7 Deviazioni standard dei carichi imposti da pompe e serbatoi, espresse in metri s.l.m. 31
4.8 Percentili dei carichi imposti da pompe e serbatoi: la curva rossa tiene conto dei soli valori medi dei carichi, mentre la curva blu prende in considerazione le serie temporali dei livelli di ciascun serbatoio e di ciascuna pompa 32
4.9 Pressioni medie (sopra) e portate medie (sotto) 33
4.10 Deviazioni standard delle pressioni (sopra) e delle portate (sotto) . . 35

4.11 Percentili delle pressioni (sopra) e delle portate (sotto): le curve blu rappresentano le distribuzioni cumulate dei valori medi, mentre le curve rosse tengono conto di tutti i valori di pressioni e portate nelle 24 ore. 36
4.12 Coefficienti di correlazione domande-pressioni (sopra) e domande-portate (sotto): la legenda indica l'entità delle correlazioni 38
4.13 Serie temporali di domande e pressioni 39
4.14 Serie temporali standardizzate di domande e portate 40
4.15 Serie temporali standardizzate di domande e livelli 41
4.16 Correlazione livelli-pressioni (sopra) e livelli-portate (sotto) per il serbatoio H40: la legenda indica l'entità delle correlazioni 42
4.17 Correlazione livelli-pressioni (a sinistra) e livelli-portate (a destra) per il serbatoio H10 43
4.18 Serie temporali standardizzate di pressioni e portate per il nodo 2215 e la condotta 9448044: confronto con i livelli del serbatoio H10 (figure a e b) e H40 (figure c e d) 44
4.19 Distribuzioni cumulate dei coefficienti di correlazione livelli-pressioni (sopra) e livelli-portate (sotto) 45
4.20 Influenza della pompa G11 (sopra) ed M18 (sotto) rispettivamente sulle pressioni e sulle portate della zona sud orientale 47
4.21 Influenza della pompa G61 su pressioni (sopra) e portate (sotto) . . . 48
4.22 Serie temporali standardizzate di pressioni e portate per i nodi 1290, 1519 e le condotta 9477634, 9443372: confronto con le prevalenze e le portate delle pompe G11, M18 e G61 49
4.23 Correlazione fra pattern delle domande e portate pompa G61: serie temporali standardizzate 50
A.1 Coefficienti di correlazione livelli-pressioni (sopra) e livelli-portate (sotto) per il serbatoio H20 56
A.2 Coefficienti di correlazione livelli-pressioni (sopra) e livelli-portate (sotto) per il serbatoio H41 57
A.3 Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-pressioni per il serbatoio H10 59
A.4 Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-pressioni per il serbatoio H20 60
A.5 Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-pressioni per il serbatoio H40 61
A.6 Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-pressioni per il serbatoio H41 62
A.7 Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-portate per il serbatoio H10 63

A.8 Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-portate per il serbatoio H20 64
A.9 Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-portate per il serbatoio H40 65
A.10 Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-portate per il serbatoio H41 66
A.11 Correlazione prevalenze-portate (sopra) e portate-portate (sotto) per la pompa M41 67
A.12 Influenza della pompa M41 sulle portate delle condotte 9458134 (a), (b) e Sist113 (c), (d) 68

Non conosciamo mai il valore dell'acqua finché il pozzo non si prosciuga.

[T. Fuller]

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Lo stato di vetustà in cui versa la maggiorparte delle reti di distribuzione idropotabile, ne rende spesso incomprensibile ed oscuro il reale funzionamento delle stesse ed è la causa delle principali inefficienze che spesso e volentieri riempiono le pagine della cronaca. Uno dei maggiori problemi è la endemica scarsità di apparecchiature di misura e controllo. Moltissimi acquedotti sono privi dei più elementari mezzi di controllo di portate e pressioni in gioco e, quando anche presenti, tali mezzi sono per lo più affetti da irregolarità dovute alla mancata manutenzione. Non è infatti raro imbattersi in strumenti che, funzionando da decenni senza essere mai stati assoggettati alle indispensabili operazioni di controllo e taratura, forniscono false informazioni sui dati di esercizio reale. Anche i contatori delle utenze private, dopo una decina di anni dalla loro installazione non possono garantire dei buoni risultati e denunciano difetti che portano poi a trascurare tutti i piccoli prelievi. Pertanto, sussiste molta incertezza sull'entità dei volumi d'acqua in gioco e da ciò derivano inevitabili errori in tutte le determinazioni tecniche ed economiche di gestione degli impianti.

Argomento di forte attualità ed impatto politico è quello delle perdite, spesso affrontato sulle pagine dei principali quotidiani. Si riporta un estratto dell'articolo uscito su *La Repubblica*, del 27 maggio 2016:

L'Italia degli acquedotti è ridotta male. Le reti sono un colabrodo: la media di perdite del nostro Paese è del 40% di acqua anche se, scendendo nello specifico, si trovano punte di eccellenza e picchi di cattive pratiche. Utilitalia (la federazione delle imprese di acqua, energia, ambiente) è chiara nel dire che servirebbero investimenti di almeno 5 miliardi all'anno per una rigenerazione, riparazione e manutenzione della rete, e per opere ormai necessarie.

Ansa, in un articolo del 31 gennaio 2017, denuncia quanto segue:

Le reti presentano un elevato grado di vetustà, tanto che il 60% delle infrastrutture è stato messo in posa oltre 30 anni fa (percentuale che sale al 70% nei grandi

centri urbani); il 25% di queste supera i 50 anni (arrivando al 40% nei grandi centri urbani)". Questo quanto emerge dal 'Blue Book' 2017, lo studio sul settore idrico promosso da Utilitalia (l'associazione delle imprese di acqua ambiente ed energia), realizzato dalla Fondazione Utilitatis con il contributo di Cassa depositi e prestiti, e presentato oggi a Roma. "Le perdite delle reti degli acquedotti - si legge nella ricerca - hanno percentuali differenziate: al Nord ci si attesta al 26%, al Centro al 46% e al Sud al 45%".

Oppurtuno evidenziare come la questione delle perdite dipenda fortemente dalle pressioni di esercizio delle reti. Alte pressioni e forti escursioni delle stesse nell'arco della giornata causano infatti maggiori perdite. Ciò ribadisce l'importanza di sistemi di monitoraggio e controllo ai fini della gestione. Inoltre lo sviluppo tecnologico offre oggi la possibilità di creare modelli numerici delle reti che permettono di stimare tutte le grandezze idrauliche a partire da un numero limitato di misurazioni, oltre a consentire analisi più approfondite e dettagliate circa il funnzionamento del sistema.

Tutto quanto suddetto pone l'accento sulla scarsa coscienza che si ha circa la complessità di un sistema acquedottistico, concetto questo che verrà rimarcato più volte nel corso di questa monografia e rappresenta l'oggetto e lo scopo principale della tesi che, seppur di stampo prettamente teorico, offre uno spunto ai gestori del servizio idrico per la comprensione delle dinamiche che avvengono in una rete di distribuzione. Vista la scarsa reperibilità di modelli numerici di reti reali, la discussione è basata sul modello della rete di Realtown, la cui costruzione e calibrazione è stata oggetto di una tesi di dottorato, presso il Politecnico di Torino, in collaborazione con Smat, gestore della rete stessa. Quello che si auspica è una diffusione sempre più ampia della modellazione numerica in ambito acquedottistico, utile al gestore, a livello pratico, come strumento decisionale e a livello accademico per applicare analisi come quelle oggetto di questa tesi ad un numero sempre maggiori di reti realmente esistenti.

1.1 Struttura della tesi

Nella prima parte della presente monografia vengono forniti dei cenni circa la nascita della teoria dei sistemi dinamici e come essi possano descrivere al meglio una rete di distribuzione idropotabile (I SISTEMI DINAMICI). Si citano poi i software che utilizzano metodi numerici per risolvere i sistemi suddetti, con una breve descrizione sull'iter storico che ha portato alla nascita dei programmi più recenti. In ultimo viene effettuata una rapida esposizione del software EPANET, utilizzato nell'ambito della tesi. Successivamente si presenta in modo dettagliato la rete oggetto della discussione, fornendone dapprima una desrizione generale per poi descriverne tutte le componenti e lo schema di funzionamento (CASO STUDIO: LA RETE ACQUEDOTTISTICA DI REALTOWN). Il capitolo seguente (RISULTATI DELLE ANALISI) mostra i risultati delle analisi svolte sulla rete: si presentano gli studi relativi

ad input, forzanti ed output e le correlazioni fra gli stessi. Infine vengono esposte le conclusioni finali del lavoro (CONCLUSIONI GENERALI). L'appendice mostra ulteriori risultati che per non appesantire la trattazione si è ritenuto opportuno non inserire nel capitolo 4.

Capitolo 2

I SISTEMI DINAMICI

I sistemi dinamici sono modelli matematici di sistemi che variano nel tempo. Vengono descritti tramite una serie di variabili (il cui valore in un determinato istante determina lo stato del sistema) e da un insieme deterministico di regole che stabiliscono quale sarà il successivo stato futuro a partire da quello attuale (per esempio mediante un sistema di equazioni differenziali le cui variabili descrivono il sistema dinamico).

I Sistemi Dinamici costituiscono un ramo della Fisica Matematica, fortemente connesso ad altre discipline come Analisi Matematica, Meccanica Celeste e Meccanica Statistica soprattutto, ma anche Fluidodinamica, Ecologia, Economia, Chimica..., tra quelle che hanno avuto maggiore espansione negli ultimi tre o quattro decenni. Le basi della teoria vengono da lontano e si possono ricercare, principalmente, nell'opera di Poincaré (ma anche di Boltzmann) a fine '800. Il termine Dynamical Systems appare, forse per la prima volta, a titolo di un'opera di Birkhoff, nel 1927. La teoria dei Sistemi Dinamici decolla, con risultati fondamentali, grosso modo negli anni '50 del '900 (Smale, Kolmogorov...), e nel decennio successivo riceve il potente innesto degli studi condotti, principalmente da Fisici e astronomi, con metodi numerici: quello che Poincaré e pochi altri avevano compreso, si "vede" all'opera sullo schermo di un calcolatore; la fenomenologia appare a volte stupefacente, e un numero crescente di studiosi ne è interessato.

Il presente capitolo vuole mostrare la modellazione della rete idrica oggetto della tesi. Come si osserva nello schema di figura 2.1, il suo comportamento dinamico può essere descritto da un modello matematico, costituito da *input* ed *output*. L'evoluzione del sistema è inoltre influenzata dalle caratteristiche intrinseche del sistema stesso, rappresentate dalla *topologia*, oltre che dalla configurazione spaziale di pompe e serbatoi che costituiscono le cosiddette *forzanti*.

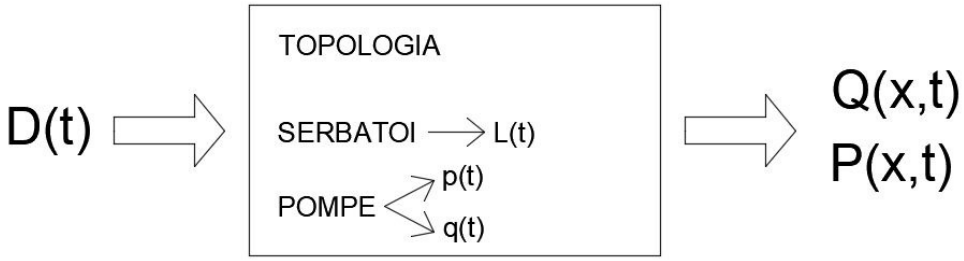


Figura 2.1: Modello della rete idrica: le domande costituiscono gli input del sistema. I livelli dei serbatoi, insieme alle prevalenze e alle portate delle pompe influenzano la distribuzione nello spazio e nel tempo degli output, rappresentati da pressioni e portate in rete.

Input: sono costituiti dalle domande ai nodi, ovvero dalle richieste idriche delle utenze. Esse devono essere determinate tramite modelli di previsione, nel caso di progetto di reti nuove, o attraverso misurazioni, nel caso di reti esistenti. Si osservi la sola dipendenza dal tempo: nel caso in esame si è infatti adottato un unico pattern per modulare le domande dell'intera rete. Ogni nodo è tuttavia caratterizzato da un proprio valore medio della richiesta e pertanto l'andamento delle domande risulterà scalato lungo l'asse delle ordinate. In figura 2.2 viene mostrato il pattern delle domande valido per l'intera rete. Si osservi che la richiesta media giornaliera è normalizzata a 1 e che il passo temporale utilizzato è di 15 minuti.

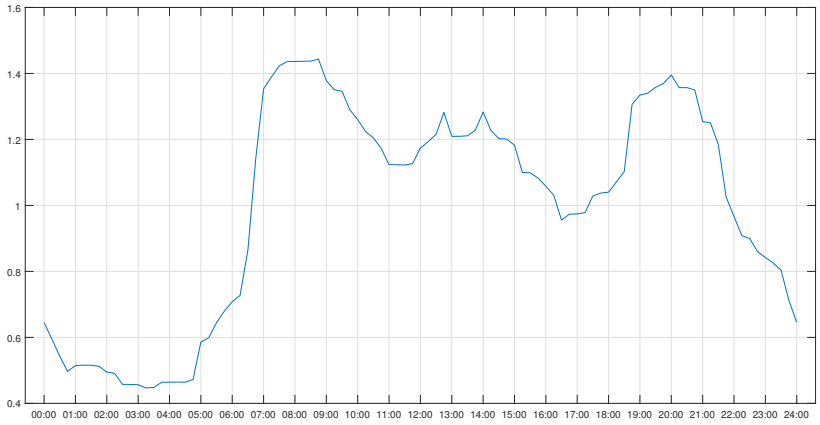


Figura 2.2: Pattern delle domande

Output: sono rappresentati dalle pressioni ai nodi a dalle portate circolanti nelle condotte e variano nello spazio e nel tempo. Ogni nodo del modello risulta

pertanto caratterizzato da una propria serie temporale delle pressioni, così come ogni condotta ne possiede una delle portate.

Caratteristiche intrinseche/forzanti: le caratteristiche intrinseche del sistema sono rappresentate dalla topologia, ovvero dall'andamento plano-altimetrico del territorio e di conseguenza della rete stessa, la quale dovrà seguire grosso modo le quote del terreno. Pompe e serbatoi costituiscono invece le forzanti del sistema. Sono così chiamate poichè fissano i carichi idraulici all'interno della rete in funzione della loro configurazione spaziale e delle regole di funzionamento.

Le grandezze sopra descritte costituiscono le variabili del modello, mentre le regole che permettono di descriverne lo stato in qualsiasi istante temporale sono rappresentate dalle equazioni dell'idrodinamica per moti in pressione. L'evoluzione del sistema è inoltre dettata a partire dalle condizioni iniziali, le quali sono costituite dai livelli dei serbatoi e dallo stato iniziale delle pompe.

Vista la natura complessa del sistema, la risoluzione viene affidata a software che utilizzano metodi numerici per determinare pressioni e portate in qualsiasi istante temporale, in qualsiasi punto della rete.

2.1 Cenni sui software di modellazione di reti idriche

I primi metodi numerici per il calcolo della portata in sistemi di distribuzione si collocano alla fine degli anni '30 del '900. Successivamente, a partire dai primi anni '80, cominciarono a realizzarsi numerosi programmi basati su tali metodi, fino all'avvento negli anni '90 di software commerciali come EPANET, MikeNet, Infoworks, Wadiso, ecc...

In un primo momento le capacità dei modelli idraulici erano piuttosto ridotte: le simulazioni erano condotte in regime di moto permanente, con le grandezze idrauliche che restavano costanti durante l'analisi. Un ulteriore passo avanti fu l'introduzione dei modelli EPS (Extended-Period simulation), mediante i quali è possibile considerare la variabilità nel tempo di alcune grandezze. Queste ultime possono essere, ad esempio, le richieste idriche ai nodi, i livelli nei serbatoi e lo stato di funzionamento di pompe e valvole. Grazie a queste innovazioni si possono determinare portate e pressioni in ogni istante di tempo, ovvero ottenere una storia temporale delle stesse. Inoltre è stato possibile implementare nuovi tipi di simulazione, come quella per il calcolo della qualità delle acque che permette di svolgere analisi quali la simulazione del comportamento di sostanze passive o reattive durante il loro trasporto all'interno della rete, il calcolo dell'invecchiamento dell'acqua, la stima del

punto di provenienza dell'acqua che arriva in un nodo o dell'area di influenza di un punto di immissione di una sostanza.

Oggi lo sviluppo della tecnologia ha permesso di migliorare ulteriormente le potenzialità dei software di modellazione idraulica, integrando al loro interno tecnologie GIS e/o CAD che consentono di facilitare la costruzione e l'aggiornamento dei modelli.

2.1.1 Il software EPANET

EPANET è un software open source per la modellazione di reti di distribuzione idropotabile sviluppato dall'Agenzia di Protezione Ambientale statunitense, apparso per la prima volta nel 1993. Consiste in un ambiente integrato che permette la creazione del modello e l'esecuzione di simulazioni idrauliche e di qualità delle acque. In particolare Epanet è in grado di valutare:

- la portata liquida in ogni condotta
- la pressione in ogni nodo
- la concentrazione chimica in tutta la rete
- l'età dell'acqua
- le sorgenti
- i percorsi seguiti dall'acqua

L'interfaccia grafica è particolarmente user friendly e consente di visualizzare i risultati attraverso grafici, tabelle e mappe tematiche, come mostrato in figura 2.3.

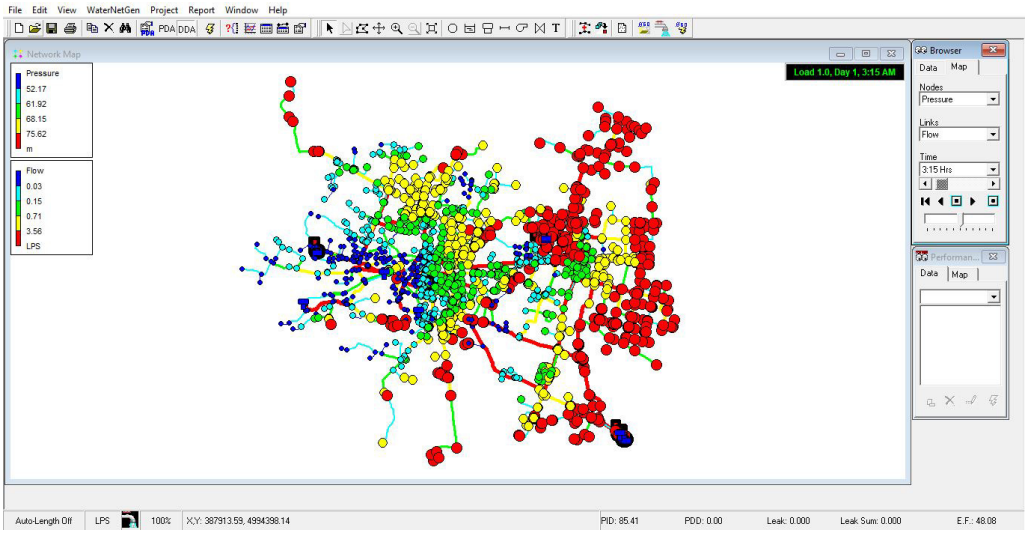


Figura 2.3: Interfaccia grafica di EPANET

Il motore di calcolo di EPANET viene utilizzato da un numero sempre crescente di sviluppatori di software di modellazione idraulica, solitamente basati su sistemi GIS. Grazie a questo, e alla sua intuitività, ha conosciuto una notevole espansione, diventando uno standard a livello mondiale.

Capitolo 3

CASO STUDIO: LA RETE ACQUEDOTTISTICA DI REALTOWN

3.1 Descrizione della rete

Il comune di Realtown possiede una popolazione di quasi 50'000 abitanti ed è situato ai piedi di un rilievo collinare. Il suo territorio è compreso fra i 277 e i 524 metri di altitudine, con una quota ufficiale ISTAT, misurata nel sito in cui è collocata la Casa Comunale, di 390 metri sul livello del mare (m slm). La sua rete acquedottistica soddisfa in modo continuo e regolare una richiesta idrica media giornaliera di 207 l/s circa, corrispondente ad un consumo procapite di 358 l/(giorno ab.). Nell'arco della giornata media la domanda varia fra un valore minimo di 120 l/s circa e un valore massimo attorno ai 270 l/s. L'andamento temporale delle domande sarà analizzato in modo più approfondito nel seguito. Relativamente all'altimetria, la rete può essere suddivisa in tre zone ben definite: una parte bassa, comprendente la zona orientale; una parte intermedia composta da tutta la fascia centrale e settentrionale; una parte alta, collocata all'estremità sud occidentale del territorio comunale.

La rete di distribuzione è composta da 171 km di condotte, con diametri compresi fra i 25 e i 600 mm e più di 800 saracinesche che ne permettono la gestione in modo ottimale. Può essere suddivisa in 8 zone di produzione, stoccaggio o pompaggio dell'acqua, rappresentate in figura 3.1 ed elencate di seguito:

- ZONA 1A: è formata da tre pozzi situati nella parte bassa del territorio dai quali viene emunta una portata di circa 90l/s grazie alle pompe G11, G12 e G13.

- ZONA 1B: è adiacente alla zona precedente e consiste in due pozzi dai quali le pompe G14 e G15 estraggono una portata di circa 40 l/s. L'acqua viene poi

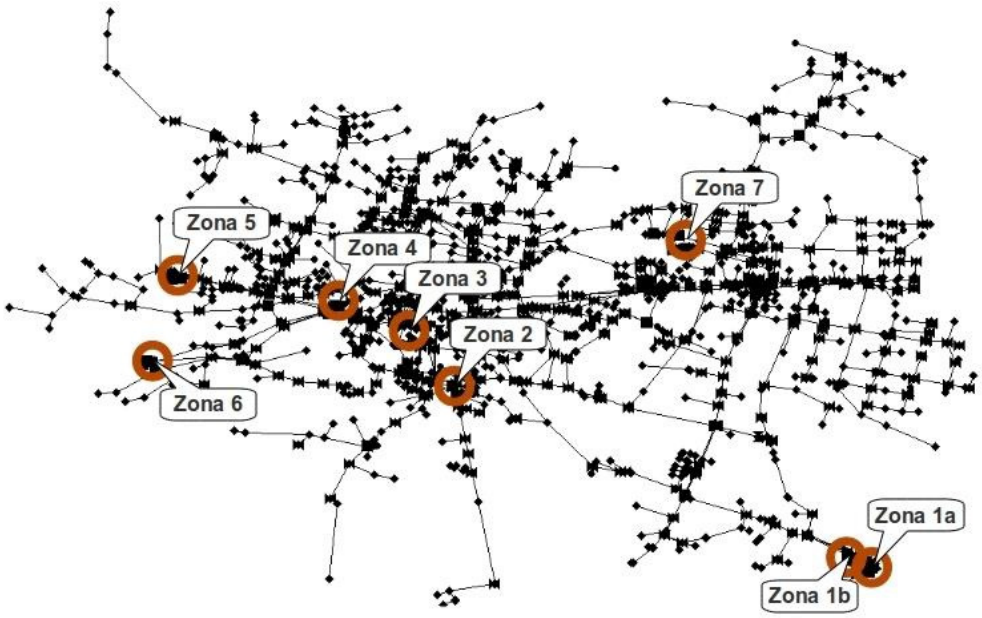


Figura 3.1: Zone di produzione, stoccaggio e pompaggio

immagazzinata nel serbatoio H10, situato nella medesima zona.

- ZONA 2: è formata dal serbatoio H20, posto ad una quota di 368 m slm.
- ZONA 3: è composta dalle pompe M31 ed M32, che hanno il compito di rilanciare una portata media di circa 80 l/s dalla parte bassa alla parte intermedia della rete, inviandola verso il serbatoio H40.
- ZONA 4: è situata a quota 417 m slm e vi si trova il serbatoio H40, nonchè il più grande della rete; nella medesima zona è collocata anche la pompa M41, deputata a rilanciare una portata di circa 7 l/s verso il serbatoio H41, che ha il compito di servire la parte alta della rete.
- ZONA 5: è costituita da tre pozzi, che grazie alle pompe G51, G52 e G53 riforniscono il serbatoio di compenso (H40) della zona 4 con una portata media di circa 50 l/s.
- ZONA 6: ospita il serbatoio H41, il più alto della rete, situato ad una quota di 489 m slm.
- ZONA 7: è una zona semi indipendente della rete servita da due pozzi, che tramite le pompe G61 e G62 forniscono una portata media di circa 27 l/s.

In sintesi si può osservare che i pozzi sono distribuiti su quattro aree, le zone 1a, 1b, 5 e 7. Da essi viene immessa in rete una portata media complessiva di circa 207 l/s.

3.2 Componenti del sistema

CONDOTTE

La rete di Realtwon è costituita da 2776 condotte di diametro compreso fra i 25 mm e i 600 mm. La distribuzione degli stessi è mostrata in figura 3.2. Come si

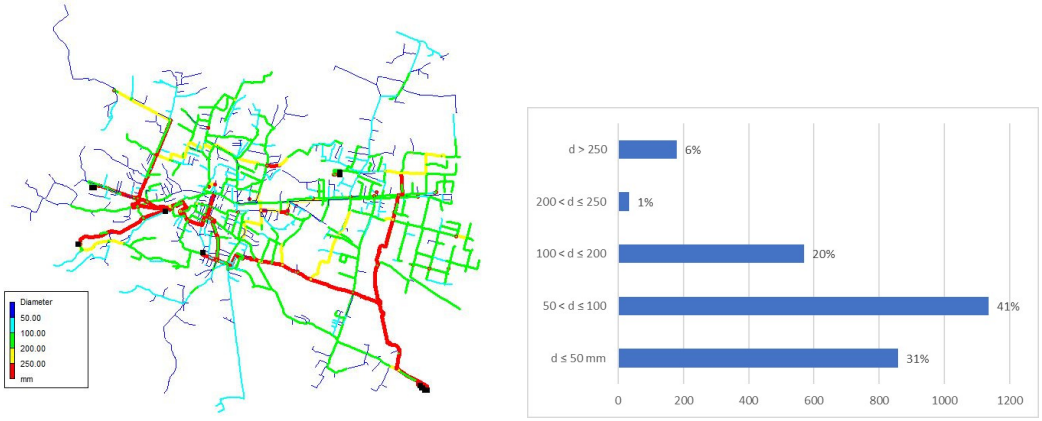


Figura 3.2: Distribuzione dei diametri delle condotte

può osservare i diametri più utilizzati sono quelli compresi nell'intervallo 50÷100 mm, seguiti da quelli della classe precedente, inferiori ai 50 mm. Poche condotte possiedono invece grandi diametri: solo il 6% di esse appartiene infatti alla classe $d \geq 250mm$.

Per quanto riguarda i materiali, si rileva che la maggiorparte delle condotte (circa il 75%) è in acciaio. Sono inoltre presenti, seppur in numero minore, tratti in eternit, ferro, ghisa grigia e sferoidale, PEAD e PVC. Si rammenta che oggi la produzione di condotte in eternit è vietata dalla legge, tuttavia l'uso di quelle posate negli scorsi decenni resta consentita. Studi scientifici hanno infatti dimostrato che la pericolosità delle fibre di amianto è legata alla loro possibile inalazione, ma ad oggi non si sono riscontrati rischi associati all'eventuale presenza delle stesse nell'acqua potabile.

POZZI

Come anticipato nel precedente paragrafo 3.1 la rete è alimentata da 10 pozzi situati in 4 aree differenti del terriotorio, che garantiscono una fornitura continua di acqua potabile a tutte le utenze del comune di Realtown. Si fornisce di seguito un elenco degli stessi, con indicazione della zona di appartenenza:

- POZZI G11, G12, G13: sono situati in zona 1a, nella parte bassa della rete, e forniscono una portata media di circa 90 l/s.

- POZZI G14, G15: adiacenti ai precedenti, servono il serbatoio H10, con una portata media di 40 l/s.

- POZZI G51, G52, G53: sono collocati all'estremità occidentale della rete, in zona 5; la loro portata media di 50 l/s circa viene convogliata verso il serbatoio H40.

- POZZI G61, G62: localizzati nela zona 7, garantiscono la completa fornitura dell'area nord orientale che risulta semi indipendente.

Per una maggior comprensione si riporta nella tabella 3.1 l'elenco dei pozzi con indicazione della profondità e della portata emunta dagli stessi.

Pozzo	Portata media [l/s]	Profondità [m]
G11	27	120
G12	37	160
G13	24	203
G14	18	150
G15	21	150
G51	22	135
G52	11	150
G53	14	200
G61	15	200
G62	12	213

Tabella 3.1: Portate medie emunte dai pozzi e profondità

Si sottolinea che la portata emunta da un pozzo è funzione di 3 grandezze:

- il livello idrico all'interno del pozzo stesso

- la curva di funzionamento Q-H della pompa

- il carico piezometrico in rete

POMPE

La rete di Realtown ospita 19 pompe, 10 delle quali sono deputante ad emungere dai pozzi la portata necessaria a soddisfare la richiesta idrica delle utenze. Le altre 9 hanno il compito rilanciare l'acqua verso quote più alte, laddove la topologia del terriotorio lo richiede. Nel seguito vengono mostrate dettagliatamente le caratteristiche di ognuna di esse.

Pompa	Collocazione	Potenza nominale [kW]
G11	zona 1a	59
G12	zona 1a	92
G13	zona 1a	51
G14	zona 1b	26
G15	zona 1b	45
M16	zona 1b	90
M17	zona 1b	90
M18	zona 1b	90
M19	zona 1b	90
M21	zona 2	10
M31	zona 3	59
M32	zona 3	52
M41	zona 4	22
M42	zona 4	22
G51	zona 5	59
G52	zona 5	59
G53	zona 5	37
G61	zona 7	59
G62	zona 7	30

Tabella 3.2: Potenza nominale delle pompe e loro collocazione

La tabella 3.2 riporta la zona di collocazione e la potenza nominale di ogni pompa. Si osservi che, per semplicità, le pompe di pescaggio prendono il nome dal pozzo che emungono.

Le pompe idrauliche sono caratterizzate da due famiglie di curve che ne descrivono il funzionamento. Si tratta delle curve caratteristiche $Q - H$ e delle curve di rendimento $Q - \eta$. Le prime indicano la prevalenza che può essere raggiunta dalla pompa al variare della portata, mentre le seconde forniscono la portata ottimale per avere il massimo rendimento. Nel seguito si riportano i grafici che mostrano le due curve per ciascuna pompa di pescaggio e per ciascuna pompa di rilancio.

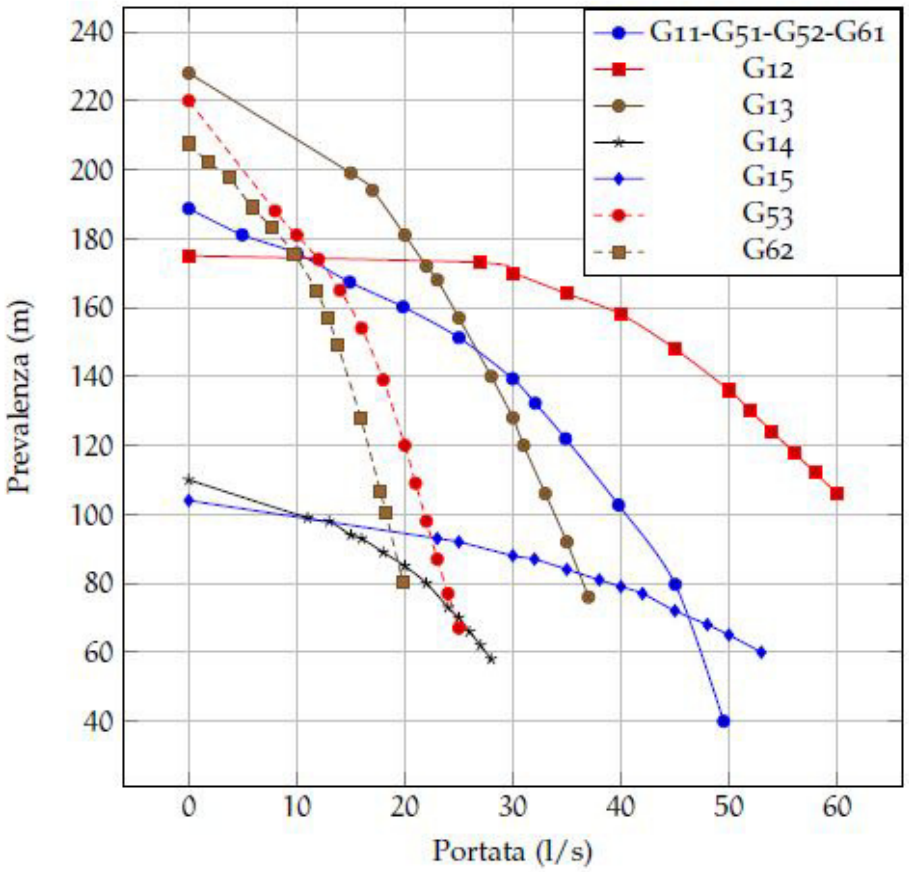


Figura 3.3: Curve caratteristiche delle pompe di pescaggio dai pozzi

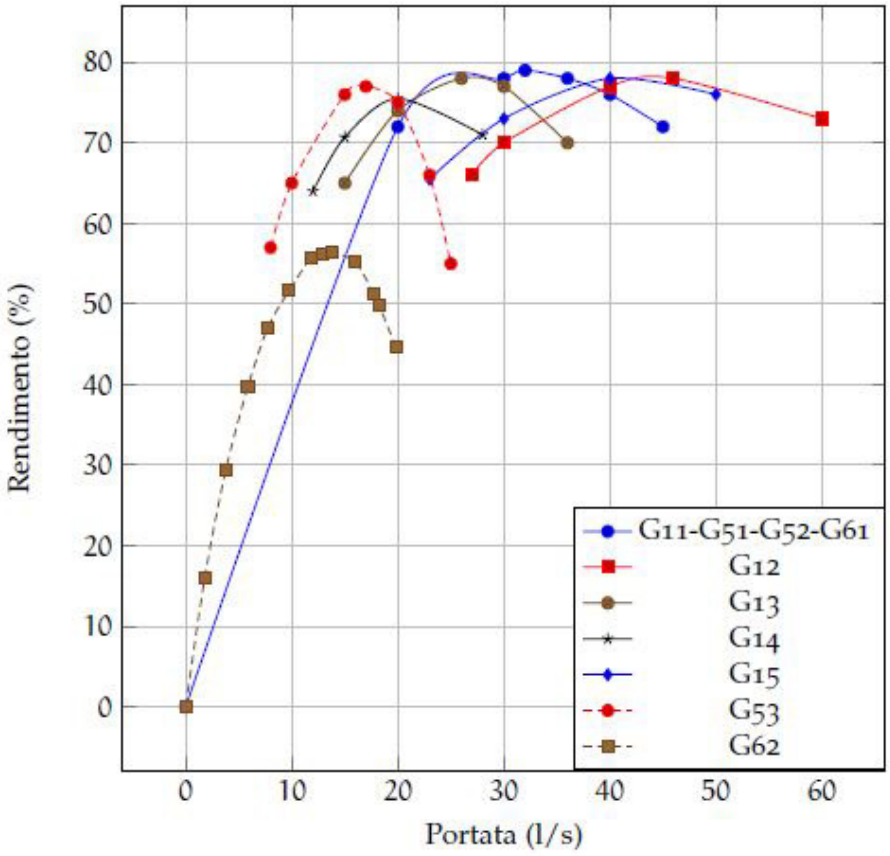


Figura 3.4: Curve di rendimento delle pompe di pescaggio dai pozzi

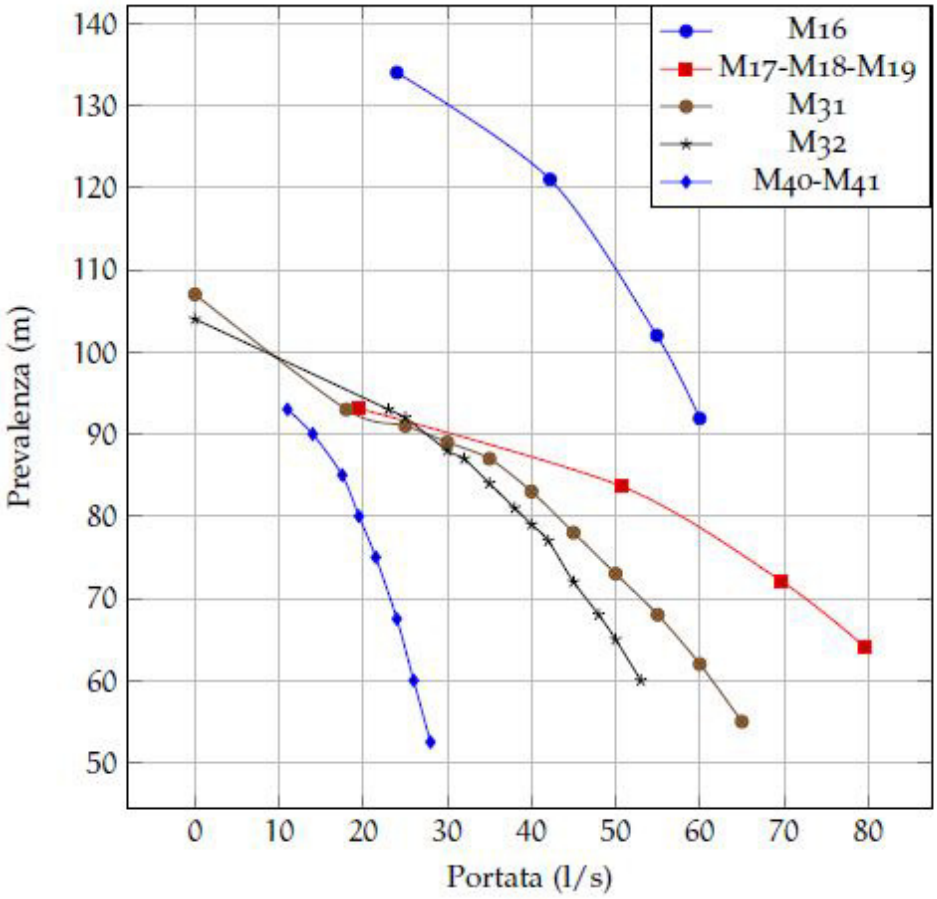


Figura 3.5: Curve caratteristiche delle pompe di rilancio

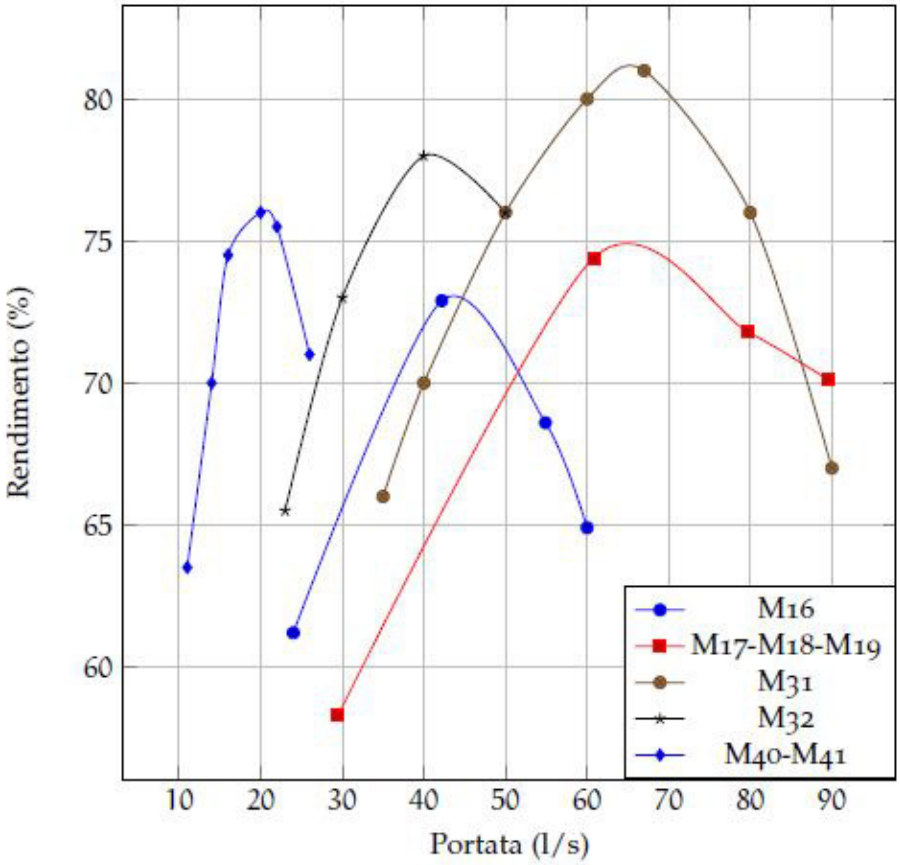


Figura 3.6: Curve di rendimento delle pompe di rilancio

Le pompe della rete di Realtown sono gestite tramite regole di accensione e spegnimento, basate sui livelli dei serbatoi. Nella tabella 3.3 si riportano i controlli di ciascuna pompa.

Pompa	Serbatoio	On [cm]	Off [cm]
G11	H20	410	460
G12	H20	390	440
G13	H20	370	420
G14	H10	340	390
G15	H10	330	380
M16	H20	310	360
M17	H20	290	340
M18	H20	350	400
M19	non utilizzata		
M21	non utilizzata		
M31	-	8 : 00	6 : 00
M32	-	15 : 00	6 : 00
M41	H41	250	350
M42	non utilizzata		

Tabella 3.3: Regole di accensione e spegnimento delle pompe

Si osservi che le pompe M19, M21 ed M42 risultano inutilizzate e fungono da riserva in caso di guasto delle pompe situate nelle medesime zone di pompaggio. Le pompe M31 ed M32 sono invece caratterizzate da controllo orario.

SERBATOI

La rete è costituita da quattro serbatoi:

- SERBATOIO H10: è situato in zona 1b, nella parte bassa della rete ed è alimentato dalle pompe G14 e G15 poste nella zona medesima; è collocato a 305 m slm e possiede un livello massimo di 4 metri; la quota di sfioro è posta a 309 m slm.

- SERBATOIO H20: risiede in zona 2, nella parte centro meridionale della rete, a quota 368 m slm; la sua massima capicità di invaso è pari a 5 metri e la quota di sfioro risulta posta a 373 m slm. Il serbatoio H20 separa idraulicamente la parte bassa della rete dalla parte intermedia.

- SERBATOIO H40: è il serbatoio più grande della rete, situato in zona 4 a quota 417 m slm; la quota di sfioro è posta a 425 m slm e il suo livello massimo risulta pertanto di 8 metri.

- SERBATOIO H41: è il più alto e il più piccolo della rete; posto in zona 6, a 489 m slm, ha il compito di rifornire la parte alta della rete. Riceve acqua dal serbatoio H40 e il suo massimo livello di riempimento è pari a 4 metri. La quota di sfioro situata a 493 m slm.

3.3 Schema di funzionamento

Come accennato all'inizio del capitolo, si può considerare la rete costituita da 3 parti fra loro indipendenti, come elencato di seguito e come mostrato in figura 3.7:

- PARTE BASSA: consumo medio giornaliero di 82 l/s circa
- PARTE INTERMEDIA: consumo medio giornaliero di 120 l/s circa
- PARTE ALTA: consumo medio giornaliero di 6 l/s circa

Come si osserva dallo schema, la parte bassa è servita dai pozzi delle zone 1a ed 1b che forniscono circa 130 l/s. In particolare le pompe G11, G12 e G13 immettono la portata direttamente in rete, mentre le pompe G14 e G15 alimentano il serbatoio H10. Quest'ultimo serve quindi la zona suddetta tramite le pompe M16, M17 ed M18. Inoltre vi è anche un contributo dei pozzi G61 e G62 che forniscono circa 30 l/s. La risorsa che non viene consumata nella parte bassa, pari a 78 l/s circa, viene immagazzinata nel serbatoio H20 e grazie alle pompe M31 ed M32 è poi inviata al serbatoio H40. Quest'ultimo riceve inoltre 48 l/s dai pozzi G51, G52 e G53 situati in zona 5. Una portata pari a 126 l/s è dunque immessa in rete per rifornire tutta la parte intermedia. I 6 l/s di surplus vengono poi indirizzati verso il serbatoio H41 che li utilizza per soddisfare la richiesta idrica della parte alta.

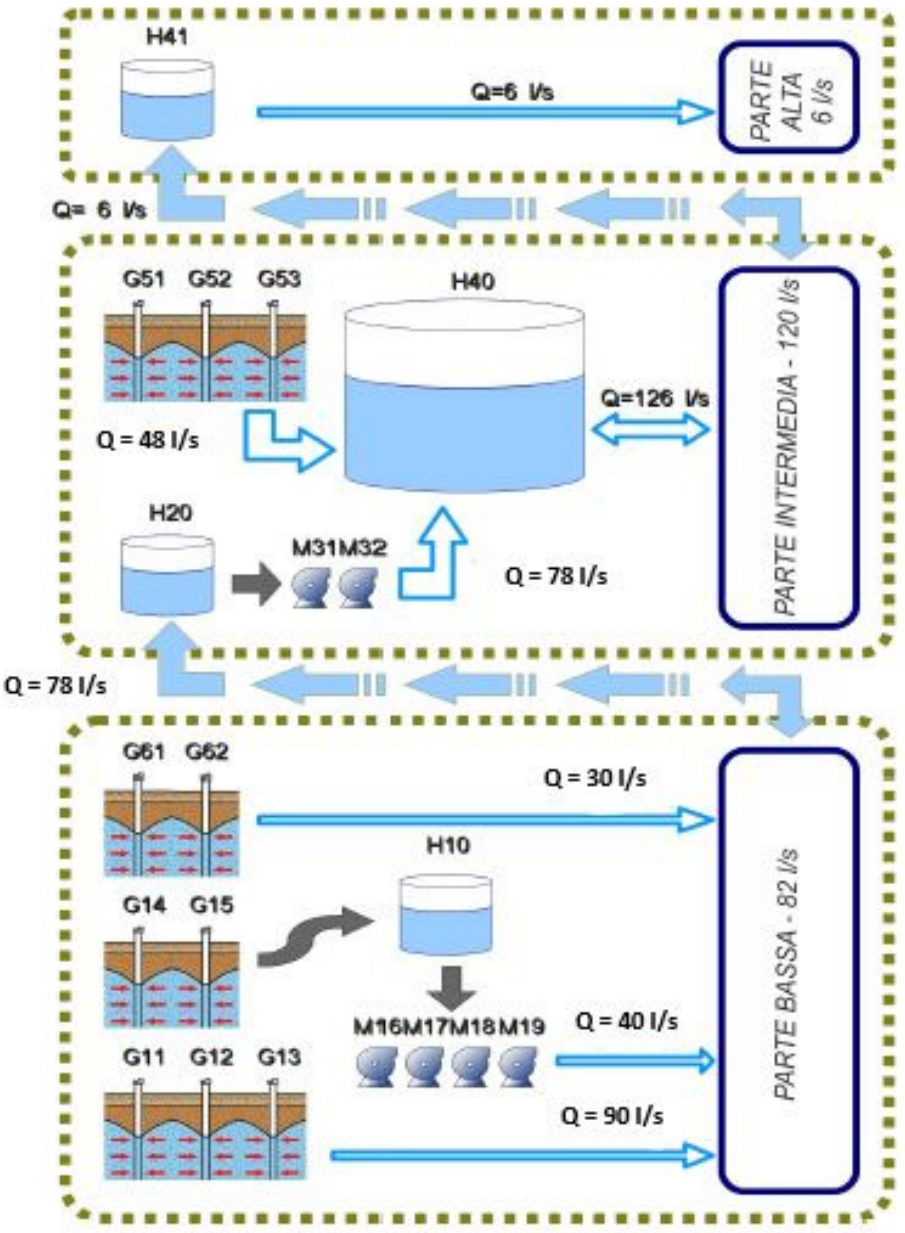


Figura 3.7: Schema di funzionamento della rete

Capitolo 4

RISULTATI DELLE ANALISI

Nel presente capitolo si vogliono mostrare i risultati delle analisi oggetto della tesi. In primo luogo si evidenziano singolarmente quelle che sono le componenti del sistema dinamico acquedotto: le domande ai nodi, le quali possono essere definite come gli input della rete; le portate e le prevalenze delle pompe che insieme ai livelli dei serbatoi rappresentano le cosiddette forzanti del sistema; le pressioni ai nodi e le portate nelle condotte che simboleggiano gli output. Nell'analizzare le suddette grandezze, si vuole porre l'attenzione sulla loro variabilità spaziale e temporale al fine di delineare un quadro generale delle variazioni nello spazio e nel tempo di tutte le parti che costituiscono il sistema acquedotto. Successivamente si passa ad esaminare le correlazioni che sussistono fra le varie grandezze, con lo scopo di definire il funzionamento della rete e di evidenziare eventuali comportamenti controintuitivi. Come si vedrà nel suguito, infatti, gli output non sempre seguono l'andamento degli input: in taluni casi si evidenzia una stretta dipendenza dalle forzanti, in altri si sottolinea un comportamento misto e più articolato, che pone l'accento sulla complessità del sistema, al contrario di quanto comunemente si pensa riguardo al funzionamento di un acquedotto.

4.1 Analisi di input, forzanti ed output

4.1.1 Analisi degli input: domande ai nodi

La determinazione della richiesta idrica della rete è passata attraverso due step distinti. In primo luogo, è stata definita la distribuzione spaziale della domanda mediante la lettura dei contatori di tutte le utenze di Realtown, nell'arco di un anno. Per dare un'idea degli ordini di grandezza in gioco, si osservi che nell'anno di riferimento sono stati contabilizzati circa 5 milioni di metri cubi, che sono poi stati ripartiti nei giorni dell'anno per calcolare la portata media fatturata giornaliera, risultata pari a 158 l/s circa. La differenza tra quest'ultima e la portata immessa

mediamente in rete (207 l/s circa), calcolata integrando le portate dei pozzi nelle 24 ore scelte come riferimento e tenendo anche conto delle variazioni dei livelli nei serbatoi tra gli istanti iniziale e finale della giornata, rappresenta le perdite. Pur non essendo il problema delle perdite oggetto della tesi, si vuole fare un breve excursus circa la modellazione delle stesse. L'IWA (International Water Association) propone, relativamente alle componenti del bilancio idrico, la terminologia riportata nella tabella seguente. Come si osserva, le perdite possono essere apparenti, ovvero dovute

<table>
<tr><td rowspan="11">System Input Volume</td><td rowspan="4">Authorised Consumption</td><td rowspan="2">Billed Authorised Consumption</td><td>Billed Metered Consumption (including water exported)</td><td rowspan="2">Revenue Water</td></tr>
<tr><td>Billed Unmetered Consumption</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Unbilled Authorised Consumption</td><td>Unbilled Metered Consumption</td><td rowspan="7">Non-Revenue Water (NRW)</td></tr>
<tr><td>Unbilled Unmetered Consumption</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Water Losses</td><td rowspan="2">Apparent Losses</td><td>Unauthorised Consumption</td></tr>
<tr><td>Metering Inaccuracies</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Real Losses</td><td>Leakage on Transmission and/or Distribution Mains</td></tr>
<tr><td>Leakage and Overflows at Utility's Storage Tanks</td></tr>
<tr><td>Leakage on Service Connections up to point of Customer metering</td></tr>
</table>

Figura 4.1: Componenti del bilancio idrico proposto dall'IWA

ad un consumo non autorizzato o ad errori nei misuratori, oppure reali, dovute a rotture nelle condotte o ai serbatoi. Per la rete oggetto di studio è stato deciso di suddividere la perdita in due componenti. La prima, assunta pari al 30%, tiene conto delle perdite apparenti ed è stata sommata direttamente alle domande ai nodi. La seconda rappresenta invece la perdita reale ed è stata distribuita lungo la rete proporzionalmente, in un primo momento, al diametro ed alla lunghezza delle condotte. Successivamente, la stessa, è stata determinata in funzione delle pressioni ai nodi, seguendo quindi un approccio PDA (Pressure Driven Analysis). Una volta distribuiti ai nodi i valori medi di domanda fatturata e perdita è stato necessario definire l'andamento temporale dei consumi: sono stati introdotti dei coefficienti da applicare ai valori medi per tenere conto delle variazioni temporali dei consumi della rete. Si noti che si è scelto un andamento delle perdite in controfase con quello delle domande. Infatti, quando queste ultime sono basse, tipicamente nelle ore notturne, le pressioni aumentano a causa delle ridotte velocità in rete e le perdite tendono di conseguenza a salire. Viceversa, nelle ore di massimo consumo, le pressioni sono minori e pertanto lo saranno anche le perdite. Nella figura seguente si riporta il pattern delle domande della rete di Realtown.

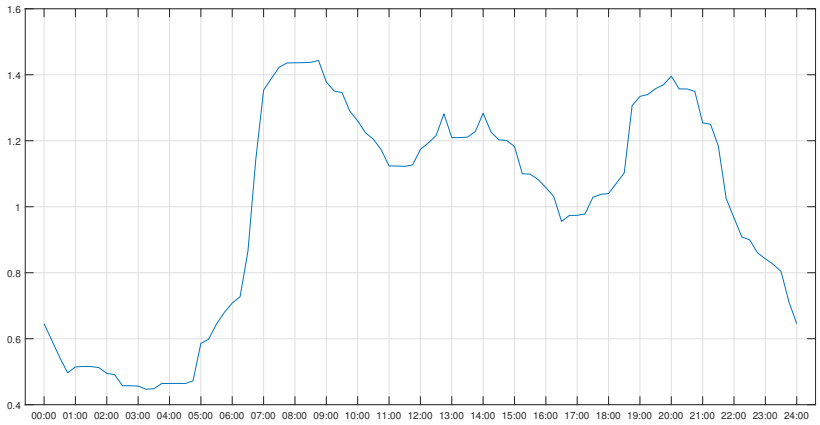


Figura 4.2: Andamento temporale delle domande

Si osservi che la domanda media giornaliera è normalizzata a 1 e che il passo temporale utilizzato è di 15 minuti. Secondo la terminologia utilizzata dal software EPANET, moltiplicando la *base demand* (richiesta media giornaliera) di ciascun nodo per il coefficiente definito dal *demand pattern*, si ottiene la *demand (Required)* ovvero il valore di richiesta idrica del nodo stesso, nel quarto d'ora considerato. Nel presente paragrafo, nota, per ogni nodo, la serie delle domande nelle 24 ore, con passo temporale di 15 minuti, si sono analizzate le richieste idriche dell'intera rete, al fine di valutarne la variabilità spaziale e temporale e di effettuare un confronto fra le stesse. In primo luogo, si sono determinate le domande medie, ovvero le richieste medie giornaliere per ogni nodo della rete. La figura 4.3 ne mostra la distribuzione spaziale. Si può osservare che la maggior parte dei nodi è caratterizzata da richieste idriche medie inferiori a 0,5 l/s circa. Vi sono poi alcuni nodi che presentano domande più elevate, come ad esempio i nodi 3378 e 1319, raffigurati in arancione, situati nella zona nord ovest e i nodi 1119 e 992, di color rosso scuro, nella parte centro meridionale della rete, con consumi medi superiori ad 1,4 l/s. Si noti che vi è inoltre una percentuale consistente di nodi cosiddetti fittizi (circa il 50%), caratterizzati da domanda nulla. Come accennato in precedenza si vuole porre l'attenzione sulla variabilità nello spazio e nel tempo. A tale scopo si riporta nella figura 4.4 la distribuzione delle deviazioni standard.

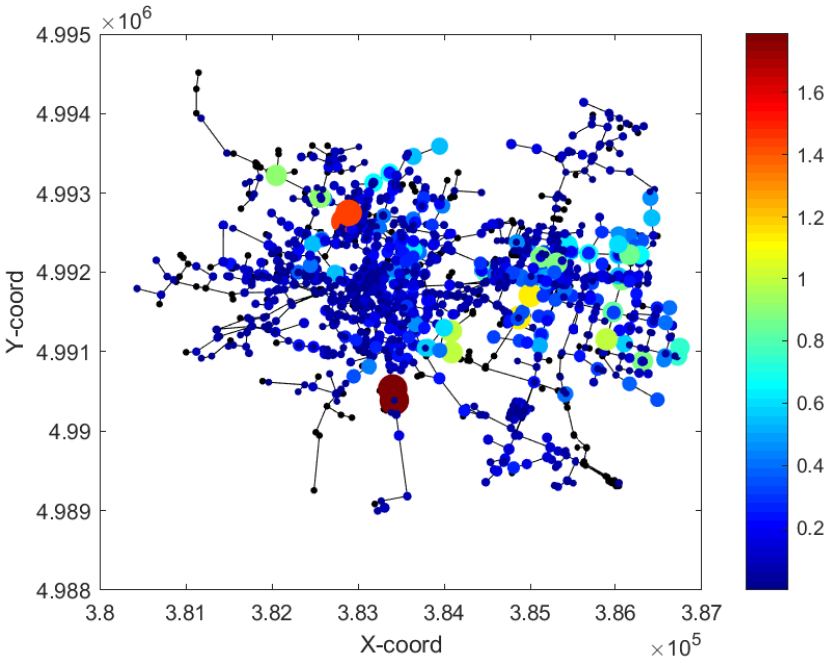


Figura 4.3: Richieste idriche medie giornaliere

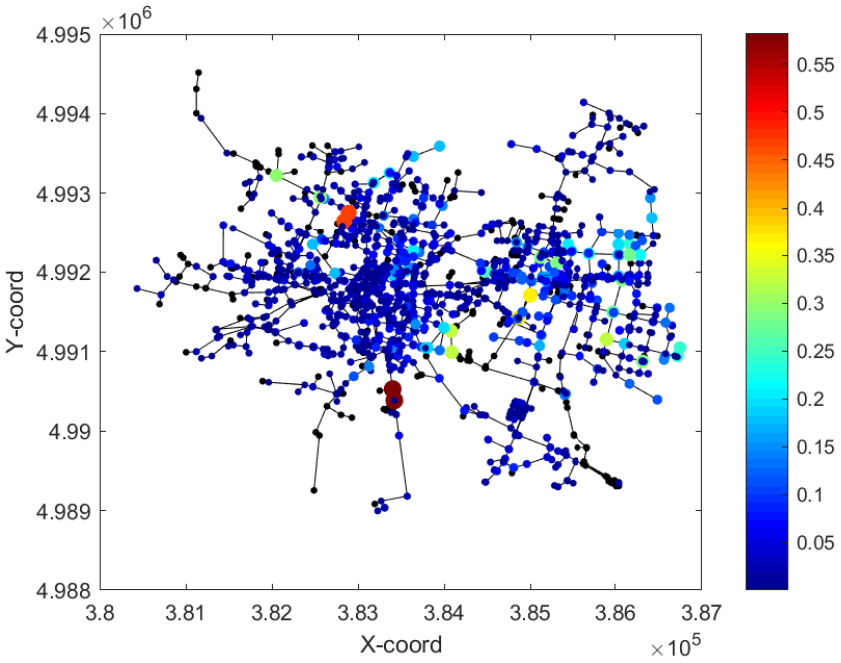


Figura 4.4: Deviazioni standard delle domande

Si osserva immediatamente una similitudine molto spinta con il grafico delle domande medie: i nodi che presentano le richieste idriche medie più elevate posseggono anche le maggiori variazioni delle domande nell'arco delle 24 ore. Osservando i valori delle deviazioni standard si evince, inoltre, una variabilità spaziale piuttosto marcata. Vi è infatti un ordine di grandezza di differenza fra i nodi con le oscillazioni più contenute e quelli con le variazioni più elevate. Al contrario, le oscillazioni nel tempo risultano più moderate, infatti il nodo caratterizzato dai maggiori scostamenti dalla media presenta una deviazione standard di circa 0,6 l/s, valore, questo, piuttosto contenuto se confrontato col valore medio pari ad 1,8 l/s. Le considerazioni suddette sono confermate dal grafico di figura 4.5. Le curve rappresentano le distribuzioni cumulate delle domande, ovvero i percentili relativi alle stesse. Entrando in ascissa con un determinato valore della domanda si legge sulle ordinate la percentuale di nodi che posseggono un valore della domanda inferiore a quella suddetta. In particolare la curva blu tiene conto delle richieste idriche medie, mentre quella rossa prende in considerazione le serie temporali delle domande nelle 24 ore, per ciascun nodo.

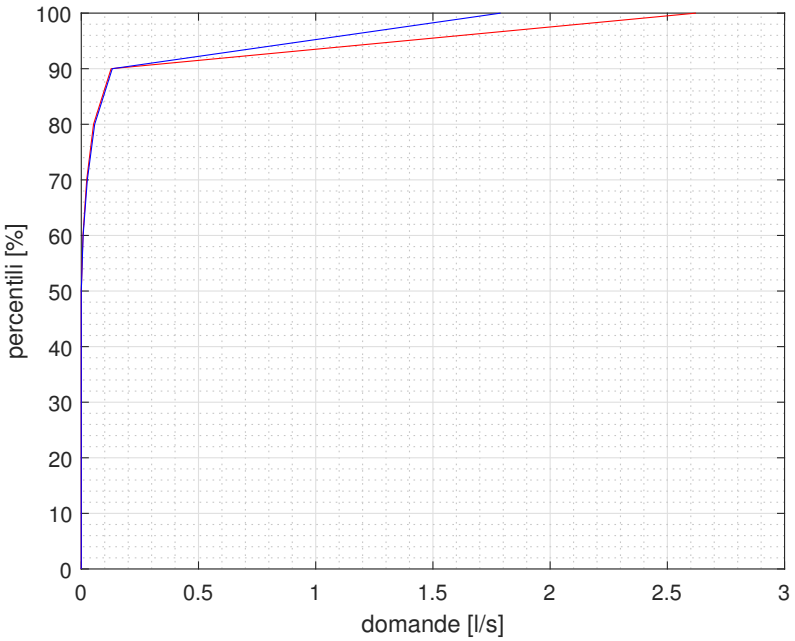


Figura 4.5: Percentili delle domande ai nodi; la curva rossa rappresenta la cumulata delle domande medie, mentre la curva blu tiene conto delle serie temporali delle domande nelle 24 ore per ciascun nodo.

Il primo dato che viene evidenziato è l'entità della variabilità temporale, rappresentata dalla distanza fra le due curve: quando esse coincidono, significa che le

domande possono essere confuse con i loro valori medi. Viceversa, quando divergono, si evince un maggior scostamento dalla media. Come indicato in precedenza, oltre ai nodi con domanda nulla, che rappresentano quasi il 60% della totalità, ve ne è un altro 30% che presenta oscillazioni minime della domanda nel tempo. Tali nodi sono inoltre caratterizzati da valori medi della richiesta idrica inferiori a 0,15 l/s circa. Il restante 10% possiede valori di domanda che variano fra 0,2 e 2,6 l/s circa. Questo dato evidenzia una notevole disomogeneità spaziale delle domande, concentrata tuttavia, in un numero ristretto di nodi. In via definitiva si può dunque concludere che vi è un esiguo numero di nodi con richieste idriche considerevolmente superiori alla media, i quali sono anche gli stessi a presentare le oscillazioni temporali più marcate. La maggior parte della rete presenta invece domande pressoché uniformi nello spazio e poco variabili nel tempo.

4.1.2 Analisi delle forzanti: pompe e serbatoi

Come esaminato nel capitolo precedente, la rete è dotata di 4 serbatoi e 19 pompe. Queste ultime si dividono in due categorie principali: pompe di pescaggio e pompe di rilancio. Le prime hanno la funzione di emungere la portata dai pozzi e di inviarla in rete o verso i serbatoi, mentre le seconde sono collocate laddove è necessario fornire energia alla risorsa idrica per convogliarla da zone più basse della rete verso zone poste a quota maggiore. Alcune di esse lavorano in continuo durante tutto l'arco della giornata, mentre altre sono gestite da regole di accensione/spegnimento orarie o basate sui livelli dei serbatoi. Dei 4 serbatoi, l'unico che svolge un'importante funzione di compenso è l'H40, il più grande della rete, mentre gli altri tre adempiono principalmente alla funzione di stabilizzazione dei carichi oltre che di creazione di discontinuità idrauliche, al fine di evitare l'insorgere di sovrappressioni. Ci si riferisce a pompe e serbatoi col termine *forzanti* in quanto tali elementi forzano la rete ad assumere determinati carichi idraulici nei punti i cui essi sono collocati, determinando quindi il funzionamento della stessa. Come nel paragrafo precedente, anche per pompe e serbatoi si intende effettuare un'analisi statistica delle grandezze relative a queste due componenti del sistema acquedottistico e in particolare si vuole porre l'attenzione sull'andamento nello spazio e nel tempo delle prevalenze e dei livelli. Si precisa sin da subito che ai valori di prevalenza sono state sommate le quote delle relative pompe, allo scopo di rendere confrontabili i dati numerici con i livelli dei serbatoi. Ci si riferisce quindi a grandezze espresse in metri sul livello del mare. In primis, si mostrano nella seguente figura 4.6 i livelli medi imposti dalle pompe e dai serbatoi.

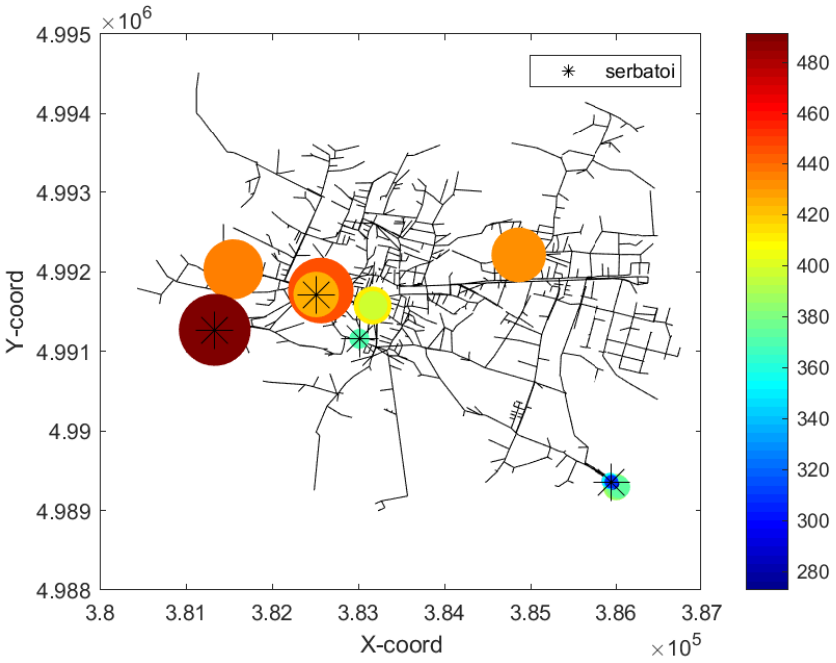


Figura 4.6: Carichi idraulici medi imposti da pompe e serbatoi, espressi in metri s.l.m.

Si può osservare come il livello medio dei serbatoi sia, in accordo con le quote, decrescente procedendo da ovest verso est. Relativamente alle pompe, appare chiaro il funzionamento delle stesse: quelle che posseggono un livello medio maggiore, simboleggiate da un cerchio di maggior diametro e con colorazione tendente al rosso sono caratterizzate da un funzionamento continuo; viceversa i cerchi più piccoli rappresentano pompe che funzionano a intermittenza. Tale comportamento può essere riscontrato anche dalla successiva figura 4.7 che mostra le deviazioni standard: le pompe che lavorano in continuo saranno caratterizzate da oscillazioni nel tempo più contenute rispetto a quelle controllate da regole di accensione/spegnimento. Inoltre, confrontando le dimensioni e i colori dei cerchi raffiguranti i serbatoi con quelli delle pompe si può intuire a grandi linee il percorso dell'acqua. Ad esempio, il pallino arancione situato al centro delle rete, nelle immediate vicinanze del serbatoio H40, rappresenta le pompe M41 ed M42 che hanno lo scopo di rilanciare la risorsa idrica dalla parte intermedia verso il serbatoio H41, il più alto della rete. Quest'ultimo, a sua volta, ha infatti il compito di rifornire tutta la zona alta delle utenze. Un discorso analogo può essere fatto per le pompe G51, G52 e G53 poste nella zona occidentale, le quali hanno l'onere di rifornire il serbatoio H40. La dimensione e il colore dei marker risulta pertanto simile nei casi suddetti. Oltre ai valori medi dei livelli imposti all'acqua da pompe e serbatoi è interessante osservare la variabilità temporale degli stessi. La figura 4.7 ne mostra le deviazioni standard.

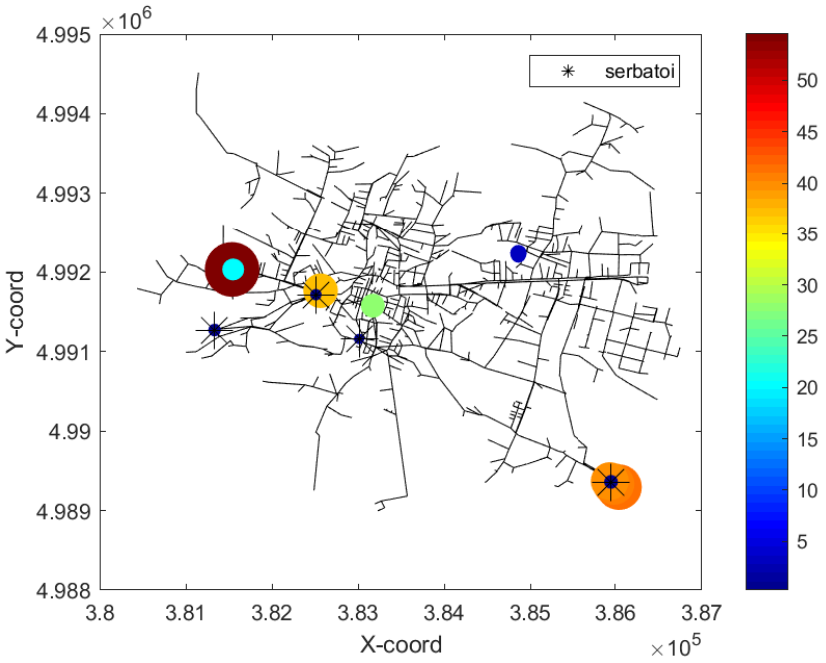


Figura 4.7: Deviazioni standard dei carichi imposti da pompe e serbatoi, espresse in metri s.l.m.

Com'è logico attendersi, il dato che balza immediatamente all'occhio è l'irrisoria variazione dei livelli dei serbatoi, se confrontata con quella delle pompe. Mentre i primi hanno a disposizione un volume di stoccaggio della risorsa, che li dota di una consistente inerzia idraulica, le seconde devono rispondere istanteneamente alle richieste dell'utenza. In particolare, all'aumentare della domanda ci si aspetta un'aumento della portata convogliata dalle pompe e di conseguenza una diminuzione della prevalenza, in accordo con le curve di funzionamento. Queste analisi saranno tuttavia affrontate nel paragrafo relativo alle correlazioni, nel quale si studieranno dettagliatamente le dipendenze fra i vari elementi che costituiscono l'acquedotto. Si vuole, qui, porre l'attenzione sulla variabilità dei carichi imposti da pompe e serbatoi. A tal fine può essere utile osservare il grafico dei percentili di figura 4.8.

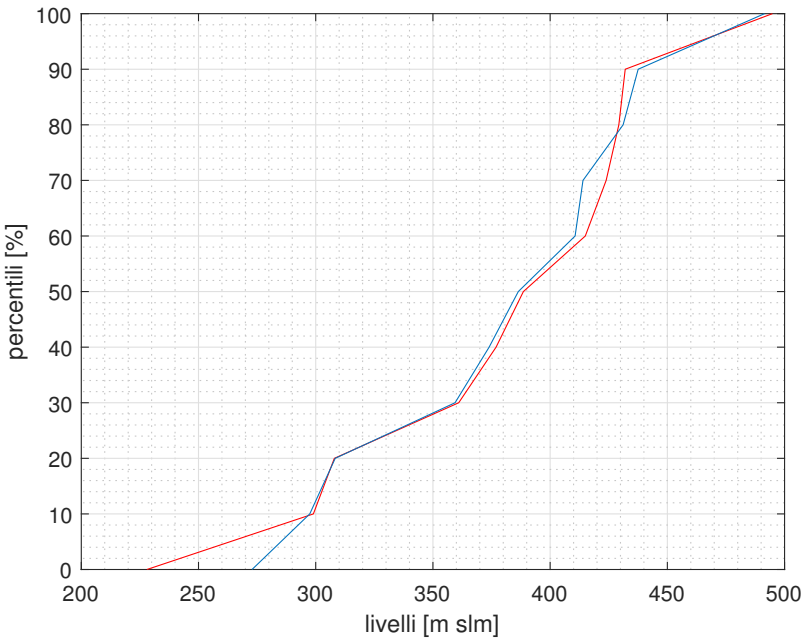


Figura 4.8: Percentili dei carichi imposti da pompe e serbatoi: la curva rossa tiene conto dei soli valori medi dei carichi, mentre la curva blu prende in considerazione le serie temporali dei livelli di ciascun serbatoio e di ciascuna pompa

Le zone in cui le due linee coincidono o si discostano di poco rappresentano i serbatoi. Vi è ivi una variazione dei carichi nel tempo pressoché nulla o modesta. Le restanti parti indicano invece le pompe, caratterizzate da oscillazioni delle serie temporali più marcate. Dal punto di vista spaziale, il grafico dei percentili evidenzia forti variazioni dei carichi in rete, che vanno dai 230 ai 500 metri slm circa. Come osservato anche nel grafico relativo ai valori medi, non vi sono tuttavia variazioni brusche, ma si osserva una crescita lenta e misurata dei carichi dalla parte bassa verso la parte alta della rete.

4.1.3 Analisi degli output: pressioni e portate

Nel presente paragrafo si intende analizzare quelli che vengono definiti gli *output* del sistema dinamico acquedotto, ovvero le pressioni ai nodi e le portate circolanti in rete. In particolare si vuole effettuare un confronto fra le grandezze suddette in termini di variabilità nello spazio e nel tempo.

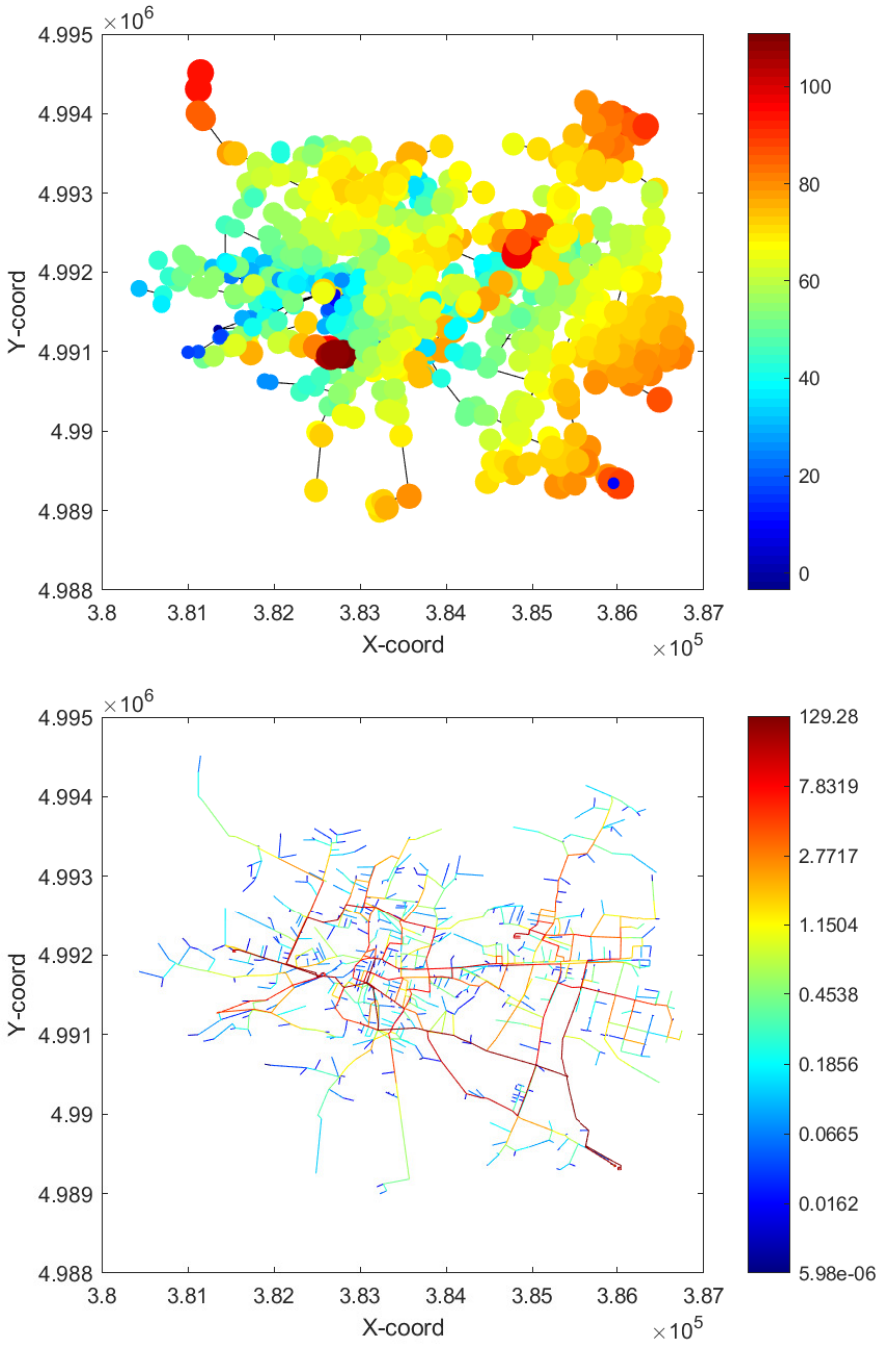


Figura 4.9: Pressioni medie (sopra) e portate medie (sotto)

Le pressioni medie, mostrate in figura 4.9, risultano comprese fra i 10 e i 110 metri di colonna d'acqua circa. I valori maggiori si riscontrano nella parte centro orientale della rete, in prossimità delle pompe G61 e G62, oltre che in una zona ai piedi del

serbatoio H41, nella parte centro meridionale. Quest'ultima è infatti la porzione più bassa servita dal serbatoio medesimo, che si trova su un rilievo e costituisce il punto più elevato della rete. Di conseguenza si riscontrano pressioni elevate. La zona citata in precedenza risulta invece sollecitata da alte pressioni a causa delle pompe stesse, che come visto nel paragrafo precedente forniscono una prevalenza elevata per rifornire tutta la parte nord orientale della rete. Le pressioni minime, invece, si riscontrano soprattutto nella zona occidentale che è quella topologicamente più elevata. Riguardo le portate, si può invece notare come emergano in maniera palese le caratteristiche strutturali del sistema: le condotte che collegano le zone di produzione alla rete sono quelle con le portate medie maggiori. I restanti links distribuiscono poi la risorsa idrica in modo capillare e sono caratterizzati da valori medi di portata significativamente più esigui.

Relativamente alle variazioni nel tempo si osserva che la maggior parte dei nodi possiede oscillazioni delle pressioni inferiori a 8 metri circa (figura 4.10, in alto). La zona nord orientale risulta caratterizzata da valori leggermente più alti. Infine si possono notare una serie di nodi nelle zone meridionale ed occidentale con oscillazioni più marcate, comprese fra i 12 e i 20 metri.

Per le portate (figura 4.10, in basso) la situazione risulta più complessa, con valori di deviazione standard compresi in un intervallo più ampio. Tuttavia si osserva un numero esiguo di condotte con portate notevolmente variabili nel tempo, mentre il resto della rete è caratterizzato da oscillazioni minime delle portate.

Si delinea, pertanto, una situazione contrassegnata da pressioni poco variabili nel tempo ma piuttosto eterogenee nello spazio, seppur contenute all'interno di un range accettabile. Discorso diverso vale per le portate, le quali si distribuiscono nello spazio in maniera fortemente disomogenea: poche condotte convogliano grandi portate, mentre le restanti distribuiscono la risorsa in modo capillare con bassi valori. Anche la variabilità temporale risulta piu marcata rispetto al caso delle pressioni, come confermano i grafici dei percentili di figura 4.11. Le maggiori oscillazioni si riscontrano nelle condotte con portate maggiori. Si noti che un comportamento analogo si era già incontrato relativamente alle domande, analizzate nel paragrafo 4.1.1.

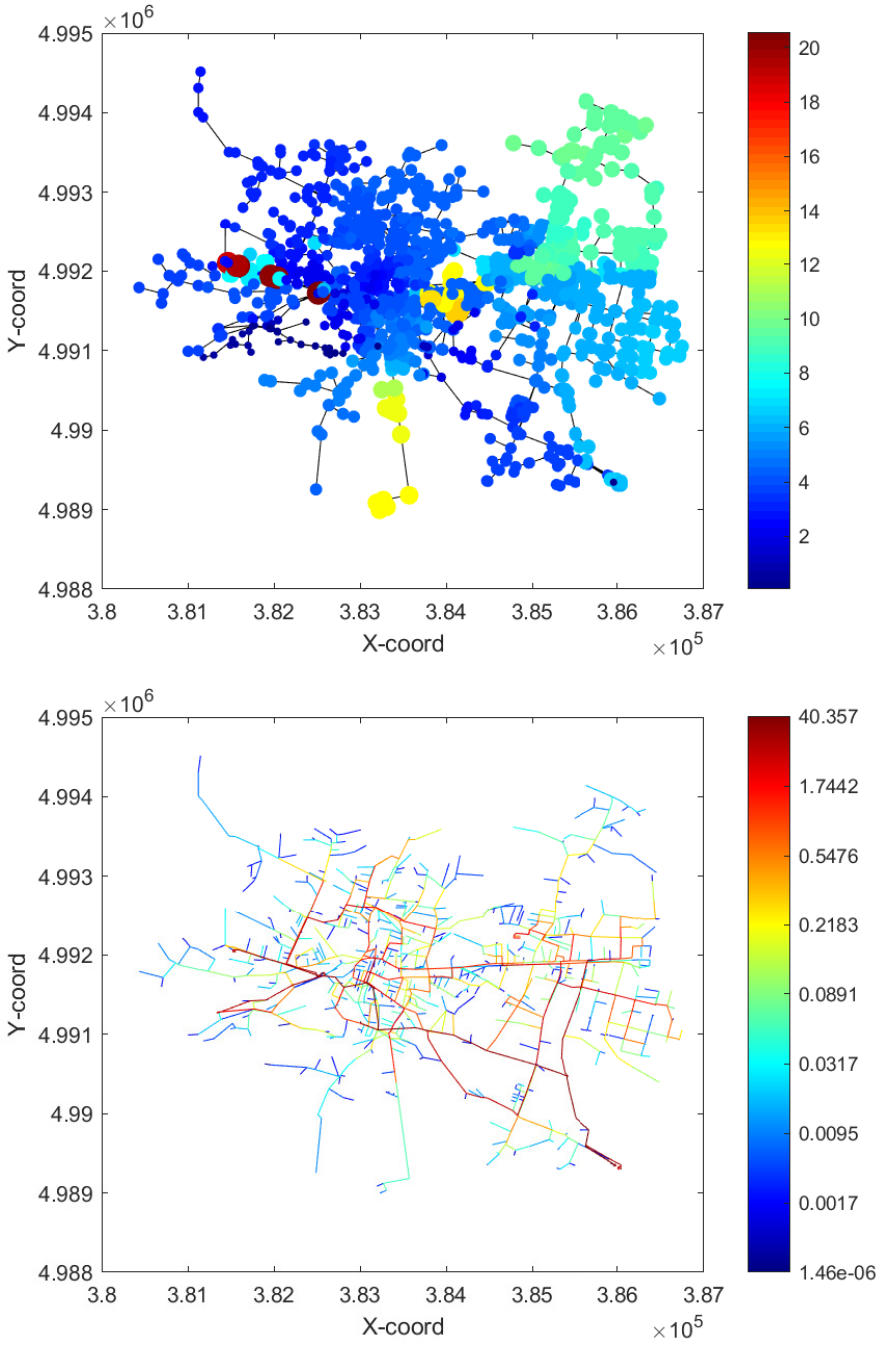


Figura 4.10: Deviazioni standard delle pressioni (sopra) e delle portate (sotto)

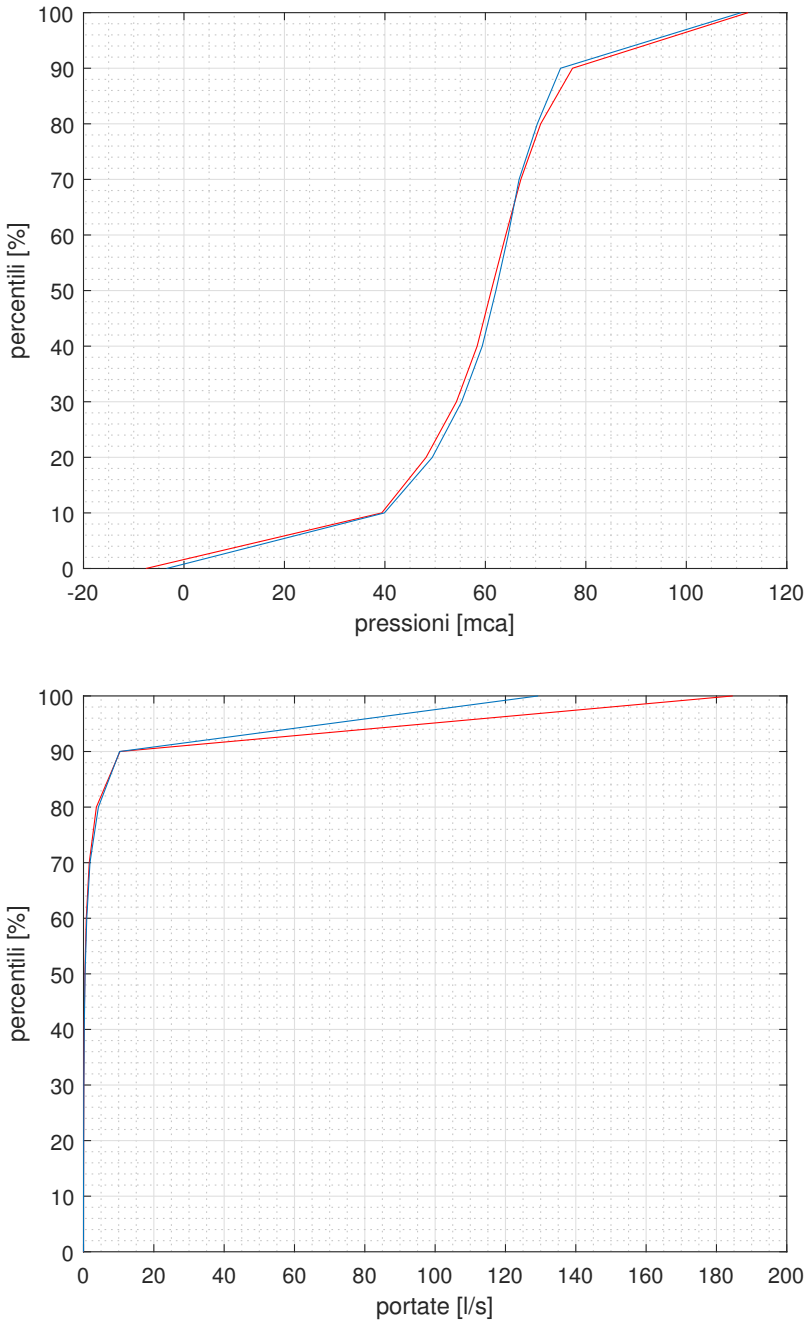


Figura 4.11: Percentili delle pressioni (sopra) e delle portate (sotto): le curve blu rappresentano le distribuzioni cumulate dei valori medi, mentre le curve rosse tengono conto di tutti i valori di pressioni e portate nelle 24 ore.

4.2 Analisi delle correlazioni

In statistica per *correlazione* si intende la tendenza di una variabile a variare poporzionalmente ad un'altra. Non si tratta tuttavia, di un preciso rapporto causa-effetto. Talvolta infatti, si può essere in presenza di correlazioni spurie o indirette. Nel primo caso non vi è alcun nesso di causalità fra le due variabili considerate e la correlazione può ritenersi del tutto casuale. Le correlazioni spurie sono spesso riconoscibili con un po' di buon senso. Il caso di correlazioni indirette è invece più difficilmente individuabile. Esso ha luogo quando due variabili statistiche X e Y sono correlate fra loro perchè in realtà sono entrambe correlate ad una terza variabile Z. Si consideri a titolo di esempio il curioso caso descritto nel 1977 da F. Mosteller e J. Tukey relativo ad un episodio della seconda guerra mondiale: da una attenta analisi si notò che i bombardamenti alleati in Europa risultavano tanto più precisi quanto più intensa era la reazione della contraerea. Tutto ciò sembrava molto assurdo, perchè in teoria doveva avvenire il contrario. Tuttavia, l'incongruenza può essere spiegata dal fatto che esiste sì una correlazione, ma non un nesso causale. Infatti quando il cielo era nuvoloso, i bombardieri avevano scarsa visibilità e per la stessa ragione la contraerea era meno efficace. La variabile Z era quindi rappresentata dalle nuvole e la correlazione fra la due variabili principali era dettata dalla proprietà transitiva.

Nel presente paragrafo si analizzano le correlazioni fra le varie grandezze idrauliche del sistema. In particolare si vuole valutare la risposta della rete alle sollecitazioni imposte dagli input e dalle forzanti, ovvero come gli output reagiscano alle stesse. In sostanza ci si chiede da quali componenti del sistema siano maggiormente influenzate le pressioni e le portate. Si potranno osservare comportamenti talvolta intuitivi ed omogenei sull'intera rete, talvolta controintuitivi e variabili da zona a zona. A tali fini ci si serve di un noto strumento statistico quale il coefficiente di correlazione di Bravais-Pearson, definito dalla seguente equazione:

$$\rho(X,Y) = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

dove σ_{XY} è la covarianza tra le variabili statistiche X ed Y e σ_X, σ_Y sono le due deviazioni standard. Valori positivi del coefficiente indicano correlazioni dirette, ovvero al crescere di una variabile si osserva la crescita dell'altra. Viceversa valori negativi rappresentano correlazioni inverse. Inoltre per la correlazione diretta (e analogamente per quella inversa) si distinguono i seguenti intervalli che ne forniscono un'indicazione sul grado:

- se $0 < |\rho| < 0{,}3$ si ha correlazione debole
- se $0{,}3 \leq |\rho| < 0{,}7$ si ha correlazione moderata
- se $0{,}7 \leq |\rho| \leq 1$ si ha correlazione forte

CORRELAZIONI DOMANDE-PRESSIONI E DOMANDE-PORTATE

In primo luogo si vuole osservare se e quali relazioni sussistono fra gli output e gli input del sistema. A tal proposito i grafici in figura 4.12 mostrano i coefficienti di correlazione di Bravais-Pearson fra pressioni e domande e fra portate e domande. Si

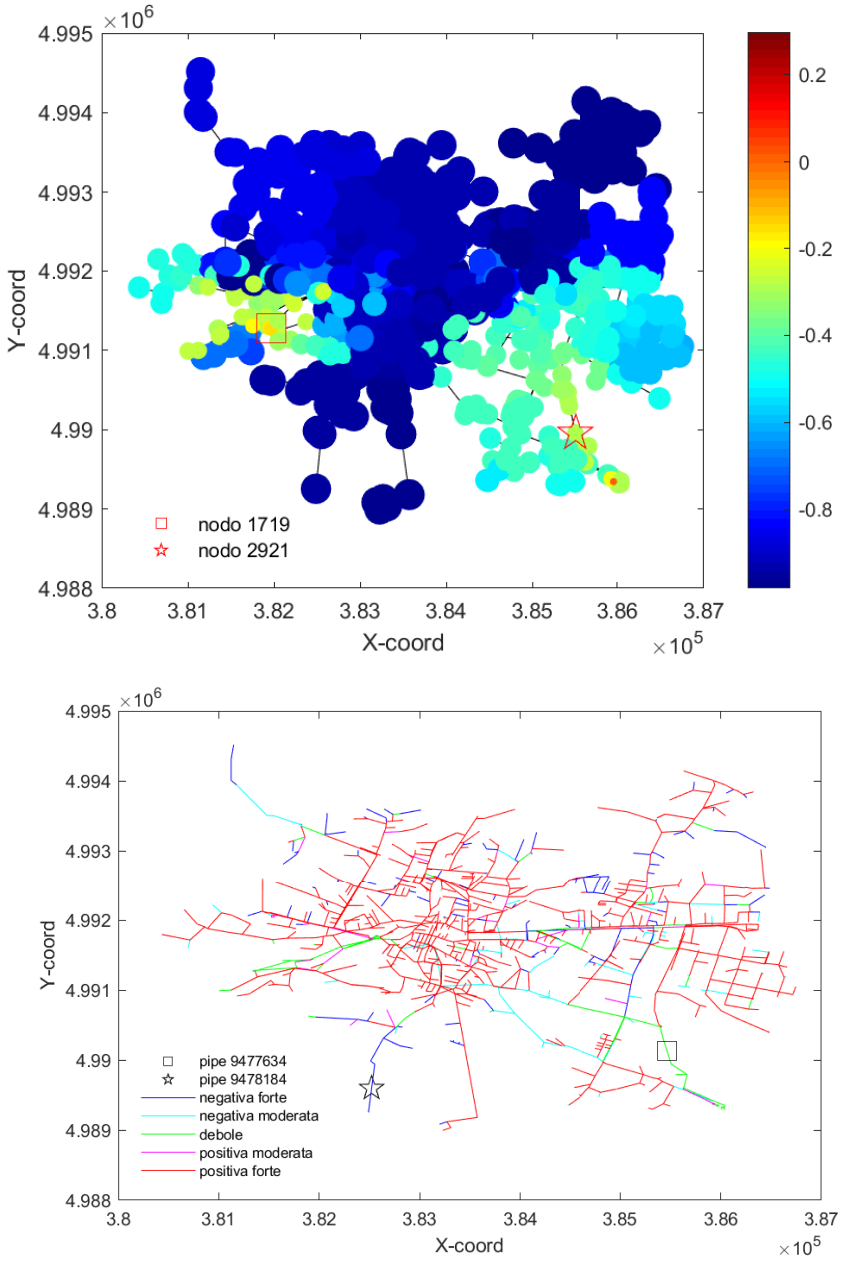


Figura 4.12: Coefficienti di correlazione domande-pressioni (sopra) e domande-portate (sotto): la legenda indica l'entità delle correlazioni

nota immediatamente come le pressioni risultino inversamente correlate alle domande (figura 4.12, in alto). Infatti, come anticipato nel paragrafo 4.1.1, nelle ore della giornata caratterizzate da richieste elevate delle utenze si riscontra una diminuzione dei carichi in rete, a causa delle cospicue velocità che provocano notevoli perdite di carico.

Per le portate valgono considerazioni opposte. Come mostra la figura 4.12 (in basso) esse risultano, nella maggior parte della rete, fortemente correlate con le domande in senso positivo. All'aumentare delle richieste corrisponde infatti un aumento delle portate, causato dalle elevate velocità che si instaurano nelle condotte.

In via definitiva si può dunque riscontrare un comportamento intuitivo di pressioni e portate in relazione alle domande, ovvero una porporzionalità piuttosto marcata fra input ed output del sistema dinamico. Vi sono tuttavia alcune anomalie alle quali prestare attenzione. Le pressioni delle zone sud orientale e una piccola parte di quella occidentale risultano scarsamente o moderatamente correlate alle domande. Tale comportamento fa supporre che esse siano maggiormente influenzate da altre componenti del sistema, come verrà analizzato nel prosieguo del paragrafo. A titolo di verifica si mostrano in figura 4.13 le serie temporali standardizzate delle pressioni, confrontate con quelle delle domande, di alcuni nodi situati nelle zone suddette. Per poter rendere confrontabili le due variabili, si è fatto ricorso alla standardizzazione delle stesse. La standardizzazione è un procedimento che riconduce una variabile aleatoria distribuita secondo una media μ e una varianza σ^2, ad una variabile aleatoria con distribuzione "standard", ossia di media zero e varianza pari a 1. Si ottiene applicando la formula:

$$Z = \frac{X-\mu}{\sigma}$$

dove Z rappresenta la variabile standardizzata, X la variabile che si intende standardizzare, μ e σ rispettivamente la media e la deviazione standard della distribuzione.

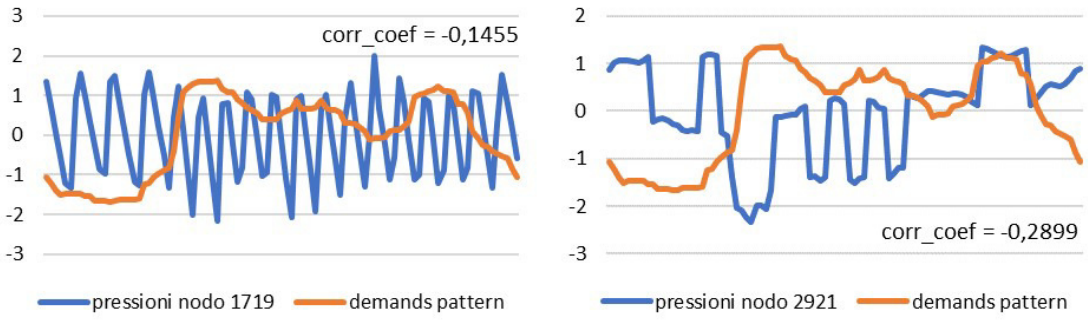


Figura 4.13: Serie temporali di domande e pressioni

Si può osservare in figura 4.13 come entrambi i nodi presentino coefficienti di Pearson inferiori a 0,3 in valore assoluto, evidenziando quindi una scarsa correlazione con l'andamento delle domande.

Un discorso analogo può essere affrontato relativamente alle portate, anche se in questo caso la situazione risulta un po' più frammentata e articolata. Oltre a correlazioni deboli o moderate, ma pur sempre positive, si osservano anche casi di forti correlazioni negative. Alcune condotte presentano infatti portate in controfase con le domande, come si osserva in figura 4.14 (a sinistra) nella quale sono riportate, a scopo di esempio, le serie temporali standardizzate delle domande e delle portate relative ad una condotta situata nella parte meridionale della rete. L'immagine di destra mostra invece un caso di debole correlazione domanda-portata, relativo ad una condotta della zona sud orientale.

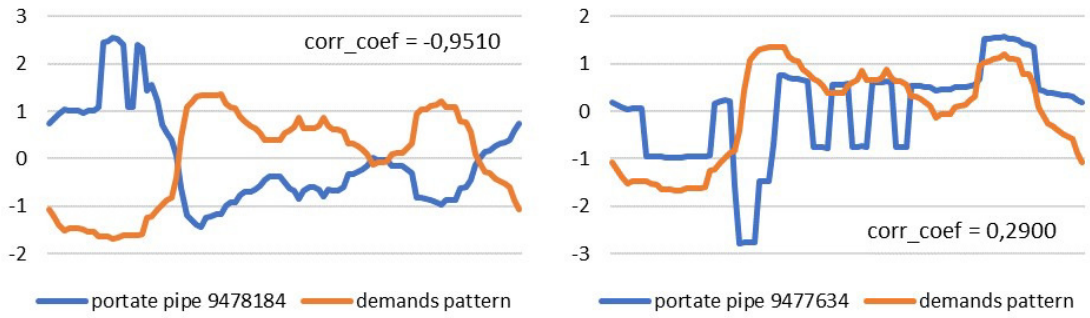
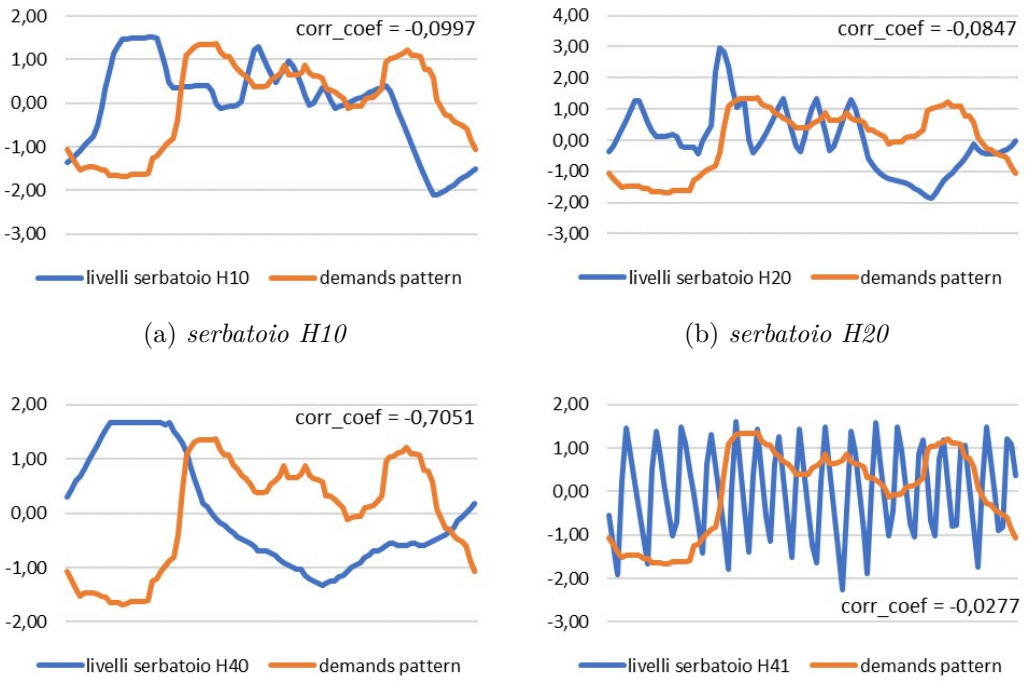


Figura 4.14: Serie temporali standardizzate di domande e portate

CORRELAZIONI LIVELLI-PRESSIONI E LIVELLI-PORTATE

Prima di analizzare le relazioni che intercorrono fra gli output del sistema e i livelli nei serbatoi si vuole esaminare come questi ultimi variano relativamente alla domanda, al fine di poter comprendere al meglio le successive considerazioni. La figura 4.15 mostra l'andamento dei livelli dei 4 serbatoi della rete confrontati con la serie temporale delle domande. Viene inoltre riportato il coefficiente di Pearson. Si può notare come l'unico serbatoio ad avere livelli fortemente correlati con le domande sia l'H40. Quest'ultimo è infatti il più grande della rete e come anticipato nel paragrafo 4.1.2 è l'unico a possedere una notevole capacità di compenso. Si osservi infatti che l'andamento dei livelli risulta in controfase con quello delle domande: nelle ore di picco il serbatoio fornisce pertanto il suo contributo a soddisfare la maggiore richiesta idrica da parte delle utenze.

Alla luce di quanto sopra illustrato, ci si deve dunque aspettare, relativamente al serbatoio H40, una forte correlazione con pressioni e portate. In particolare, in virtù della proporzionalità inversa con le domande, è lecito attendersi, al crescere del livello, pressioni elevate e portate esigue. Viceversa, al diminuire del carico nel



(a) *serbatoio H10*

(b) *serbatoio H20*

(c) *serbatoio H40*

(d) *serbatoio H41*

Figura 4.15: Serie temporali standardizzate di domande e livelli

serbatoio si avranno basse pressioni ed alte portate. A conferma di quanto ipotizzato, si mostrano in figura 4.16 i coefficienti di correlazione livelli-pressioni (in alto) e livelli-portate (in basso) riferiti al serbatoio H40. Si può osservare un dualismo quasi perfetto con le correlazioni relative alle domande, seppur con qualche discrepanza rispetto alle aspettative, specie in riferimento alle portate. Infatti, in luogo delle correlazioni negative forti ipotizzate, si riscontrano correlazioni leggermente più moderate. Permane tuttavia, la suddivisione in zone osservata nel grafico domande-portate: una zona centrale omogenea caratterizzata, in questo caso, da valori elvati/moderati del coefficiente di Pearson, circondata da una situazione frammentata.

Relativamente agli altri tre serbatoi, non si sono riscontrate correlazioni dei livelli con gli output meritevoli di attenzione. Per i serbatoi H10 e H20 si osservano, al più, valori moderati del coefficiente di correlazione livelli-pressioni, tutti concentrati nella parte sud orientale della rete. Il serbatoio H41 risulta invece assolutamente non correlato con le pressioni. Per quanto riguarda le portate si sono constatate, in tutti i casi, deboli correlazioni. A scopo illustrativo, si riportano di seguito i grafici relativi alle correlazioni livelli-pressioni e livelli-portate per il serbatoio H10. Si mostrano inoltre (figura 4.18) le serie temporali delle pressioni e delle portate

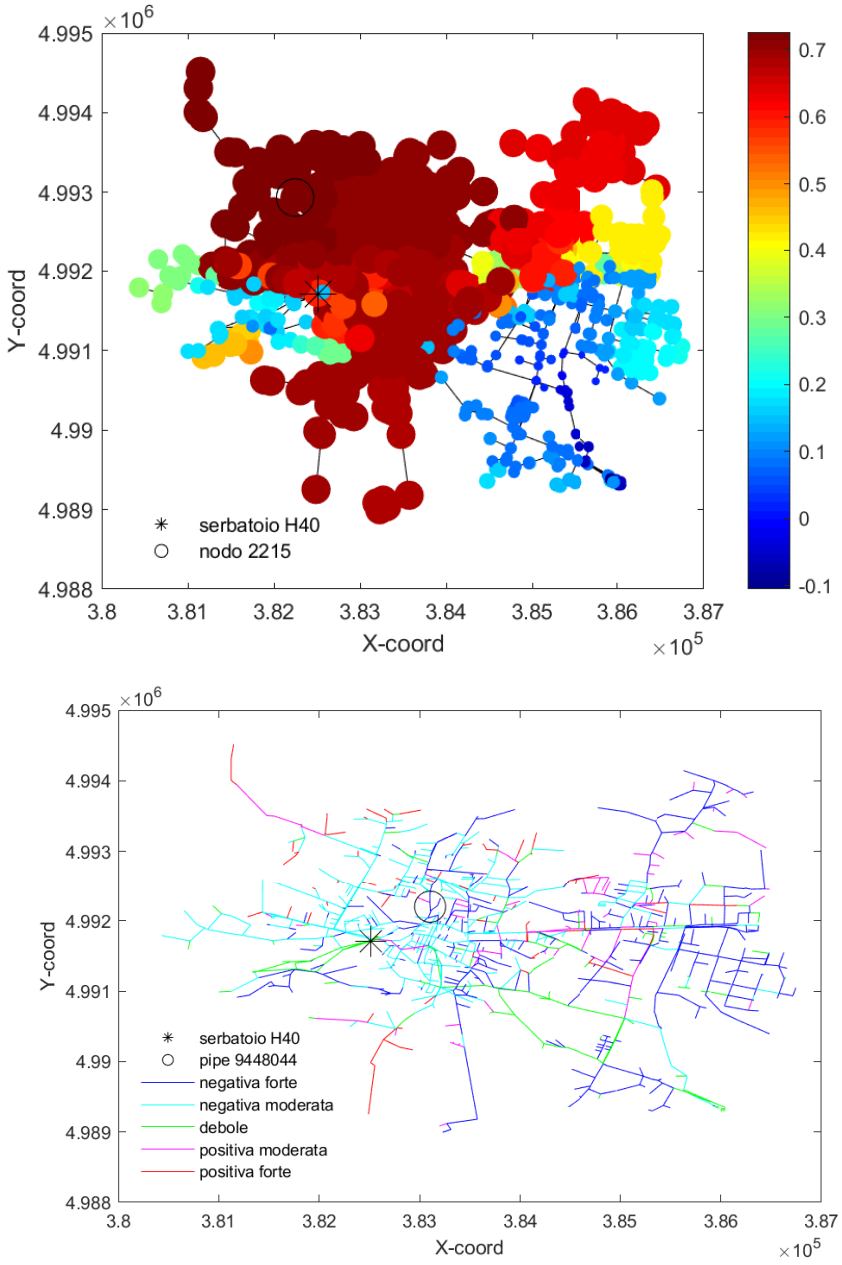


Figura 4.16: Correlazione livelli-pressioni (sopra) e livelli-portate (sotto) per il serbatoio H40: la legenda indica l'entità delle correlazioni

rispettivamente del nodo 2215 e della condotta 9448044, confrontate con i livelli dei serbatoi H10 ed H40.

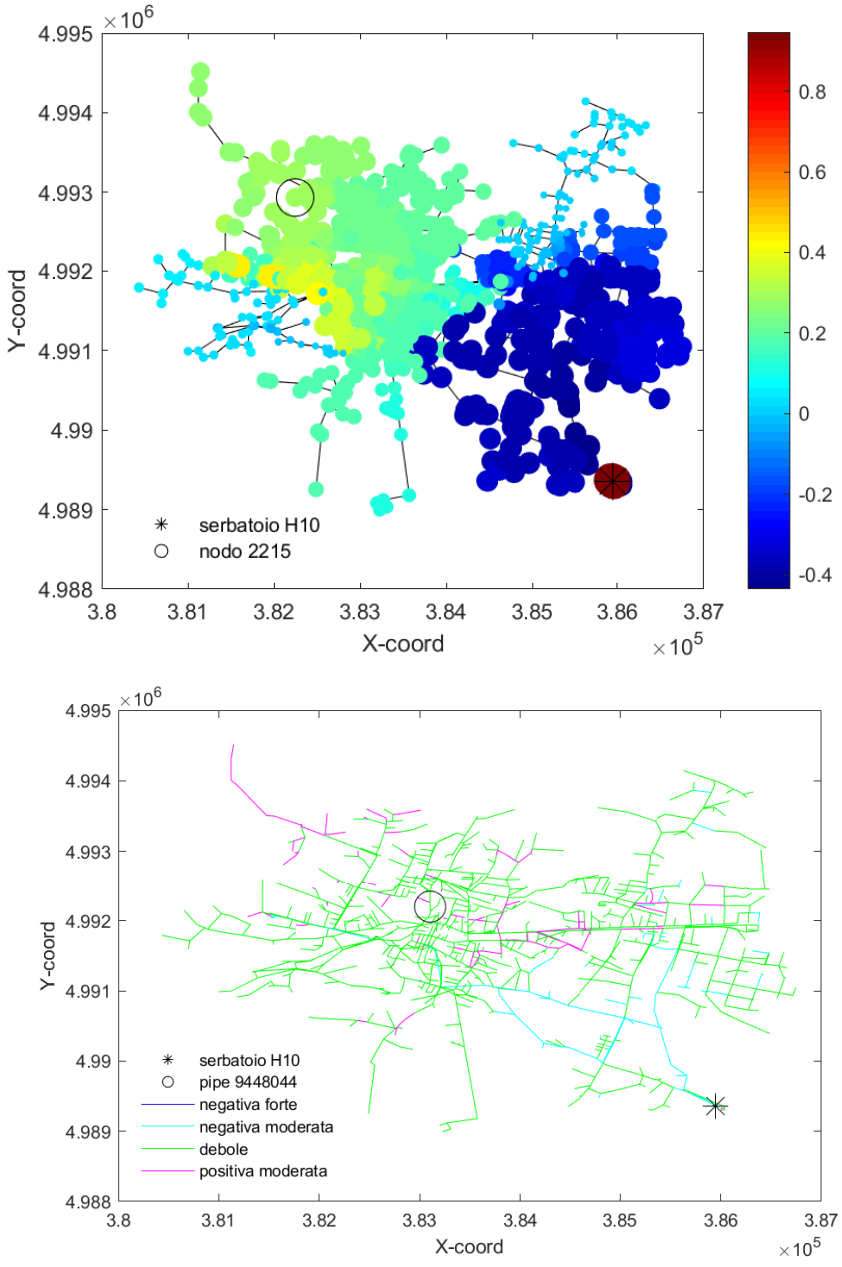


Figura 4.17: Correlazione livelli-pressioni (a sinistra) e livelli-portate (a destra) per il serbatoio H10

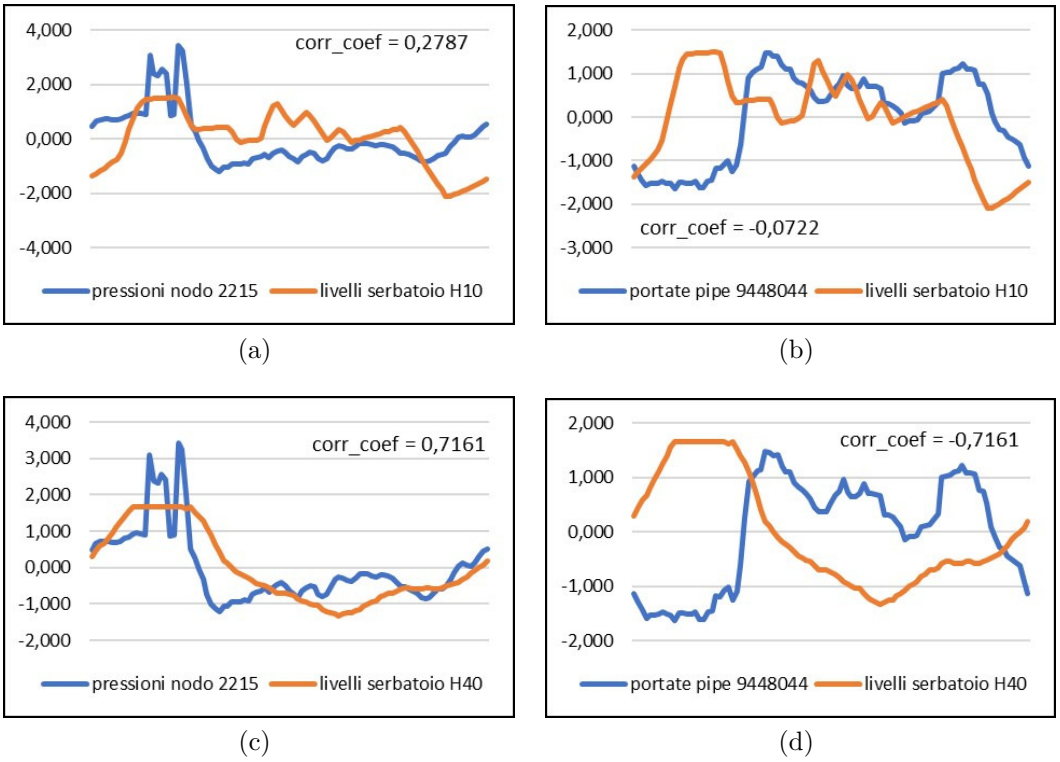


Figura 4.18: Serie temporali standardizzate di pressioni e portate per il nodo 2215 e la condotta 9448044: confronto con i livelli del serbatoio H10 (figure a e b) e H40 (figure c e d)

In conclusione si vuole fare notare come la situazione generale, in merito alle correlazioni fra livelli ed output, possa essere ben rappresentata dai grafici mostrati nella seguente figura 4.19, raffiguranti le distribuzioni cumulate di probabilità dei coefficienti di Pearson.

Relativamente alle pressioni (immagine in alto), si può osservare quanto sopra analizzato: esse risultano fortemente correlate, per gran parte della rete, ai soli livelli del serbatoio H40. I serbatoi H10 ed H20 sono caratterizzati da valori del coefficiente perlopiù bassi o moderati. Il serbatoio H41 risulta assolutamente non correlato.

Per quanto riguarda le portate è riscontrabile quasi la medesima situazione. Il solo serbatoio H40 influenza le portate di un'importante porzione di rete: si tratta in questo caso di correlazioni negative; si osserva circa un 60% di valori compresi nell'intervallo -0,8÷-0,6. Gli altri tre serbatoi presentano invece correlazioni perlopiù deboli con le portate. L'80% dei valori è infatti osservabile nell'intervallo -0,3÷0,3.

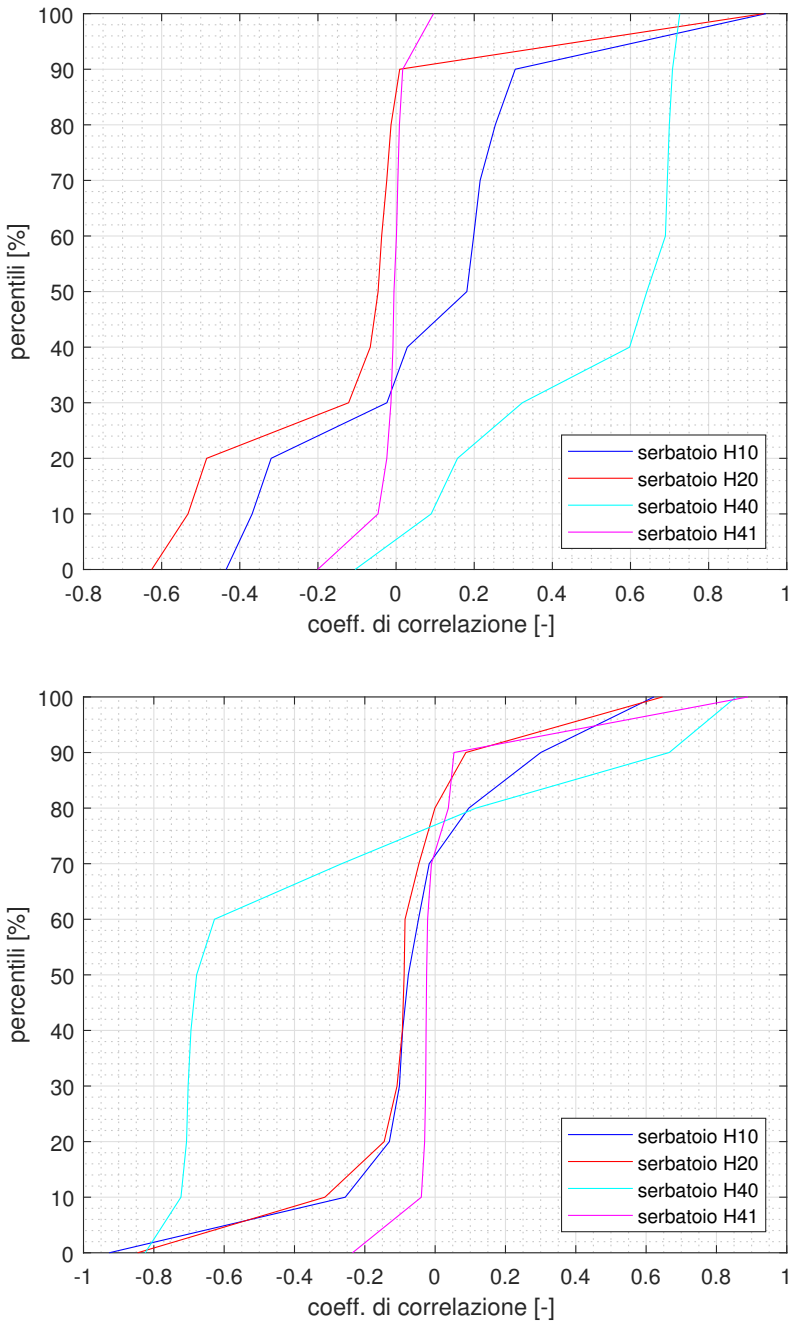


Figura 4.19: Distribuzioni cumulate dei coefficienti di correlazione livelli-pressioni (sopra) e livelli-portate (sotto)

INFLUENZA DELLE POMPE

Dalle analisi mostrate nelle pagine precedenti si è potuto osservare che alcune zone della rete non risultano correlate nè alle domande nè ai livelli imposti dai serbatoi. In questa sezione, ci si propone di determinare eventuali influenze delle pompe sulle pressioni e sulle portate di tali zone.

In riferimento alle pressioni, si rammenta che la parte sud orientale era quella che si discostava maggiormente dal comportamento generale della rete. Tale discrepanza può essere spiegata analizzando le correlazioni prevalenze-pressioni relative alle pompe che servono la zona in esame. Ci si riferisce alle pompe di pescaggio G11, G12 e G13 che prelevano la risorsa idrica dal campo pozzi di zona 1a, situato all'estremità sud orientale, e la immettono direttamente in rete; alle pompe G14 e G15 che estraggono l'acqua dal medesimo campo pozzi e la indirizzano verso il serbatoio H10; alle pompe M16, M17, M18 ed M19 che fungono da rilancio verso il serbatoio H20. Per tutti questi elementi si sono osservate correlazioni da moderate a forti nei confronti delle pressioni ai nodi situati nella parte bassa della rete. A titolo di verifica si mostra in figura 4.20 (in alto) il grafico relativo alle correlazioni prevalenze-pressioni in riferimento alla pompa G11. Si evince in modo chiaro e netto l'influenza che questa pompa ha nei confronti delle pressioni ai nodi situati nelle immediate vicinanze.

Un discorso analogo può essere affrontato relativamente alle correlazioni fra portate delle pompe e portate in condotta. Gli elementi sopra citati ed in particolar modo quelli dotati di sistemi di controllo che ne decretano il funzionamento a intermittenza, influenzano in modo direttamente proporzionale l'andamento delle portate nella zona di rete in esame ed in particolare quelle condotte che risultavano non correlate con le domande. La figura 4.20 (in basso) mostra quanto suddetto relativamente alla pompa M18. Quando essa si accende, dando il proprio contributo al rifornimento del serbatoio H20, si osserva un aumento delle portate in alcune condotte della parte sud orientale. In particolare, le condotte che risentono maggiormente dell'influenza della pompa M18 sono quelle che convogliano la risorsa verso le pompe M31 ed M32: in accordo con lo schema di funzionamento infatti, queste ultime hanno il compito di rilanciare la risorsa verso il serbatoio H40, posto nella parte intermedia della rete.

Altri comportamenti simili sono riscontrabili nella zona nord est. Le pompe G61 e G62, che prelevano la risorsa idrica dal campo pozzi situato nella zona medesima (zona 7), immettono acqua direttamente in rete, influenzando fortemente pressioni e portate nella parte suddetta. A tal proposito, la figura 4.21 mostra i coefficienti di correlazione fra prevalenze della pompa G61 e pressioni ai nodi e fra portate della pompa medesima e portate circolanti in rete. Si osserva che la zona nord orientale è caratterizzata da una forte dipendenza diretta con la pompa suddetta.

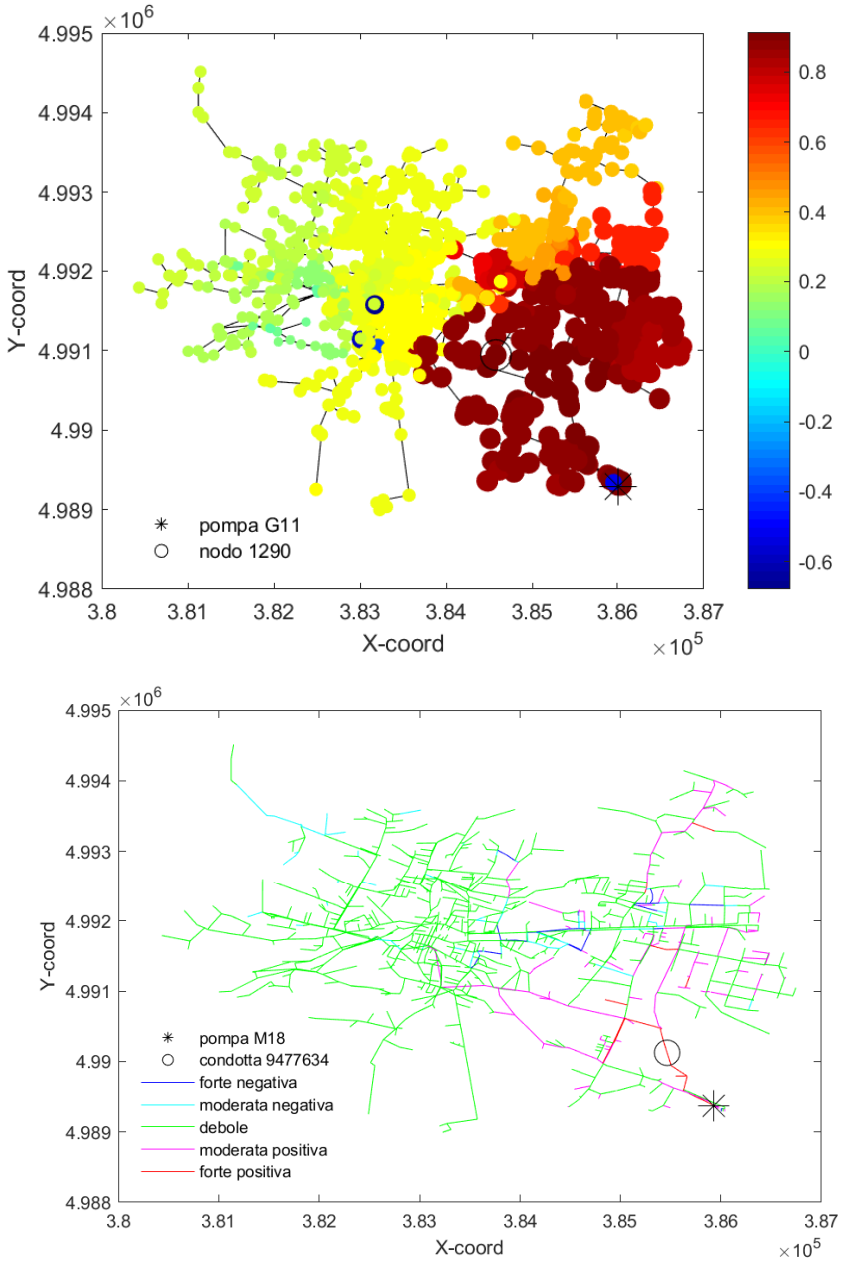


Figura 4.20: Influenza della pompa G11 (sopra) ed M18 (sotto) rispettivamente sulle pressioni e sulle portate della zona sud orientale

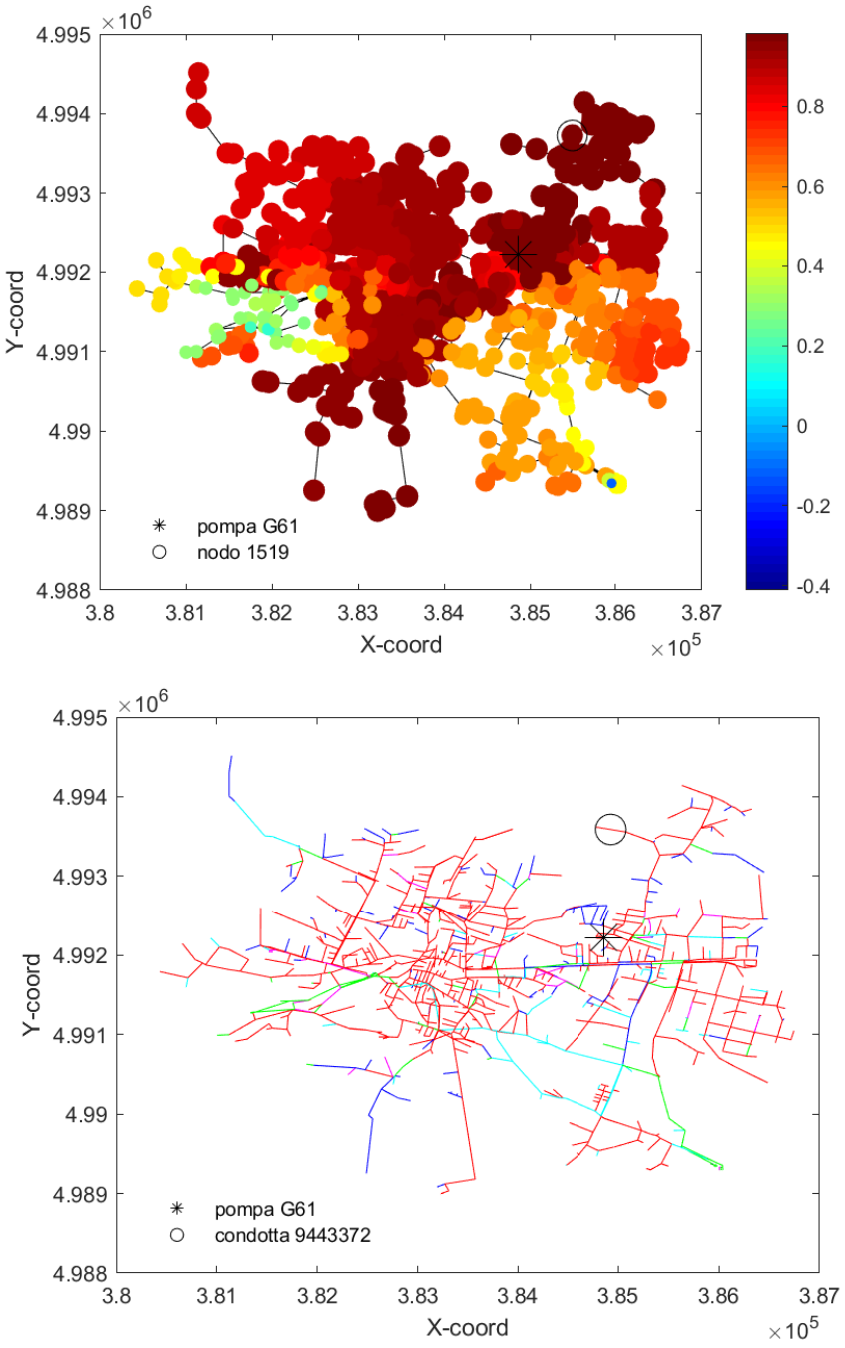
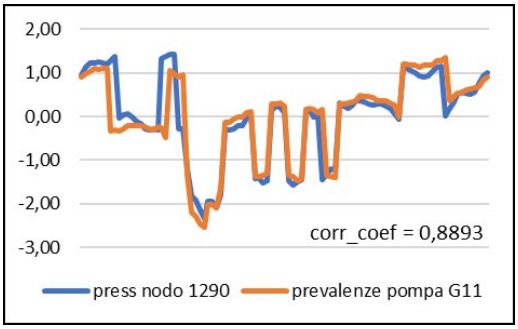
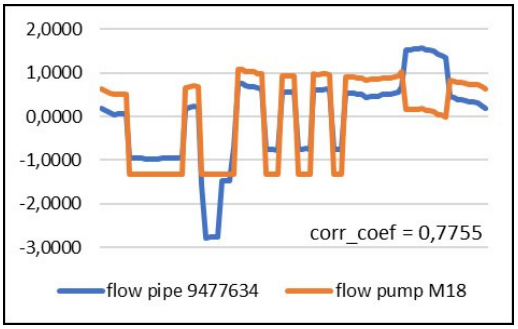


Figura 4.21: Influenza della pompa G61 su pressioni (sopra) e portate (sotto)

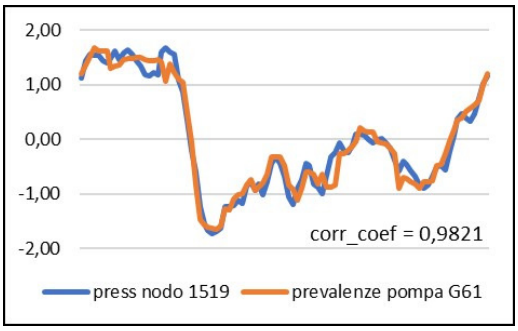
A titolo di esempio si mostrano in figura 4.22 alcune serie temporali standardizzate di pressioni e portate relative a nodi e condotte della zona orientale, confrontate con l'andamento delle prevalenze e delle portate delle pompa sopra esaminate.



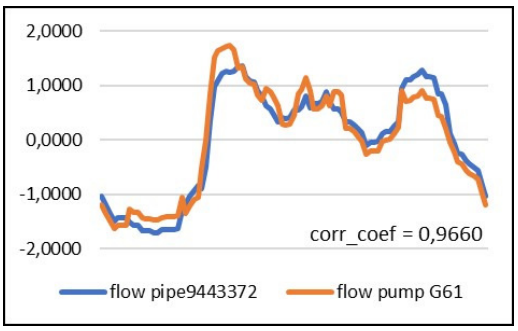
(a) *pressioni nodo 1290 - prevalenze pompa G11*



(b) *portate condotta 9477634 - portate pompa M18*



(c) *pressioni nodo 1519 - prevalenze pompa G61*



(d) *portate condotta 9443372 - portate pompa M18*

Figura 4.22: Serie temporali standardizzate di pressioni e portate per i nodi 1290, 1519 e le condotta 9477634, 9443372: confronto con le prevalenze e le portate delle pompe G11, M18 e G61

Si nota inoltre, che vi sono anche zone della parte intermedia della rete che risultano fortemente correlate, in senso positivo, con prevalenze e portate della pompa G61. In questo caso si tratta tuttavia di correlazioni indirette: analizzando ad esempio la serie temporale delle portate della pompa in esame, si osserva un andamento molto simile a quello del pattern delle domande, come mostrato in figura 4.23. Valgono le medesime considerazioni per la serie delle prevalenze.

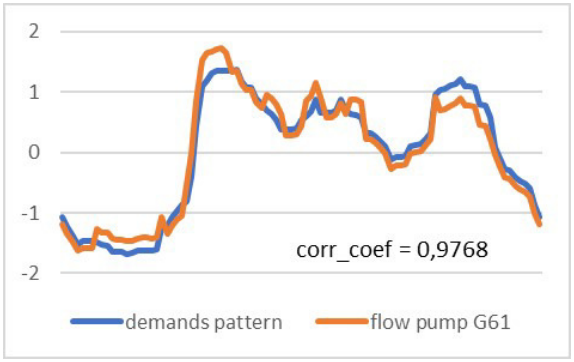


Figura 4.23: Correlazione fra pattern delle domande e portate pompa G61: serie temporali standardizzate

Per i casi non illustrati nel presente paragrafo, poichè ritenuti meno significativi, si rimanda all'appendice.

Capitolo 5

CONCLUSIONI GENERALI

L'obiettivo dell'attività svolta nell'ambito della presente tesi è stato quello di analizzare nel dettaglio il comportamento idraulico di una rete acquedottistica realmente esistente e di studiarne i legami che intercorrono fra le varie componenti del sistema. Per fare ciò, ci si è serviti del modello numerico di una rete di medie dimensioni, che serve una popolazione di circa 50'000 abitanti. Tale modello è stato costruito e calibrato nell'ambito dell'attività di ricerca di una tesi di dottorato, svolta in collaborazione con Smat, gestore della rete stessa.

Una prima parte della tesi, ha riguardato lo studio dei singoli elementi che compongono il sistema acquedottistico. In particolare si è analizzata la distribuzione spaziale e temporale delle grandezze idrauliche caratteristiche di una rete di distribuzione. Si sono esaminati il comportamento medio e le variazioni nello spazio e nel tempo delle domande, dei livelli nei serbatoi, delle prevalenze delle pompe, nonchè di pressioni e portate in rete. Ciò che più si è evidenziato in questa fase è la struttura della rete. Le domande medie delle utenze sono caratterizzate da bassi valori per la maggiorparte dei nodi, i quali presentano anche oscillazioni contenute nell'arco della giornata. Pochi nodi esibiscono invece richieste idriche più elevate, unite a variazioni nel tempo altrettanto marcate. Indagando i carichi imposti da pompe e serbatoi, si osservate forti variazioni nello spazio. Non vi sono tuttavia salti bruschi fra una zona e l'altra e i livelli seguono gradualmente l'andamento delle quote. Riguardo a pressioni e portate si sono poi riscontrate due situazioni opposte. Le prime sono risultate piuttosto eterogenee nello spazio, seppur contenute in un intervallo accettabile: l'80% circa dei valori è compreso fra i 40 e gli 80 metri di colonna d'acqua. Per le seconde si è invece evidenziato un comportamento simile a quello osservato per le domande, con la maggiorparte degli elementi caretterizzati da basse portate unite a modeste oscillazioni temporali della stessa e pochi casi di valori elevati ed elevate variazioni nell'arco della giornata. Quest'ultimo aspetto ha mostrato la struttura della rete: poche condotte, provenienti dalle zone di produzione, convogliano alte portate, mentre il resto delle stesse distribuisce la risorsa in modo capillare con bassi valori del flusso.

Nella seconda parte della presente monografia si sono analizzate le correlazioni fra le componenti della rete che si sono studiate singolarmente nel capitolo precedente. Nello specifico si è voluto esaminare il comportamento degli output nei confronti delle altre grandezze idrauliche caratteristiche, al fine di valutare eventuali legami e il grado di connessione delle stesse. Lo strumento che si è ritenuto più idoneo per svolgere quanto suddetto è stato il coefficiente di correlazione di Bravais-Pearson. Si è dunque calcolato tale indice per analizzare le correlazioni domande-pressioni, domande-portate, livelli-pressioni e livelli-portate. Lo stesso coefficiente si è inoltre utilizzato per determinare l'influenza delle pompe su alcune zone della rete. I risultati sono stati eterogenei. Le pressioni hanno mostrato connessioni con le domande e con i livelli del serbatoio H40, ma solo nella parte centrale della rete. In particolare si è rilevato un legame di inversa proporzionalità con le prime e diretta con i secondi. Per le portate la situazione è emersa leggermente più frammentata, ma si sono comunque osservate correlazioni positive con le domande e negative con i livelli del serbatoio H40, in maniera del tutto opposta al comportamento delle pressioni. Relativamente agli altri serbatoi della rete e in particolare ai serbatoi H10 e H20 si sono riscontrate correlazioni al più moderate, per la sola zona orientale, mentre il serbatoio H10 non ha mostrato legami con l'andamento di pressioni e portate. Alcune zone, risultate non correlate a livelli e domande, hanno poi esibito un comportamento fortemente connesso all'andamento di prevalenze e portate delle pompe che agiscono nelle zone medesime. É il caso delle zone sud orientale e nord orientale, influenzate rispettivamente dalle pompe della zona 1a e 1b e della zona 7.

In conclusione del lavoro, è emerso un quadro completo del comportamento della rete. Ciò che si vuole evidenziare è la profonda complessità del sistema. Seppur di stampo teorico, la tesi offre spunti pratici per la gestione delle reti di distribuzione. In particolare, la conoscienza delle dinamiche che avvengono in essa mette in guardia il gestore dall'adottare accorgimenti banali, talvolta dettati dall'empirismo e dalla tradizione.

Appendice A

In questo capitolo vengono presentati ulteriori risultati delle analisi, che si è ritenuto opportuno inserire in appendice poichè meno rappresentativi di quelli esposti nel capitolo 4.

Si mostra, in primo luogo, la distribuzione dei coefficienti di correlazione livelli-pressioni e livelli-portate per i serbatoi H20 ed H41, non esibiti nel capitolo 4. Si osserva la scarsa influenza (con l'eccezione di qualche elemento) dei livelli sia nei confronti delle pressioni che delle portate (figure A.1 e A.2).

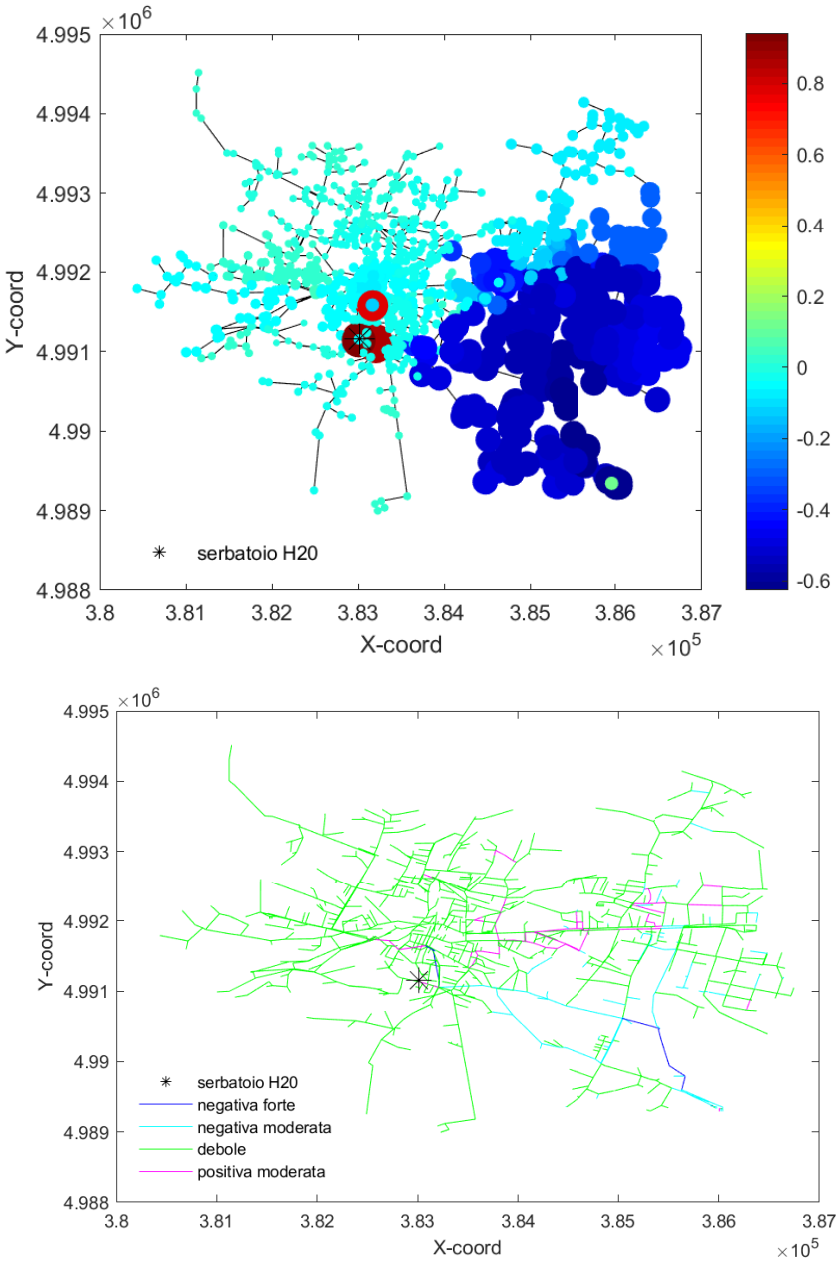


Figura A.1: Coefficienti di correlazione livelli-pressioni (sopra) e livelli-portate (sotto) per il serbatoio H20

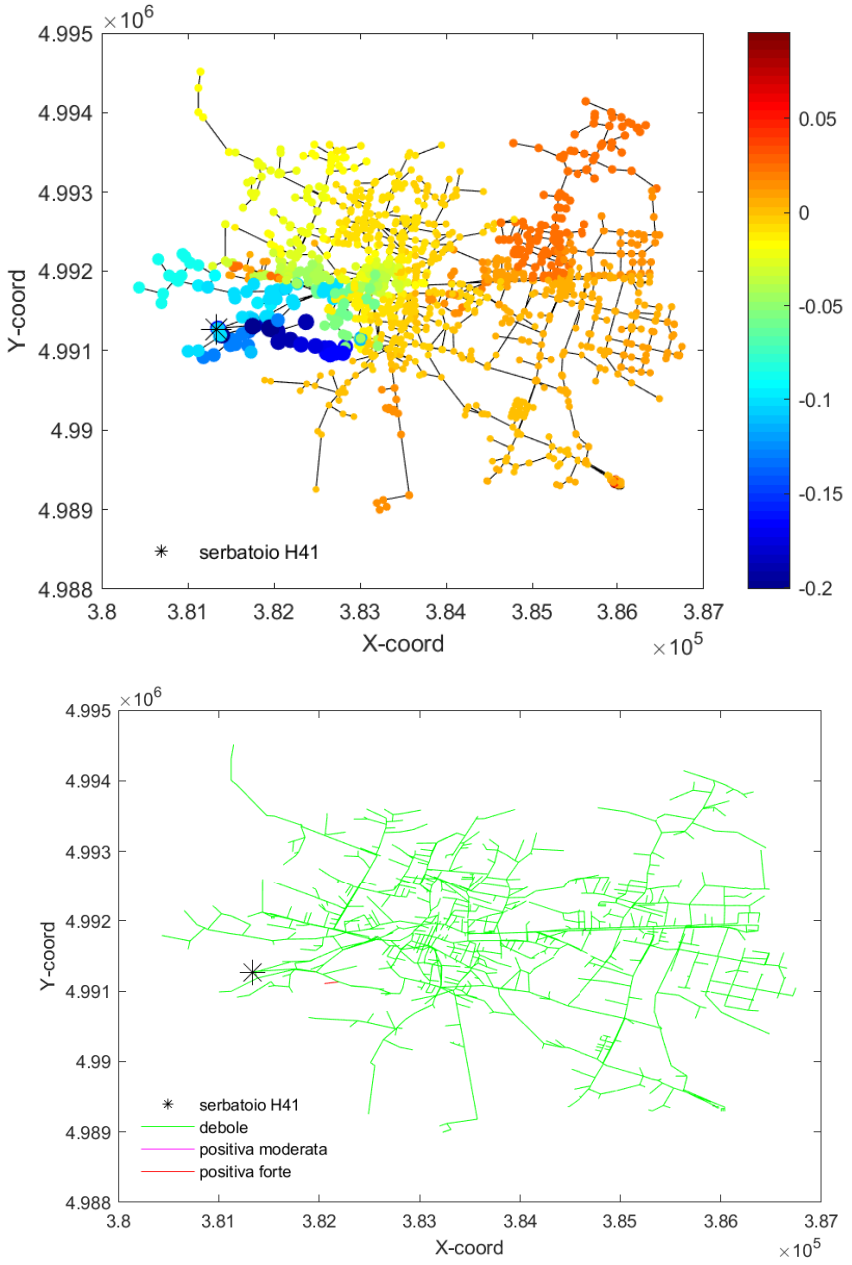


Figura A.2: Coefficienti di correlazione livelli-pressioni (sopra) e livelli-portate (sotto) per il serbatoio H41

A.1 Correlazioni livelli-pressioni e livelli-portate: influenza della distanza

Un'ulteriore analisi circa le correlazioni livelli-pressioni e livelli-portate è stata svolta per verificare eventuali relazioni con le distanze dai serbatoi considerati. In altre parole si voleva constatare se una eventuale connessione fra livelli e pressioni (o portate) fosse funzione della distanza fra il serbatoio e il nodo (o la condotta) considerati. Per fare ciò si sono prese in esame 4 diverse distanze:

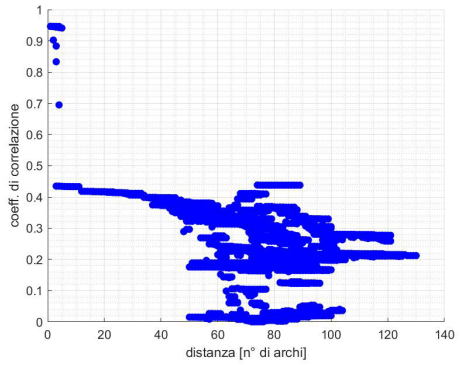
- DISTANZA IN NUMERO DI ARCHI SU GRAFO NON ORIENTATO: pensando la rete come un grafo, rappresenta la minor distanza, espressa in numero di archi, per andare da un punto A (il serbatoio considerato) a un punto B (il generico nodo).

- DISTANZA EUCLIDEA SU GRAFO NON ORIENTATO: come per il caso precedente si considera il grafo non orientato (ogni arco è percorribile in entrambi i sensi), ma la distanza è espressa in metri, considerando la lunghezza reale di ogni condotta.

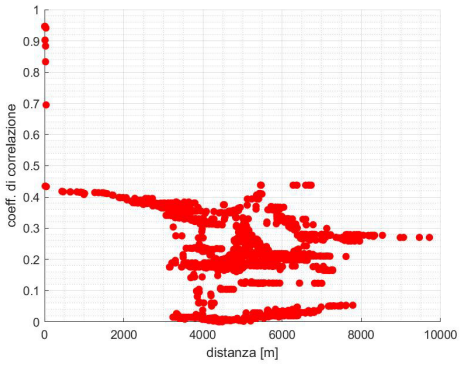
- DISTANZA IN NUMERO DI ARCHI SU GRAFO ORIENTATO: è determinata osservando che la rete è costituita da condotte nelle quali la portata circola sempre nello stesso verso; gli archi del grafo che rappresentano tali condotte risultano pertanto percorribili in una sola direzione.

- DISTANZA EUCLIDEA SU GRAFO ORIENTATO: come nel caso precedente ma con valore espresso in metri.

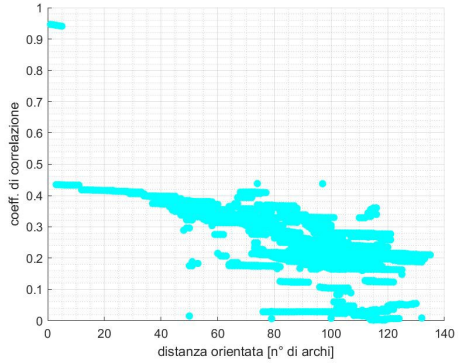
nelle figure seguenti si mostra il legame fra i coefficienti di correlazione livelli-pressioni (e livelli-portate) e le distanze suddette, per ciascuno dei 4 serbatoi. Si osserva come la distanza, in qualunque modo essa sia presa, non svolge nessun ruolo nei confronti delle correlazioni fra livelli ed output del sistema.



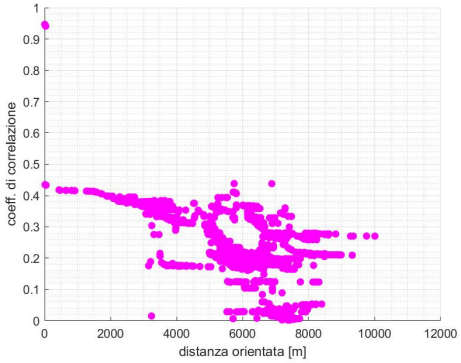
(a) *distanza in numero di archi su grafo non orientato*



(b) *distanza euclidea su grafo non orientato (m)*

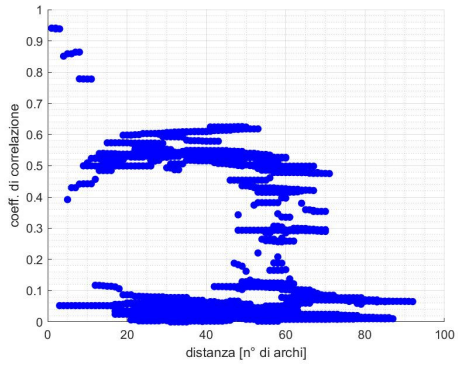


(c) *distanza in numero di archi su grafo idraulicamente orientato*

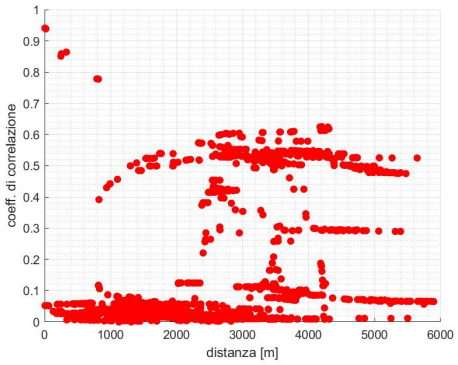


(d) *distanza euclidea su grafo idraulicamente orientato (m)*

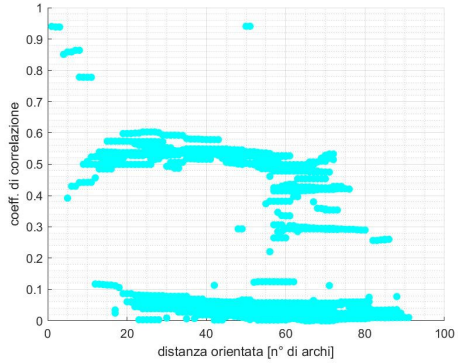
Figura A.3: Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-pressioni per il serbatoio H10



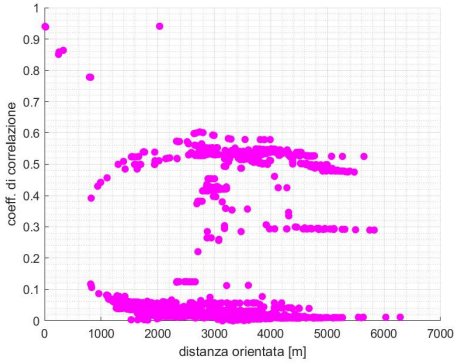
(a) *distanza in numero di archi su grafo non orientato*



(b) *distanza euclidea su grafo non orientato (m)*

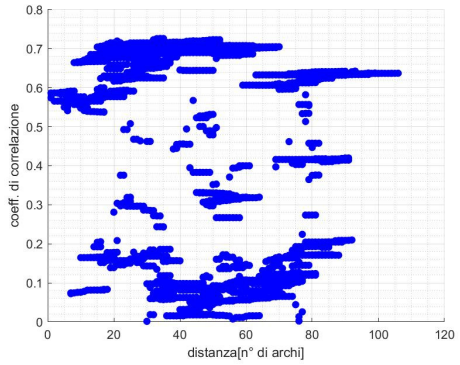


(c) *distanza in numero di archi su grafo idraulicamente orientato*

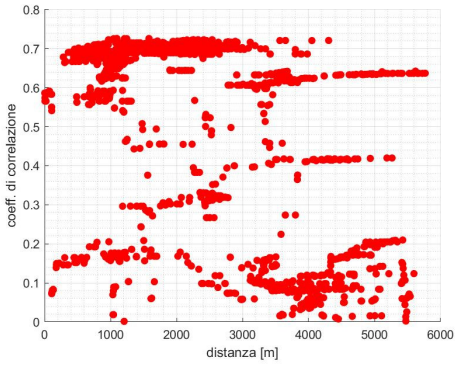


(d) *distanza euclidea su grafo idraulicamente orientato (m)*

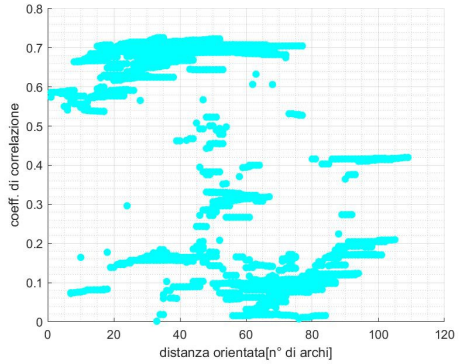
Figura A.4: Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-pressioni per il serbatoio H20



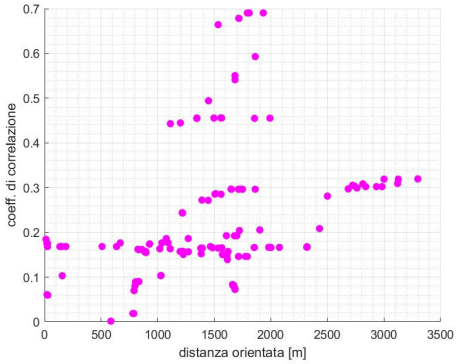
(a) *distanza in numero di archi su grafo non orientato*



(b) *distanza euclidea su grafo non orientato (m)*

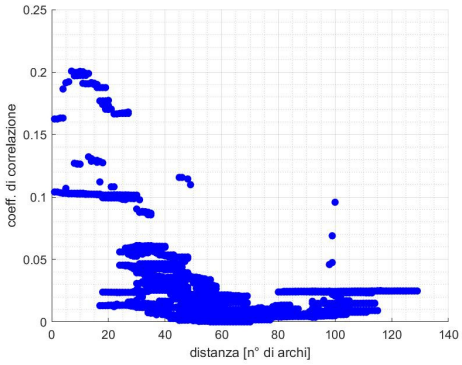


(c) *distanza in numero di archi su grafo idraulicamente orientato*

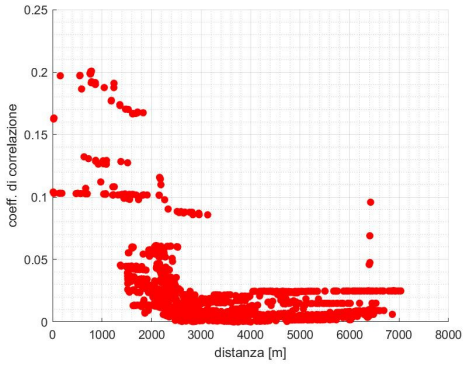


(d) *distanza euclidea su grafo idraulicamente orientato (m)*

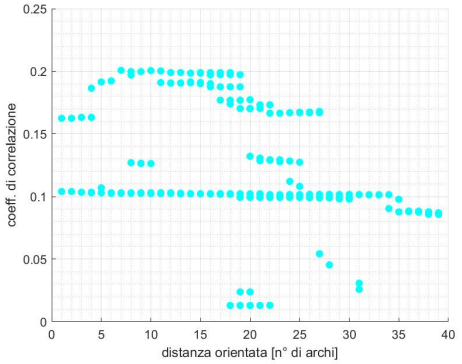
Figura A.5: Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-pressioni per il serbatoio H40



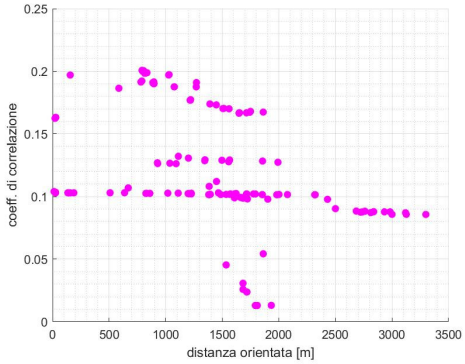
(a) *distanza in numero di archi su grafo non orientato*



(b) *distanza euclidea su grafo non orientato (m)*

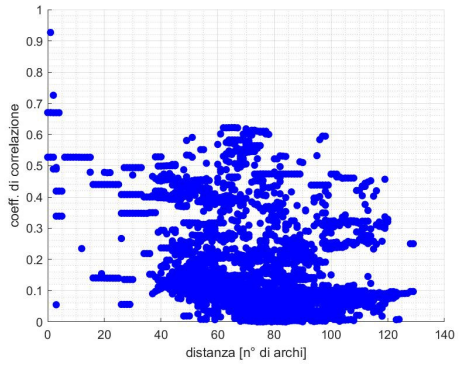


(c) *distanza in numero di archi su grafo idraulicamente orientato*

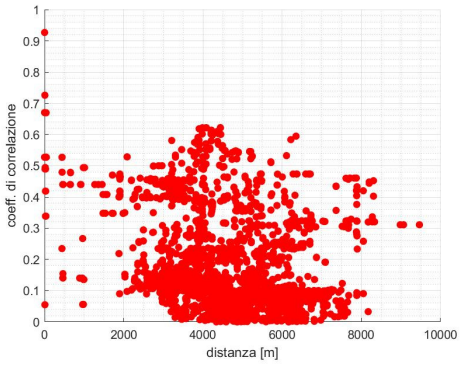


(d) *distanza euclidea su grafo idraulicamente orientato (m)*

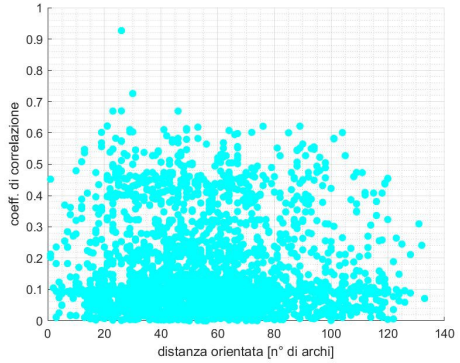
Figura A.6: Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-pressioni per il serbatoio H41



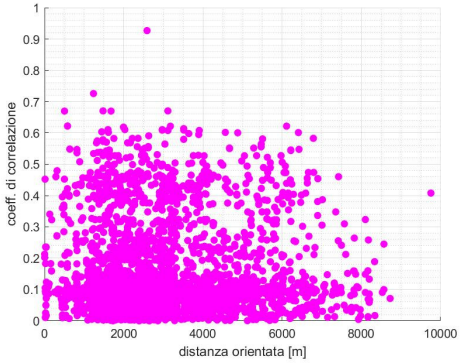
(a) *distanza in numero di archi su grafo non orientato*



(b) *distanza euclidea su grafo non orientato (m)*

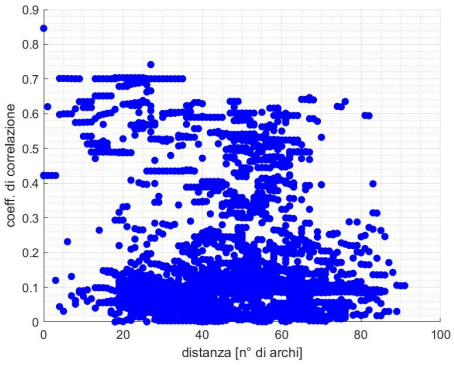


(c) *distanza in numero di archi su grafo idraulicamente orientato*

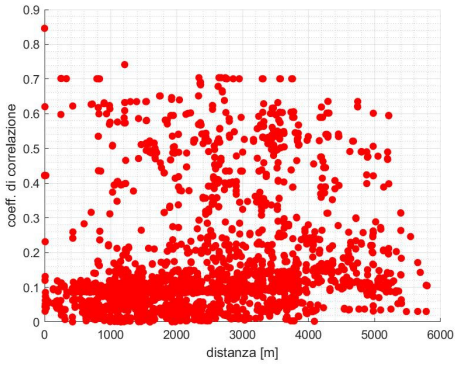


(d) *distanza euclidea su grafo idraulicamente orientato (m)*

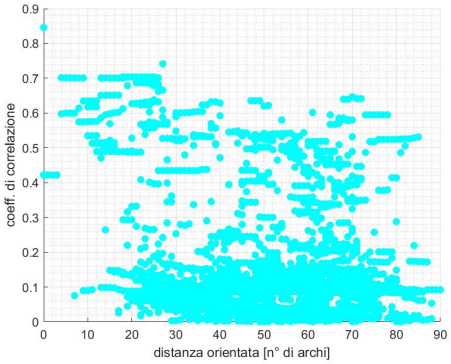
Figura A.7: Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-portate per il serbatoio H10



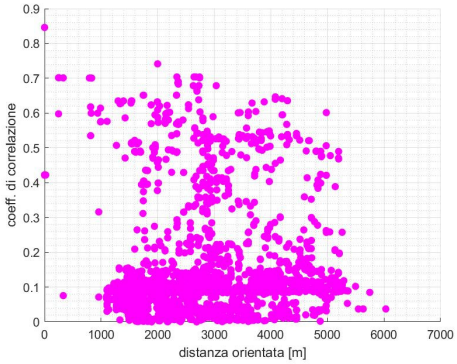
(a) *distanza in numero di archi su grafo non orientato*



(b) *distanza euclidea su grafo non orientato (m)*

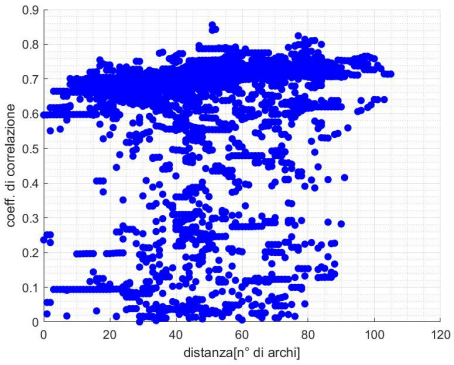


(c) *distanza in numero di archi su grafo idraulicamente orientato*

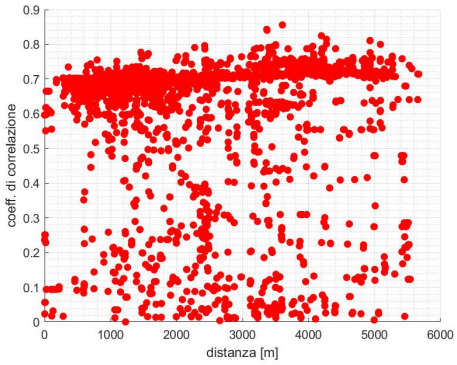


(d) *distanza euclidea su grafo idraulicamente orientato (m)*

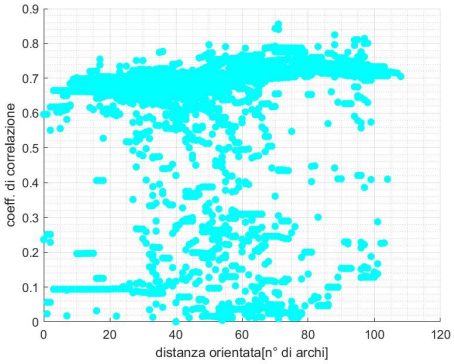
Figura A.8: Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-portate per il serbatoio H20



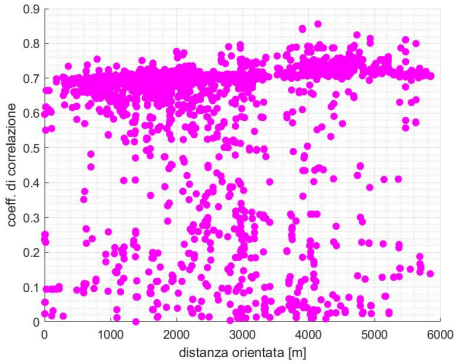
(a) *distanza in numero di archi su grafo non orientato*



(b) *distanza euclidea su grafo non orientato (m)*

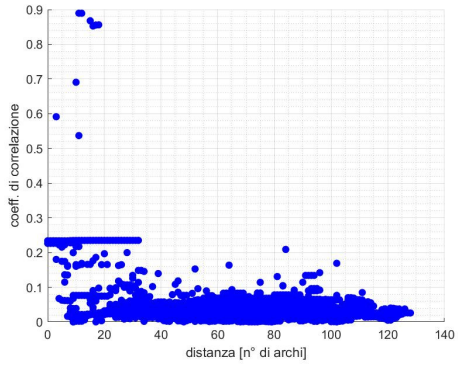


(c) *distanza in numero di archi su grafo idraulicamente orientato*

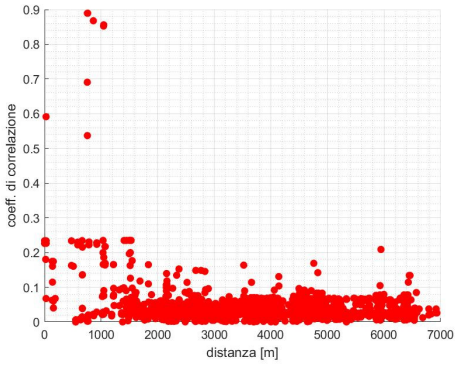


(d) *distanza euclidea su grafo idraulicamente orientato (m)*

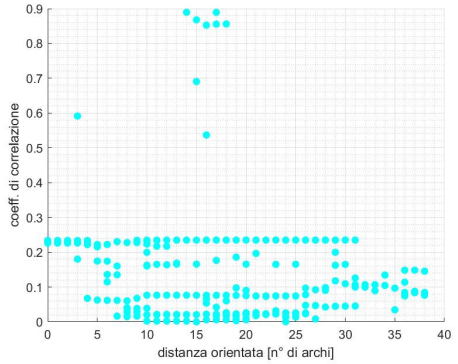
Figura A.9: Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-portate per il serbatoio H40



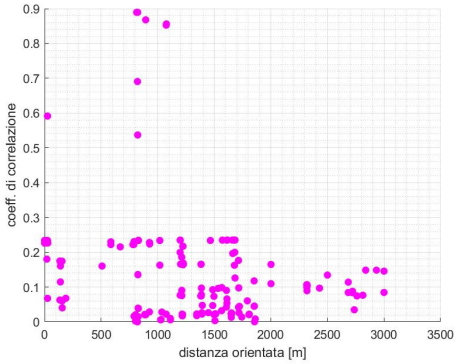
(a) *distanza in numero di archi su grafo non orientato*



(b) *distanza euclidea su grafo non orientato (m)*



(c) *distanza in numero di archi su grafo idraulicamente orientato*



(d) *distanza euclidea su grafo idraulicamente orientato (m)*

Figura A.10: Influenza della distanza sulle correlazioni livelli-portate per il serbatoio H41

A.2 Influenza delle pompe

Si mostrano qui altri casi interessanti relativi all'influenza delle pompe su pressioni e portate in certe zone della rete, non esposti nel paragrafo 4.2 per non appesantire la trattazione.

Si osservi in figura A.11 la correlazione che sussiste fra le portate circolanti nella zona sud occidentale, che corrisponde alla parte alta della rete, e le prevalenze e le portate della pompa M41, deputata a rilanciare circa 6 l/s dalla parte intermedia verso il serbatoio H41. In particolare l'immagine in alto mostra la correlazione prevalenze pompa - portate in rete, mentre l'immagine in basso raffigura la correlazione portate pompa - portate in rete. Appare evidente la forte similitudine (se non addirittura perfetta uguaglianza) dei due grafici e ciò può apparire strano; in virtù

delle curve di funzionamento infatti, ci si aspetta, relativamente alle pompe, prevalenze descrescenti al crescere delle portate e di conseguenza correlazioni prevalenze - portate in rete opposte a quelle portate - portate.

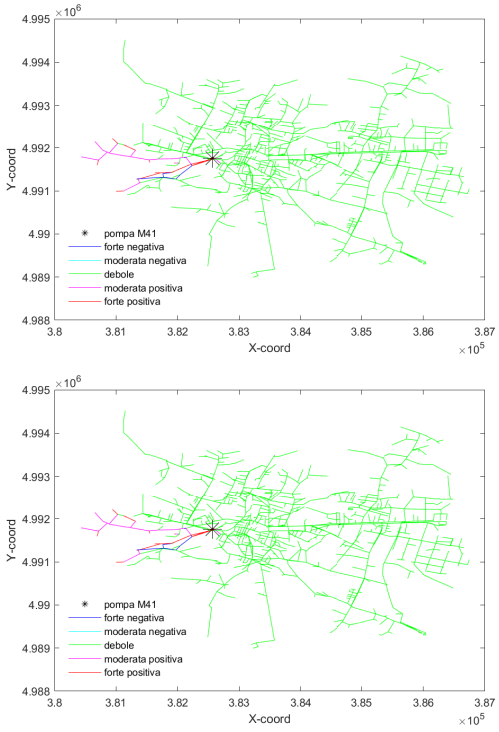


Figura A.11: Correlazione prevalenze-portate (sopra) e portate-portate (sotto) per la pompa M41

Il comportamento riscontrato può essere invece spiegato osservando le regole di accensione/spegnimento della pompa M41. Il suo funzionamento è dettato dai livelli del serbatoio H41, che presentano oscillazioni temporali piuttosto marcate. A causa di ciò la pompa stessa si ritrova ad avere un funzionamento fortemente intermittente e pertanto periodi di spegnimento si alternano molto frequentemente a periodi di accensione. Solo in questi ultimi si rilevano quindi valori di prevalenza e portata non nulli, che influenzano le portate nella parte di rete in esame. Ai fini di una maggior comprensione di quanto suddetto, si riportano di seguito (figura A.12) le serie temporali standardizzate delle portate di due condotte situate nella parte alta, confrontate con prevalenze e pressioni della pompa M41.

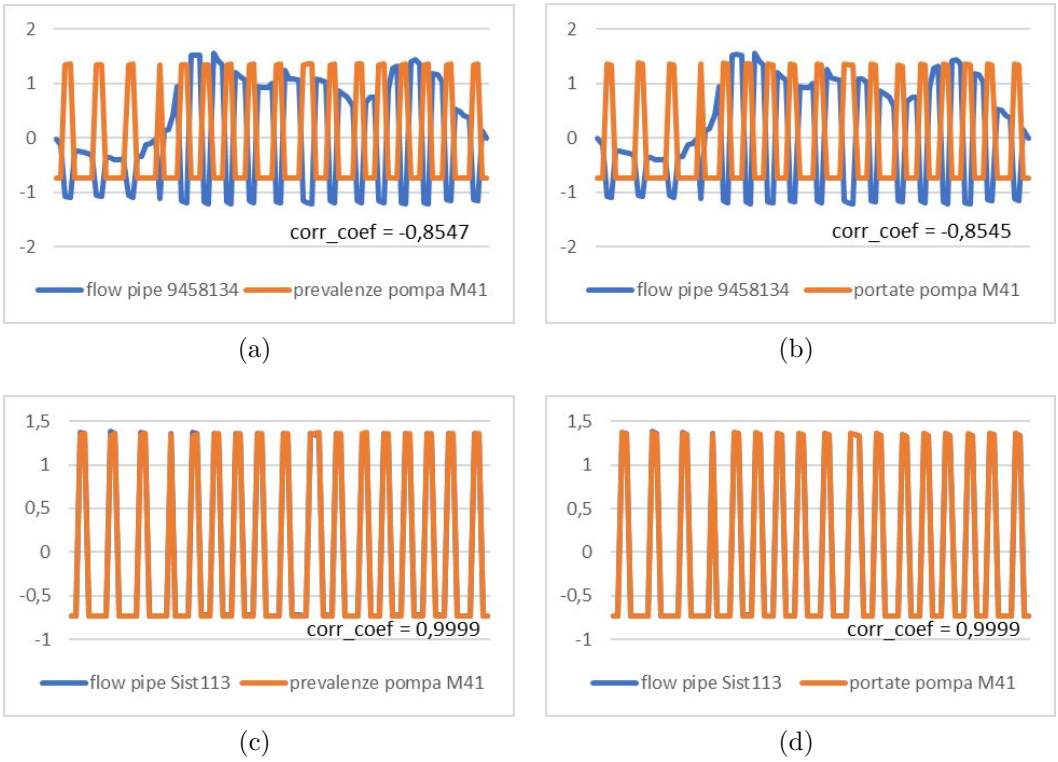


Figura A.12: Influenza della pompa M41 sulle portate delle condotte 9458134 (a), (b) e Sist113 (c), (d)

Si osserva che, per entrambe le condotte, le correlazioni nei confronti di prevalenze e portate della pompa M41 sono le medesime. In particolare per la condotta 9458134 si riscontrano correlazioni negative: al crescere di prevalenze e portate della pompa diminuisce la portata nella condotta in esame. Viceversa, la portata nella condotta Sist113 risulta direttamente proporzionale a prevalenze e portate della pompa stessa.

Bibliografia

[1] George David Birkhoff. *Dynamical systems*. American mathematical society, 1960.

[2] Mauro Bisiacco e Simonetta Braghetto. *Teoria dei sistemi dinamici*. Società Editrice Esculapio, 2010.

[3] Hardy Cross. *Analysis of flow in networks of conduits or conductors*. Rapp. tecn. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station., 1936.

[4] Luigi Da Deppo et al. *Acquedotti*. Cortina, 2003.

[5] Orazio Giustolisi, Dragan Savic e Zoran Kapelan. «Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks». In: *Journal of Hydraulic Engineering* 134.5 (2008), pp. 626–635.

[6] AN Kolmogorov. «The general theory of dynamical systems and classical mechanics». In: *Proc. Intl. Congress of Math., Amsterdam*. Vol. 1. 1954, pp. 315–333.

[7] Valerio Milano. *Acquedotti*. Hoepli Editore, 1996.

[8] LA Rossman. *The EPANET water quality model*. Rapp. tecn. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH (United States), 1995.

[9] Lewis A Rossman. «Computer models/EPANET». In: *Water distribution systems handbook, New York: McGraw Hill* (1999).

[10] Lewis A Rossman et al. «EPANET 2: users manual». In: (2000).

[11] Marco Scibetta. «Approcci innovativi per l'analisi di reti acquedottistiche». Tesi di dottorato. Politecnico di Torino.

[12] FE Thau. «Observing the state of non-linear dynamic systems». In: *International journal of control* 17.3 (1973), pp. 471–479.