

*A mio marito*

## INDICE

Abstract .....	1
Premessa.....	2
Capitolo 1: Il Problema della Calibrazione delle Reti Idriche in Pressione.....	6
1.1    La calibrazione delle reti idriche .....	6
1.2    Descrizione della procedura di calibrazione .....	6
1.3    Modalità di approccio alla calibrazione .....	7
1.4    Il metodo implicito .....	8
1.5    I metodi di verifica delle reti .....	11
1.5.1    Il metodo di verifica Demand Driven Analysis (DDA).....	11
1.5.2    Modello di verifica PDA.....	12
Capitolo 2: Il Modello UNINET.....	17
1.6    Struttura del modello di calibrazione UNINET .....	17
1.7    Stima dell'incertezza dell'output di calibrazione con UNINET .....	22
1.7.1    Teorema di Bayes.....	22
1.7.2    Applicazione dei metodi Monte Carlo alla statistica bayesiana .....	23
1.7.3    Cenni sulle Catene Markoviane .....	24
1.8    Algoritmi risolutivi.....	29
1.8.1    L'algoritmo SCEM-UA .....	29
1.8.2    Il modello di simulazione INetPDA.....	30
Capitolo 3: Metodologie di Analisi di Reti Idriche.....	34
1.9    Introduzione.....	34
1.10    Elaborazione di dati in input al modello di verifica .....	34
1.10.1    Calcolo della portata $Q_{rete}$ .....	34
1.10.2    Stima dei carichi ai nodi.....	35
1.11    Elaborazione dei risultati del modello di calibrazione .....	35
1.12    Criteri generali per il progetto della raccolta dati di misura.....	36
1.12.1    Dati necessari .....	36

1.12.2	Progetto della raccolta dati.....	37
1.13	Descrizione delle matrici di sensitività per la valutazione dei punti di misura .....	38
Capitolo 4: Modellazione di reti teoriche di letteratura con il modello UNINET .....		40
1.14	Il miglioramento della soluzione del problema di calibrazione al crescere del numero di misuratori in rete .....	40
1.14.1	Analisi della rete proposta da Walski .....	40
1.14.2	Analisi della rete proposta da Greco .....	45
1.15	Confronto fra modelli per la scelta ottimale dei punti di misura in reti idriche ai fini della calibrazione .....	52
1.15.1	Analisi con le matrici di sensitività.....	52
1.15.2	Analisi con la calibrazione in UNINET .....	57
1.15.3	Confronto dei risultati .....	58
1.16	Metodologia in UNINET per la ricerca perdite in reti idriche .....	60
1.16.1	Elaborazioni sulla rete proposta da Walski.....	61
1.16.2	Elaborazioni sulla rete proposta da Komsı .....	64
Capitolo 5: Modellazione di reti reali con UNINET.....		72
2.1	Modellazione PDA della rete di Marina di Santa Maria del Cedro .....	72
2.1.1	Descrizione della rete.....	72
2.1.2	Verifica della rete.....	76
2.2	Modellazione e calibrazione teorica della rete del comune di San Mango d’Aquino.....	88
2.2.1	Descrizione della rete idrica.....	88
2.2.2	Verifica della rete di San Mango d’Aquino in condizioni DDA (Demand Driven Analysis) e PDA (Pressure Driven Analysis).....	92
2.2.3	Individuazione dei nodi sensibili della rete.....	94
2.2.4	Calibrazione teorica della rete.....	97
2.3	Modellazione e calibrazione con dati di campo della rete di Amantea.....	100
2.3.1	Descrizione della rete.....	100
2.3.2	Verifica in condizioni DDA (Demand Driven Analysis).....	105
2.3.3	Calibrazione teorica della rete.....	106
2.3.4	Gerarchia dei nodi sensibili con le matrici di sensitività .....	110
2.3.5	Descrizione della campagna di misura.....	115
2.3.6	Calibrazione della rete disponendo di misure reali.....	123

2.3.7	Calibrazione della rete, disponendo di misure reali, con una nuova distribuzione della portata erogata ai nodi .....	132
2.3.8	Variazione della calibrazione al variare del range massimo in cui può ricadere la soluzione.....	138
	Conclusioni .....	140

## Abstract

Nella presente tesi è affrontato il problema della calibrazione delle reti idriche, modellando reti di letteratura e reti reali con l'ausilio del modello di simulazione UNINET, sviluppato presso il Dipartimento di Difesa del Suolo "V.Marone" dell'Università della Calabria.

Nella prima parte sono descritte in modo generale le problematiche della calibrazione delle reti idriche in pressione, i campi di applicazione e i vari metodi che negli anni sono stati implementati da ricercatori di tutti il mondo. In seguito è descritto il modello UNINET, a cominciare dalle basi teoriche fino alla descrizione del funzionamento dei codici INetPDA e SCEM-UA, principali componenti di UNINET. Il modello di calibrazione è sviluppato sulla base dell'algoritmo di ottimizzazione SCEM-UA che contiene al suo interno le procedure statistiche fondate sul teorema di Bayes e sul metodo Monte Carlo, per la risoluzione di integrali anche complessi. La forza di questo algoritmo risiede nel fatto che i risultati finali (distribuzione a posteriori) non dipendono dai dati di input (distribuzione a priori).

La prima modellazione è stata eseguita su classiche reti di letteratura: oltre alla calibrazione delle reti sono stati proposti due originali tipi di analisi dei risultati, finalizzati, il primo a comprendere come l'incremento dei numeri di misuratori in rete possa migliorare la soluzione del problema di calibrazione, la seconda a individuare i migliori punti sulla rete dove installare strumenti di misura. Un'ulteriore modellazione su reti di letteratura è stata fatta implementando un'originale metodologia per la ricerca delle perdite in rete.

Nell'ultimo capitolo, infine, per la prima volta, sono state modellate con UNINET delle reti reali. Sono stati utilizzati entrambi i codici, INetPDA e SCEM-UA, verificando la possibilità di applicare il modello anche nel caso di acquedotti reali. Sono state, quindi, eseguite verifiche nelle condizioni PDA (Pressure Driven Analysis) e DDA (Demand Driven Analysis), calibrazioni teoriche e calibrazioni sulla base di misure realmente acquisite su campo.

## Premessa

L'acqua ha da sempre rappresentato un elemento caratterizzante di ogni territorio e del sistema ambientale ed è, inoltre, un bene primario fondamentale per consentire lo sviluppo di ogni specie animale e vegetale. La civiltà umana da sempre si è organizzata per la ricerca, l'accumulo e la distribuzione di acqua potabile, in modo sempre più organizzato ed efficiente.

Negli ultimi cinquant'anni, in Italia, sono stati posti in opera centinaia di migliaia di chilometri di condotte per l'adduzione e la distribuzione di acqua potabile, a partire dalle sorgenti, passando dai serbatoi di accumulo, per finire ai nodi di allaccio alle abitazioni. Il problema che ci si era posti negli anni passati, quindi, riguardava la ricerca di soluzioni tecnologiche e modellistiche utili a massimizzare il rapporto costi-benefici all'atto della progettazione di una rete acquedottistica.

Allo stato attuale, quindi, in Italia e, in generale, in tutto il mondo Occidentale ed economicamente avanzato, sono funzionanti acquedotti costituiti da condotte e organi meccanici dell'età, delle dimensioni e dei materiali più disparati che, necessariamente, iniziano a risentire del numero di anni di funzionamento.

Una condotta che funziona da tanti anni può presentare i problemi più disparati: dalla semplice perdita alle più invadenti rotture, dall'insufficienza della portata alla più frequente insufficienza della pressione. Molto spesso, infatti, l'enorme sviluppo urbanistico non è stato sufficientemente accompagnato da uno sviluppo adeguato delle reti di acquedotto comportando frequenti fenomeni di fallanza della rete.

Un altro importante problema è rappresentato dalla cattiva o addirittura assente manutenzione di organi meccanici, strade, attraversamenti, impianti di sollevamento, che determinano importanti fenomeni di sovraccarico di tensioni sulle condotte e sovrappressioni che minano l'integrità e, quindi, l'efficienza delle condotte.

La frontiera attuale della ricerca sulle reti idriche, quindi, è rappresentata dalla valutazione dello stato di qualità delle reti con metodi il meno possibile invasivi ovvero metodi che, partendo da poche misure, restituiscano affidabili risultati in termini di stato di usura della rete e che possano dare indicazioni il più possibile precise sulla presenza di perdite nella rete. I più recenti dati che riguardano il problema delle perdite, infatti, rappresentano un quadro desolante: la media delle perdite è pari a circa il 40% con picchi, soprattutto al Sud Italia, che si aggirano attorno al 90%. Esistono aree del territorio nazionale, quindi, in cui, fatta 100 la portata captata dalla sorgente è 10 quella consegnata ai cittadini. Questa evidenza suscita indignazione, pone non indifferenti problemi

di ordine etico e, più semplicemente, problemi di natura economica: quanto costa ai cittadini l'enorme quantità di acqua sprecata? Chi sono in ultima analisi i soggetti che beneficiano di questa condizione? Da quando è entrata in vigore la "Legge Galli" (D.L.vo 152/99) è stato superato il concetto di "tassa sull'acqua", sostituito dal concetto di "tariffa sull'acqua" che, nello spirito del legislatore, è un cambiamento non solo di termini ma anche di sostanza. La tariffa, infatti, presuppone il pagamento di un corrispettivo per un servizio prestato. Il servizio, per sua natura, deve essere il migliore possibile e costare il meno possibile e, quindi, le società di gestione di acqua dovrebbero avere tutto l'interesse a ridurre il quantitativo di acqua sprecata. A tal fine, quindi, è necessario stabilire in modo definitivo quali sono le priorità da seguire e, quindi, individuare strumenti, metodi e procedure che permettano il raggiungimento degli obiettivi con il minor sforzo possibile.

Quando si parla di problemi di ottimizzazione applicati all'ingegneria, la modellistica matematica, fisicamente basata, ha sempre un posto da protagonista, in quanto permette di testare svariate configurazioni in tempi e costi estremamente ragionevoli. Grande fortuna, infatti, in passato hanno avuto i modelli di verifica delle reti idriche basati sulle equazioni del moto e sull'equazione di continuità. Questi modelli, a partire da un'assegnata geometria della rete (lunghezze, diametri, spessori, scabrezze, dislivelli) e da una definita richiesta di portata ai nodi, permettono di pervenire ad un valore di pressione ai nodi, utile per verificare se la rete prevista soddisfacesse le richieste con adeguati carichi piezometrici sulle abitazioni. I risultati ottenuti dall'applicazione della modellistica numerica alle reti idriche sono stati sicuramente soddisfacenti, in quanto tutte le nuove reti progettate con il supporto delle equazioni matematiche, implementate in codici di calcolo, hanno restituito soddisfacenti livelli di funzionalità, fino a quando l'usura e la cattiva o scarsa manutenzione hanno fatto venir meno le ipotesi sulle quali si basava il calcolo idraulico.

Senza voler introdurre in modo sistematico i problemi legati alle perdite idriche, è sufficiente fare un'osservazione: dopo un certo numero di anni di utilizzo della rete come si fa a quantificare la scabrezza? La domanda non è banale e una risposta efficiente ed efficace permetterebbe di fare un salto di qualità alle problematiche gestionali.

Sicuramente misurando la pressione in tutti i nodi della rete e le portate in tutti i rami, sarebbe possibile applicare le formule del moto ottenendo i corrispondenti valori di scabrezza. Ma è ragionevolmente possibile questa soluzione?

La risposta è no: non è pensabile strumentare tutte le reti di adduzione e distribuzione d'Italia per ricavare i dati necessari alla perfetta gestione. Molto più ragionevolmente ci si affida alle più

innovative tecniche statistiche per abbattere i costi e ottenere risultati che abbiano elevati livelli di attendibilità.

Con l'utilizzo della statistica, senza per questo trascurare tutta l'attività di campo, fondamentale per avere una adeguata conoscenza dello stato di fatto, è possibile ottenere valori di scabrezza nelle condotte, a partire da qualche dato di portata e/o di pressione. Questo problema, inverso rispetto ai problemi classici degli acquedotti, rappresenta il problema della "calibrazione" di una rete idrica.

La calibrazione, quindi, è quel processo matematico che permette di ricavare valori di scabrezza della rete a partire da valori di portata nei rami e/o pressione ai nodi. Come tutti i problemi statistici applicati alla realtà empirica è necessario sapere che misure bisogna fare, dove farle, quante farne e in che modo. Per una data rete, quindi, con qualche accortezza e con poco investimento, si può ottenere una stima del valore della scabrezza con un elevato grado di attendibilità, ovvero è possibile ottenere alti valori di probabilità che quel valore di scabrezza sia presente in rete. A tal fine, quindi, è necessario conoscere la "sensitività" di una misura per la data rete ovvero quali lati e/o nodi della rete sono più sensibili, in altre parole quali lati e/o nodi della rete sono più adeguati per poter prelevare delle misure utili a rappresentare adeguatamente tutta la rete.

Una volta stabilito quali sono i migliori elementi della rete, riguardo al processo di calibrazione, è necessario sapere "quante" misure si devono fare e poi che tipo di misure fare, se, per esempio, portata o pressione.

Le misure, quindi, vanno adeguatamente progettate in funzione della sensibilità della rete al modello matematico utilizzato e anche in base all'obiettivo di precisione che ci si è posti.

E' intuitivo il fatto che più misure si fanno, migliori saranno i risultati. La domanda è: quante misure bisogna fare e di quanto possono migliorare i risultati al crescere del numero di misure?

In questo lavoro di ricerca, di cui la presente tesi rappresenta il riassunto, si è cercato di dare delle risposte a tutti gli interrogativi precedentemente posti. A tal fine si è proceduto alla modellazione di reti classiche di letteratura e reti reali utilizzando il codice di calcolo UNINET, elaborato presso il Dipartimento di Difesa del Suolo non più di 3 anni fa.

Il modello UNINET contiene due diversi sottomodelli: INetPDA e SCEM-UA; il primo è un modello di verifica reti con modalità PDA (Pressure driver analysis), il secondo è un vero e proprio modello di ottimizzazione che permette di stimare la scabrezza o le scabrezze di una rete a partire dalla conoscenza di dati di pressione e/o di portata.



La grande forza di INetPDA è rappresentata dalla capacità di verificare la rete in condizioni critiche simulando in modo più opportuno la realtà: la portata erogata nel generico nodo non viene semplicemente imposta dal modellista, ma viene ricalcolata dal modello a seconda della pressione che realmente si determina nel nodo stesso.

In questo lavoro di tesi a parte verificare il funzionamento del modello e calibrare le reti di letteratura ci si è spinti alla verifica e calibrazione di reti reali, arrivando a sancire la robustezza del programma e la stabilità del codice di calcolo. Ma si è andati oltre: con opportuni accorgimenti si sono stabilite procedure per poter interpretare in modo più originale e vasto i risultati. Si è verificato in che modo cresce la precisione della calibrazione al crescere del numero delle misure in rete e che tipo di misure sono più indicate; si è stabilita una metodologia di analisi per consentire di ricercare le posizioni ottimali per l'installazione degli strumenti di misura, confrontando i risultati con il metodo delle "matrici di sensitività"; si sono gettate le fondamenta per poter individuare criteri di ricerca delle perdite nella rete.

Infine sono state modellate tre reti reali, una nuova, una funzionante da diversi anni e, infine, una posta in opera diversi anni fa sulla quale, però, si è in possesso di misure su campo. Ognuna delle tre presenta peculiarità diverse sulle quali si è verificata l'affidabilità del codice di calcolo.

# Capitolo 1: Il Problema della Calibrazione delle Reti Idriche in Pressione

## 1.1 *La calibrazione delle reti idriche*

La problematica della calibrazione è strettamente legata alla gestione delle reti idriche, in quanto è in questa fase che si comprende se le opere realizzate forniscono risposte adeguate all'utenza, in termini di portate erogate e pressioni effettivamente disponibili ai nodi di una rete.

Poiché si tratta di gestione di reti esistenti, la calibrazione risulta una procedura utile ai seguenti fini:

- Determinazione dello stato di usura delle condotte della rete e del reale valore della scabrezza;
- Progettazione di campagne di misura;
- Programmazione di interventi di adeguamento su reti esistenti;
- Il controllo delle pressioni in rete;
- Ricerca perdite in rete.

Il modello di simulazione reti tradizionale, applicato a reti esistenti, non sempre fornisce risultati realistici, pertanto risulta inadeguato ad essere utilizzato come modello di verifica nei problemi di tipo gestionale. Questo è dovuto al fatto che nel classico modello di verifica non solo si pongono delle ipotesi semplificative, che nelle reti reali possono non verificarsi, ma si assumono come dati in input del problema le scabrezze delle condotte e le portate erogate ai nodi, che, in realtà, sono grandezze incognite.

Nell'ambito delle reti idriche, accanto al problema di progetto si pone sempre più spesso quello dell'ampliamento o adeguamento delle reti esistenti e di una loro efficiente gestione per un migliore utilizzo della risorsa idrica. In questo ambito, il concetto di calibrazione si affianca a quello di affidabilità del sistema, intesa come la probabilità che il sistema di distribuzione soddisfi, nelle diverse condizioni che si possono presentare nella sua vita utile, le richieste idriche con le pressioni necessarie. Infatti l'affidabilità si riferisce al funzionamento della rete in presenza di anomalie, quali la rottura di condotte, messa in fuori servizio di valvole e pompe e l'incapacità della rete a fornire i livelli richiesti di portate e pressioni (Farmani et al., 2005).

## 1.2 *Descrizione della procedura di calibrazione*

Il valore dei parametri che costituiscono l'input del problema di verifica, ossia la scabrezza delle condotte e la portata erogata ai nodi della rete, sono grandezze solo fittiziamente conosciute

(Carpentier P., Cohen G., 1991), pertanto la calibrazione si configura come un classico problema inverso, da risolvere ricorrendo a misure su campo di pressione ai nodi e/o di portata in condotta.

Il valore della scabrezza delle condotte può, infatti, essere significativamente diverso da quello stimato a priori e assunto alla base del modello di verifica, in quanto dipende dallo stato e dalle vicende di servizio della rete nonché dalla presenza di perdite localizzate, quali strozzature, diramazioni e apparecchi, di cui, in genere, non si tiene conto singolarmente. La scabrezza delle condotte, quindi, non è più da considerare un dato del problema ma un parametro da stimare tramite un opportuno modello matematico e con l'ausilio di misure rilevate sul campo. Analogamente, sono incerte le portate erogate, ossia la domanda dell'utenza, in quanto stimate indirettamente a partire dal numero degli abitanti, dalle caratteristiche della dislocazione della popolazione e dalle attività presenti nell'area servita.

È necessario, quindi, un modello matematico che fornisca risultati attendibili, intesi come valori di pressione e portata quanto più possibile vicini a quelli reali; di conseguenza le scabrezze e le portate erogate non possono essere considerate input del problema, ma parametri da valutare con un modello da calibrare e validare a partire da misure effettuate in rete.

### ***1.3 Modalità di approccio alla calibrazione***

Fine della calibrazione è quello di determinare i valori dei parametri funzionali del modello, che in tal caso sono rappresentati dalle scabrezze e dalle portate erogate della rete, in modo da garantire una buona corrispondenza fra i valori delle grandezze misurate e quelli calcolati. Nel caso dei modelli PDA (Pressure Driven Analysis), possono aggiungersi, come parametri da stimare, quelli caratteristici della particolare relazione esistente tra portata effettivamente erogata e carico al nodo. La calibrazione del modello pone, inoltre, ulteriori problemi che sono oggetto di studio; tra questi si citano i seguenti:

- La progettazione della campagna di misure da effettuare (Walski, 2000; Veltri, 2000; Ferreri e Gangitano, 2001; Kapelan et al., 2003, 2005);
- La scheletrizzazione della rete (Eggner et al., 1976; Veltri et al., 2001, Giustolisi O., Berardi L., 2011);
- La valutazione dei risultati della calibrazione (Walski, 2000).

I metodi di calibrazione sono classificati in tre categorie:

- Euristici;
- Espliciti;
- Impliciti.

I metodi euristici (Walski, 1983; Bhave, 1988) tendono a rendere i valori misurati prossimi a quelli ottenuti dal modello attraverso il calcolo di parametri globali, mentre i metodi espliciti (Ormsbee et al., 1983) risolvono il problema di calibrazione aggiungendo alle equazioni che descrivono il funzionamento del sistema quelle che rappresentano le misure effettuate. Di recente, invece, largo impiego hanno avuto i metodi impliciti (Ormsbee et al., 1989; Veltri et al., 1994), nei quali la calibrazione viene affrontata come un problema di ottimizzazione: vengono definite delle funzioni obiettivo, non lineari e soggette a vincoli, che dipendono dagli scarti tra i valori misurati e quelli ottenuti come output dal modello; in questi metodi i parametri incogniti risultano quelli che minimizzano la funzione obiettivo oggetto di analisi.

#### 1.4 Il metodo implicito

In questa tipologia di modelli i valori dei parametri incogniti sono ottenuti minimizzando gli scarti tra i valori di alcune grandezze misurate e i corrispondenti valori calcolati con un modello di simulazione.

I metodi impliciti differiscono tra loro per il numero di funzioni obiettivo da minimizzare, per le caratteristiche della funzione obiettivo stessa e per i vincoli imposti. Invece, per la soluzione matematica del problema di ottimizzazione, quasi sempre sono utilizzati algoritmi che si rifanno al metodo del gradiente, mentre meno utilizzati sono gli algoritmi genetici (GAs).

Numerosi autori, tra cui: Walski 1983, 2000, Ormsbee et al., 1989, 2008, Veltri et al., 1994, Veltri e Fiorini Morosini, 2001, 2002, Veltri et al., 2003, Greco et Del Giudice., 1999 e Kapelan et al., 2003, 2007, hanno proposto modelli di calibrazione di tipo implicito. Inoltre, in alcuni casi, i modelli tengono conto anche delle portate perdute per rottura (Nicolini et al., 2008; Cima et al., 2008) ottenendo, come output della calibrazione, anche i parametri relativi alle perdite.

Alcuni metodi proposti in letteratura sono i seguenti:

- Veltri et al. (1994), che, per una rete con  $l$  condotte e  $n$  nodi erogazione, definiscono la seguente funzione obiettivo:

$$f = \sum_{j=1}^l \left(1 - \frac{R_{jc}}{R_{jm}}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{Q_{ic}}{Q_{im}}\right)^2 \quad (1.1)$$

in cui:

- $R_{jc}$  è la resistenza idraulica calcolata per la condotta  $j$ ;
- $R_{jm}$  è la resistenza idraulica misurata per la condotta  $j$ ;
- $Q_{ic}$  è la portata erogata calcolata per il nodo  $i$ ;
- $Q_{im}$  è la portata erogata misurata per il nodo  $i$ .

I vincoli imposti sono i seguenti:

- le equazioni di continuità;
  - le equazioni del moto;
  - i valori delle scabrezze in un range di valori tecnicamente ammissibili.
- Veltri et al. (2001), in cui vengono considerate come funzioni obiettivo quella espressa dalla (1.1), le equazioni del moto e la seguente funzione che minimizza lo scarto tra le portate erogate di calcolo e quelle misurate:

$$f = \sum_{i=1}^{N_{mis}} \left( 1 - \frac{Q_{ci}}{Q_{mis,i}} \right)^2 \quad (1.2)$$

In cui:

- $Q_{ci}$  sono le portate erogate di calcolo;
- $Q_{mis,i}$  sono le portate erogate misurate nei nodi di misura;
- $N_{mis}$  rappresentano i nodi in cui sono state effettuate misure.

In questo caso i vincoli sono imposti sui valori che le variabili, cioè le scabrezze, le portate erogate, i carichi ai nodi e le portate circolanti in condotta possono assumere.

- Veltri et al. (2004) hanno proposto la seguente funzione obiettivo:

$$f = \sum_{j=1}^l \left( 1 - \frac{q_{jc}}{q_{jm}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{H_{ic}}{H_{im}} \right)^2 \quad (1.3)$$

In cui:

- $q_{jc}$  e  $q_{jm}$  sono le portate, rispettivamente calcolate e misurate, che circolano in condotta;
  - $H_{ic}$  e  $H_{im}$  sono le quote piezometriche, rispettivamente calcolate e misurate, ai nodi.
- Ormsbee (1989) assume la seguente funzione obiettivo:

$$f = \alpha \sum_{i=1}^n (H_{ic} - H_{im})^2 + \beta \sum_{k=1}^s (L_{ic} - L_{im})^2 + \gamma \sum_{j=1}^l (q_{jc} - q_{jm})^2 \quad (1.4)$$

in cui, oltre ai simboli già utilizzati e descritti, si definiscono:

- $L_{ic}$  e  $L_{im}$  i livelli negli  $s$  serbatoi, rispettivamente calcolati e misurati;
- i termini  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  come scritto sotto:

$$\alpha = \left[ \frac{100}{\max_n (H_{im})} \right]^2$$

$$\beta = \left[ \frac{100}{\max_n (L_{im})} \right]^2$$

$$\gamma = \left[ \frac{100}{\max_n (q_{im})} \right]^2$$

La funzione obiettivo proposta da Ormsbee minimizza la somma del quadrato degli scarti tra i valori misurati e quelli osservati per le pressioni ai nodi, le portate che circolano nelle condotte e i livelli dei serbatoi che alimentano la rete.

- Nicolini et al. (2008) propongono la seguente funzione obiettivo:

$$f = \max_n |P_n^{mis} - P_n^{calc}| + \max_l |q_l^{mis} - q_l^{calc}| \quad (1.5)$$

In cui si minimizza la somma dei valori assoluti dei massimi scarti tra i valori calcolati dal modello e quelli misurati. I simboli hanno i seguenti significati:

- $P_n^{mis}$  e  $P_n^{calc}$  sono le pressioni, rispettivamente misurate e calcolate, sul nodo  $n$ ;
- $q_l^{mis}$  e  $q_l^{calc}$  sono le portate circolanti, rispettivamente misurate e calcolate, nella condotta  $l$ .

In questo modello sono assunti come vincoli le equazioni di continuità ai nodi e le equazioni del moto per le condotte; inoltre, nelle equazioni di continuità si tiene conto anche delle perdite per rottura.

Un altro contributo che utilizza l'approccio delle funzioni obiettivo è riconducibile a Greco e Di Cristo (1999), che applicano un algoritmo di ottimizzazione non lineare, in cui la scabrezza viene modificata finché i valori di pressione calcolati siano prossimi a quelli misurati. Per ottenere valori realistici della scabrezza calibrata, l'obiettivo è quello di minimizzare la somma dei quadrati delle differenze tra stima della scabrezza calibrata e quella iniziale, secondo un insieme di vincoli determinato da una matrice di sensitività.

In generale, nell'approccio classico alla soluzione del problema di calibrazione, una volta definita una o più funzioni obiettivo e i vincoli, il minimo viene ottenuto con software che implementano algoritmi di ricerca numerici che si rifanno al metodo del gradiente (CPLEX, Veltri et al., 2003; LINGO, Veltri et al. 2004). Di norma questi metodi necessitano di una soluzione iniziale e ricercano il minimo con criteri esclusivamente deterministici. Per tali algoritmi è quindi opportuno assegnare un punto iniziale più vicino possibile a quello che ci si aspetta essere il minimo della

funzione obiettivo; inoltre gli algoritmi numerici che utilizzano il gradiente, sono di tipo deterministico, cioè adottano metodi di ricerca che, partendo da un punto, restituiscono come minimo sempre lo stesso punto.

Di conseguenza, non solo non viene sfruttata la potenzialità della calibrazione, in quanto la sua utilità è massima quando si hanno poche informazioni sulla rete, ovvero proprio quando non è possibile dare una buona soluzione iniziale, ma utilizzando algoritmi numerici, nella ricerca non interviene in alcun modo la casualità, come invece accade negli algoritmi genetici, lasciando così ancora margini di soggettività.

## **1.5 I metodi di verifica delle reti**

### **1.5.1 Il metodo di verifica Demand Driven Analysis (DDA)**

Connessa alla procedura di calibrazione, resta comunque da analizzare, sempre, la fase di verifica delle reti. Infatti, nella fase gestionale, ossia nella calibrazione di reti esistenti, molta importanza assumono le condizioni di malfunzionamento, che non possono essere eliminate semplicemente modificando la rete, ma devono essere opportunamente analizzate.

Perciò si rende necessario un modello matematico che rappresenti nel modo più preciso possibile la realtà fisica del sistema, cioè la rete esistente, in modo che lo stesso sia in grado di fornire, per diverse condizioni di funzionamento, valori delle grandezze idrauliche prossimi a quelli reali (Giustolisi O., Walski T. M., 2011). A tal fine diversi Autori, negli schemi di calcolo proposti, hanno avanzato alcune ipotesi semplificative, quali l'indipendenza delle portate erogate dalla pressione e l'assenza di perdite per rottura.

Nel modello tradizionale di verifica, la portata erogata a un generico nodo costituisce un dato di input al modello ed è considerata costante e di valore pari alla domanda dell'utenza servita dallo stesso nodo. Con questa schematizzazione il modello, in output, restituisce i due seguenti risultati:

- la portata complessivamente erogata dalla rete risulta uguale alla domanda complessiva dell'utenza servita, indipendentemente dal fatto che tale portata sia o meno effettivamente disponibile; in tal caso, l'output del modello non è corretto nel caso in cui la disponibilità idrica sia insufficiente a soddisfare la domanda complessiva dell'utenza. Perciò, per ottenere un risultato realistico è necessario correggere le portate erogate adeguandole all'effettiva disponibilità.
- la portata erogata da ciascun nodo risulta uguale alla domanda dell'utenza servita dal nodo (e pari al valore dato in input), indipendentemente dal valore della pressione; in tal caso, l'output non è corretto nel caso in cui la pressione al nodo sia insufficiente ad alimentare le utenze a quota più elevata. Perciò, per ottenere un risultato valido, è necessario adottare una

schematizzazione che rappresenti meglio la realtà, tenendo conto della variabilità della portata erogata al nodo con la pressione al nodo stesso. L'introduzione della variabilità della portata erogata con la pressione ha portato alla modifica del modello tradizionale DDA, Demand-Driven Analysis, e alla definizione del modello PDA, Pressure-Driven Analysis, o anche Head-Driven Analysis.

### 1.5.2 Modello di verifica PDA

Per implementare un modello PDA è necessario definire il tipo di legame funzionale portata erogata-pressione e risolvere il sistema algebrico, non lineare, ottenuto da tutte le equazioni che descrivono il comportamento della rete.

La portata effettivamente erogata in condizioni di pressione insufficiente dipende da diversi fattori, quali le caratteristiche della sottorete alimentata dal nodo, che viene eliminata in fase di scheletrizzazione della rete, le caratteristiche e la posizione plano-altimetrica degli apparecchi erogatori. Solo conoscendo queste informazioni di dettaglio si potrebbe definire la legge di variazione portata-pressione che, tra l'altro, sarebbe diversa per ciascun nodo.

Le difficoltà di questa analisi hanno indotto alcuni autori (Calomino e Veltri 1980; Germanopulos, 1985; Wagner, 1988) a definire un legame funzionale portata-pressione considerando schemi molto semplificati.

La relazione che esprime la variabilità delle portate erogate ai nodi viene espressa come:

$$Q_i = \alpha_i Q_i^{\max} \quad (1.6)$$

In cui:

- $Q_i$  è la portata effettivamente erogata al nodo;
- $Q_i^{\max}$  è la portata corrispondente alla domanda della popolazione servita dal nodo;
- $\alpha_i$  è un coefficiente variabile in funzione della pressione, i cui valori sono riportati in Tabella 1-1.

Tabella 1-1 Valori di  $\alpha_i$

	$H_i \leq H_i^{\min}$	$H_i \geq H_i^{\max}$	$H_i^{\min} < H_i < H_i^{\max}$
$\alpha_i$	0	1	$0 < \alpha_i < 1$

dove si è indicato con:



- $H_i$  la quota piezometrica sul nodo;
- $H_i^{\max}$  la quota piezometrica necessaria affinché la portata erogata sia pari a quella richiesta dall'utenza;
- $H_i^{\min}$  la quota piezometrica al di sotto della quale la portata erogata è nulla.

In Figura 1.1 è riportato un andamento tipico della variazione di  $\alpha = Q/Q^{\max}$  in funzione di  $H$ .

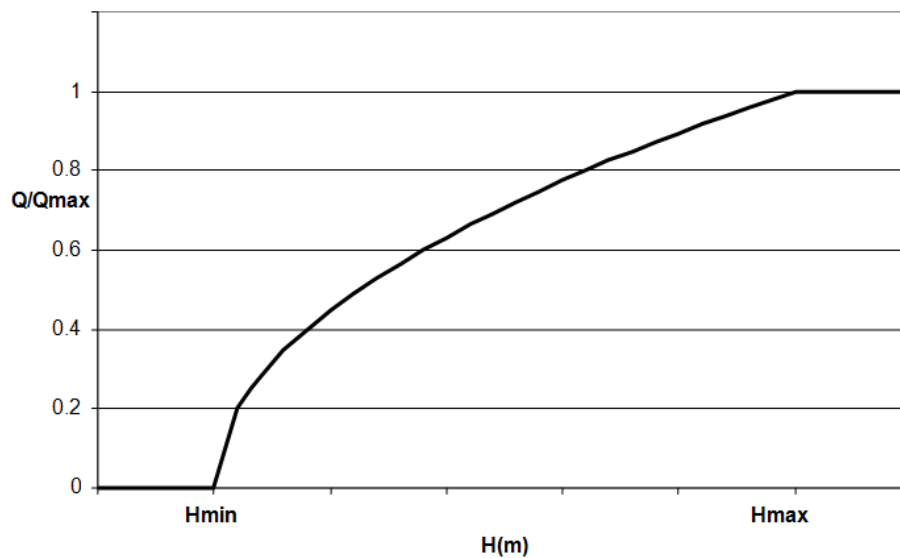


Figura 1.1 Variazione del rapporto  $Q/Q_{\max}$  in funzione di  $H$

Per quanto riguarda  $H_i^{\min}$ , in genere si assume un valore di poco superiore, da 2 a 5 metri, alla quota terreno al nodo; mentre, per il calcolo di  $H_i^{\max}$  può essere adottata la seguente relazione (Veltri e Fiorini Morosini, 2007):

$$H_i^{\max} = H + P_{ms} + P_p + P_D \quad (1.7)$$

In cui:

- $H$  è l'altezza massima degli edifici serviti dal nodo;
- $P_{ms}$  è la pressione minima necessaria al funzionamento dell'apparecchio più sfavorito;
- $P_p$  rappresenta le perdite di carico concentrate e distribuite lungo la colonna montante, dalla base dell'edificio fino al punto di erogazione;
- $P_D$  rappresenta le perdite di carico dal nodo erogazione alla base dell'edificio, calcolate considerando un diametro standard della tubazione.

Per la definizione del coefficiente  $\alpha_i$  esistono in letteratura espressioni che ne forniscono il valore in funzione di  $H_i$ ,  $H_i^{\min}$  e  $H_i^{\max}$ , tra cui le seguenti:

- La relazione tra portata erogata e pressione proposta da Calomino e Veltri (1980). Tale relazione è definita facendo riferimento ad uno schema in cui da ogni nodo erogazione si diparte una diramazione costituita da una condotta, munita di valvola di ritegno, che termina ad una quota piezometrica fissa  $H_i^{\min}$  e fa solo servizio di estremità. Secondo questo schema, per valori  $H_i^{\min} < H_i < H_i^{\max}$  la portata erogata dipende dalle caratteristiche idrauliche della condotta di diramazione e si ha:

$$Q_i = 0 \quad \text{per} \quad H_i \leq H_i^{\min}$$

$$Q_i = Q_i^{\max} = \left( \frac{H_i - H_i^{\min}}{K_i} \right)^{\frac{1}{a_i}} \quad \text{per} \quad H_i \geq H_i^{\max}$$

$$Q_i = \left( \frac{H_i - H_i^{\min}}{K_i} \right)^{\frac{1}{a_i}} \quad \text{per} \quad H_i^{\min} < H_i < H_i^{\max}$$

In cui  $a_i$  e  $K_i$  sono l'esponente della portata e la resistenza idraulica della formula del moto della condotta di diramazione.

- Relazione proposta da Bhave (1981) che considera la portata erogata pari alla domanda se la pressione è superiore al valore minimo e la assume nulla in caso contrario; con riferimento all'espressione (1.6) si ha:

$$\alpha_i = 1 \quad \text{per} \quad H_i^{\min} < H_i < H_i^{\max}$$

- Germanopoulos (1985) ha proposto per  $H_i > H_i^{\min}$  la seguente relazione:

$$\alpha_i = 1 - 10^{-c_i \left[ \frac{(H_i - H_i^{\min})}{(H_i^{\max} - H_i^{\min})} \right]} \quad (1.8)$$

in cui  $c_i$  è un parametro il cui valore va da 1 a 5.

- Wagner (1988) tra il carico al nodo  $H_i$  e la portata erogata  $Q_i$  assume la seguente relazione:

$$H_i = H_i^{\min} + K_i Q_i^\beta \quad (1.9)$$

In cui  $K_i$  è il coefficiente di resistenza idraulica caratteristico del sistema alimentato dal nodo e  $\beta$  è l'esponente di resistenza idraulica, il cui valore, che dovrebbe essere ottenuto

come risultato della calibrazione della rete, ha un valore compreso tra 1.5 e 2 ed è, in genere, assunto pari a 2.

Imponendo che per  $Q_i = Q_i^{\max}$  sia  $H_i = H_i^{\max}$ , dalla relazione (1.9) si può ottenere il valore di  $K_i$  e la stessa relazione può essere posta nella forma (1.6) con:

$$\alpha_i = \left( \frac{H_i - H_i^{\min}}{H_i^{\max} - H_i^{\min}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (1.10)$$

Questa relazione e lo schema a cui essa fa riferimento coincidono con quelli proposti da Calomino e Veltri (1980). Analoga relazione è valida per valori di  $H_i > H_i^{\min}$ .

- Fujiwara (1993-1998) per  $H_i^{\min} < H_i < H_i^{\max}$  ha proposto la seguente relazione di  $\alpha_i$ :

$$\alpha_i = \frac{(H_i - H_i^{\min})^2 (3H_i^{\max} - 2H_i - H_i^{\min})}{(H_i^{\max} - H_i^{\min})^3} \quad (1.11)$$

- Un'altra relazione, valida per  $z_i < H_i < H_i^{\max}$ , dove  $z_i$  è la quota terreno al nodo, è quella proposta da Tucciarelli (1999):

$$\alpha_i = \text{sen}^2 \left( \frac{H_i - z_i}{2(H_i^{\max} - z_i)} \right) \quad (1.12)$$

- Jowitt (1995), in uno studio relativo alle perdite, propone la seguente funzione tra portata e pressione:

$$\alpha_i = 1 - a_i \exp \left( -b_i \frac{H_i}{H_i^{\max}} \right) \quad (1.13)$$

in cui  $a_i$  è un coefficiente che varia da 3 a 10 e  $b_i$  è posto uguale a 5.

Infine, assumendo  $z_i = 0 \text{ m}$ ,  $H_i^{\min} = 5 \text{ m}$  e  $H_i^{\max} = 30 \text{ m}$ , le ultime quattro relazioni sono messe a confronto in Figura 1.2.

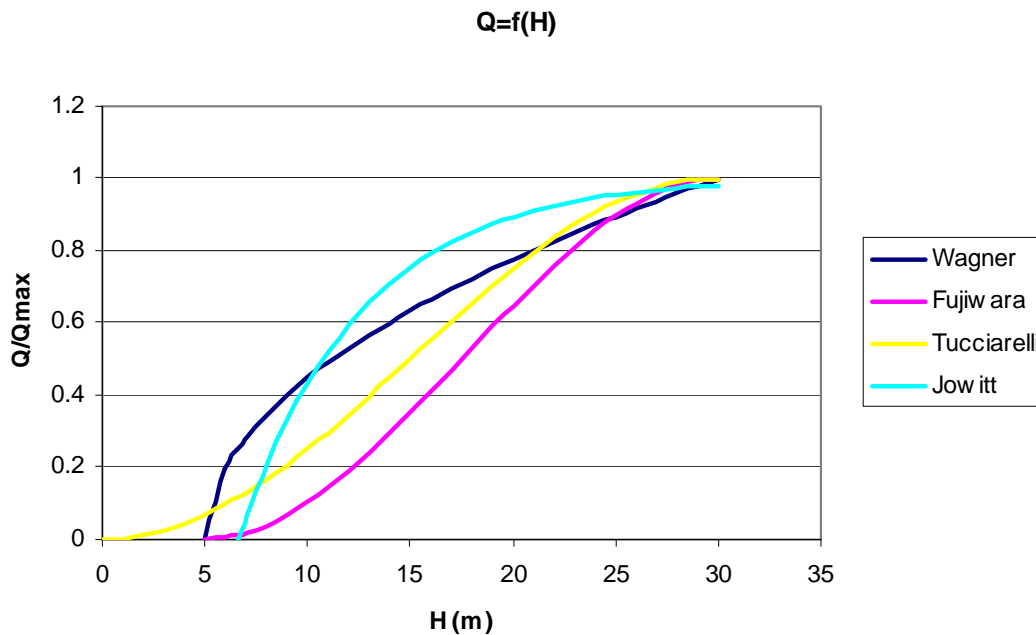


Figura 1.2 Grafico delle diverse relazioni fra portata e pressione

Il sistema che si ottiene dal modello PDA non solo è non lineare, come per il modello DDA, ma alle equazioni classiche che risolvono il problema di verifica si aggiungono quelle del legame funzionale  $Q(H)$ . Metodi di soluzione diretta sono stati proposti da Todini (2003), Cheung et al. (2005), Giustolisi et al. (2007), mentre, in alternativa è possibile adottare metodi iterativi in cui:

- 1) vengono assegnate come portate erogate ai nodi quelle corrispondenti alla domanda  $Q_i^{\max}$  ;
- 2) si risolve la rete considerando le portate erogate costanti (modello DDA);
- 3) per i nodi critici, per i quali  $H_i < H_i^{\max}$  , si modifica il valore della portata erogata in modo che sia soddisfatta la relazione (1.6);
- 4) si ripete il calcolo dal passo 2 fino a ottenere la soluzione finale (a meno di uno scarto prefissato sui valori delle variabili fra due iterazioni successive).

Con riferimento a questo secondo criterio, già utilizzato da Calomino e Veltri (1980), alcuni autori (Ermini R., Ingeduld P., 2005; Ardenti et al., 2007) hanno proposto modifiche o adattamenti per l'applicazione mediante l'utilizzo di strumenti software largamente adottati nella verifica di tipo convenzionale.

## Capitolo 2: Il Modello UNINET

### 2.1 Struttura del modello di calibrazione UNINET

Il modello di calibrazione, denominato UNINET, è un modello di tipo implicito, messo a punto presso il Dipartimento di Difesa del Suolo (Orlando, 2010) e implementato in MatLab (MathWorks Inc., v. 7.0.1) . Allo stato attuale, è in fase di verifica, mediante modellazioni effettuate su reti di letteratura e reali, per come evidenziato in questo lavoro di tesi. Il modello consta di:

- Un algoritmo di ottimizzazione SCEM-UA, per la calibrazione delle reti;
- Un modello di simulazione reti INetPDA, per la verifica.

L'utilizzo di INetPDA e SCEM-UA è riportato nel diagramma di flusso di Figura 2.1, in cui è evidenziata la possibilità di impiego indipendente.

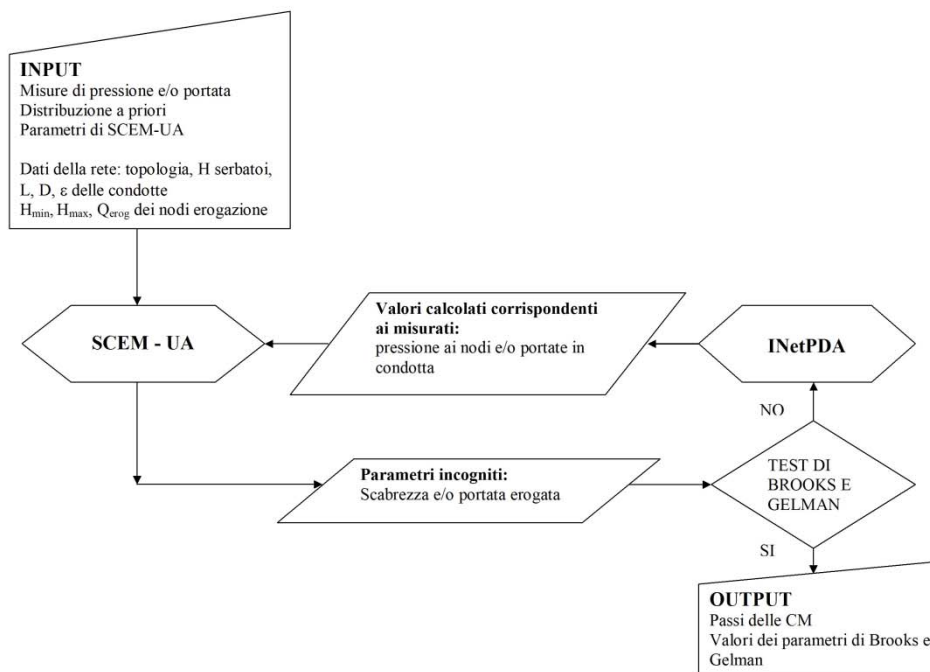


Figura 2.1 Schema di UNINET (Orlando, 2010)

La calibrazione delle reti prevede l'assunzione di un insieme di parametri iniziali (distribuzione a priori), che ad ogni passo di iterazione, come si vedrà meglio nei paragrafi successivi, viene corretto, determinando un nuovo insieme di parametri (distribuzione a posteriori) che, alla fine, rappresenta la soluzione del problema.

I dati richiesti in input dal modello sono distinti in due gruppi:

- Il primo gruppo comprende le misure disponibili di portata in condotta e/o di pressione ai nodi della rete, la distribuzione a priori assunta per i parametri incogniti e infine i parametri che adattano i criteri di ricerca di SCEM-UA al problema esaminato. Questi dati sono utilizzati esclusivamente dall’algoritmo di ottimizzazione SCEM-UA.

Riguardo la scelta della distribuzione a priori, nella versione di SCEM-UA utilizzata in questo lavoro di tesi, è possibile sceglierne due tipologie: una distribuzione a priori uniforme e una distribuzione a priori specifica. In particolare, nel modello UNINET scegliere la prima opzione significa ipotizzare misure esatte e i dati in input sono costituiti dall’intervallo ammissibile di variazione di ciascun parametro incognito, così assegnando un valore minimo e un valore massimo per ciascun parametro. Invece, scegliendo la seconda opzione si ipotizzano misure incerte, con scarto quadratico medio non nullo, quindi da assegnare.

Riguardo i parametri propri dell’algoritmo SCEM-UA, si evince che l’evoluzione del processo stocastico dipende dal valore di un insieme di parametri, che possono incidere sui risultati ottenuti e sulla rapidità di convergenza del calcolo. Questi parametri sono riportati nella Tabella 2-1, in cui compaiono i corrispondenti valori consigliati, desunti dalla letteratura (Kapelan et al., 2007), dal manuale del programma in versione MatLab e dall’analisi dei risultati ottenuti applicando UNINET (Orlando, 2010).

Tabella 2-1 Parametri dell’algoritmo SCEM-UA e rispettivi valori consigliati (Orlando, 2010)

Simbolo	Descrizione	Valori consigliati		
		Kapelan	Manuale	UNINET
$n$	Numero dei parametri incogniti			
$s$	Dimensione della popolazione iniziale $A$	$\leq 100$ per problemi semplici $\geq 250$ per problemi complessi	50	da 45 a 90
$q$	Numero delle CM parallele e dei <i>Complexes</i>	$\leq 5$ per problemi semplici $\geq 10$ per problemi complessi	5	da 5 a 10

$m$	Numero di punti in ciascun <i>Complexes</i>	$s/q$	$s/q$	$s/q$
$T$	Valore soglia	$10^6 - 10^7$	500	$10^6 - 10^7$
$c_n$	Fattore di scala di Gelman applicato alla covarianza	1.0 oppure $2.4/\sqrt{n}$	$2.4/\sqrt{n}$	$2.4/\sqrt{n}$
$L$	Numero di passi della CM prima della ricomposizione dei <i>Complexes</i>	da $m/10$ a $m/5$	$m/10$	$m/5$
$\Delta_R$	Variazione massima di $\sqrt{\hat{R}}$ negli ultimi passi delle CM		0.001	da 0.0001 a 0.001
$N_{\max}$	Numero massimo di passi delle CM	5000	10000	30000

Dalle elaborazioni effettuate con UNINET si osserva che i valori assegnati ai parametri di Tabella 2-1 incidono più sulla velocità di convergenza, ossia sul numero di iterazioni necessarie per raggiungere la distribuzione stazionaria, che non sui risultati ottenuti (Orlando, 2010).

- Il secondo gruppo di dati in input del modello UNINET comprende tutti i dati necessari per la verifica della rete, quindi: le quote piezometriche dei serbatoi espresse in m.s.m., la topologia della rete, le caratteristiche delle condotte della rete e i dati relativi alle erogazioni ai nodi, ossia il carico corrispondente all'erogazione nulla  $H_{\min}$ , il carico corrispondente all'erogazione massima  $H_{\max}$  e la portata erogata massima  $Q_{\max}$ . Questo gruppo di dati viene utilizzato esclusivamente dal modello di simulazione reti INetPDA, in modo da ottenere i valori calcolati di portata in condotta e di pressione ai nodi, da confrontare con quelli misurati.

Rinviando ai successivi paragrafi per un'analisi di dettaglio del modello di calcolo, si evidenzia che il modello UNINET in output restituisce, per tutti i parametri incogniti, i valori generati durante l'evoluzione delle CM (Catene Markoviane), di cui un esempio è riportato in Figura 2.2.

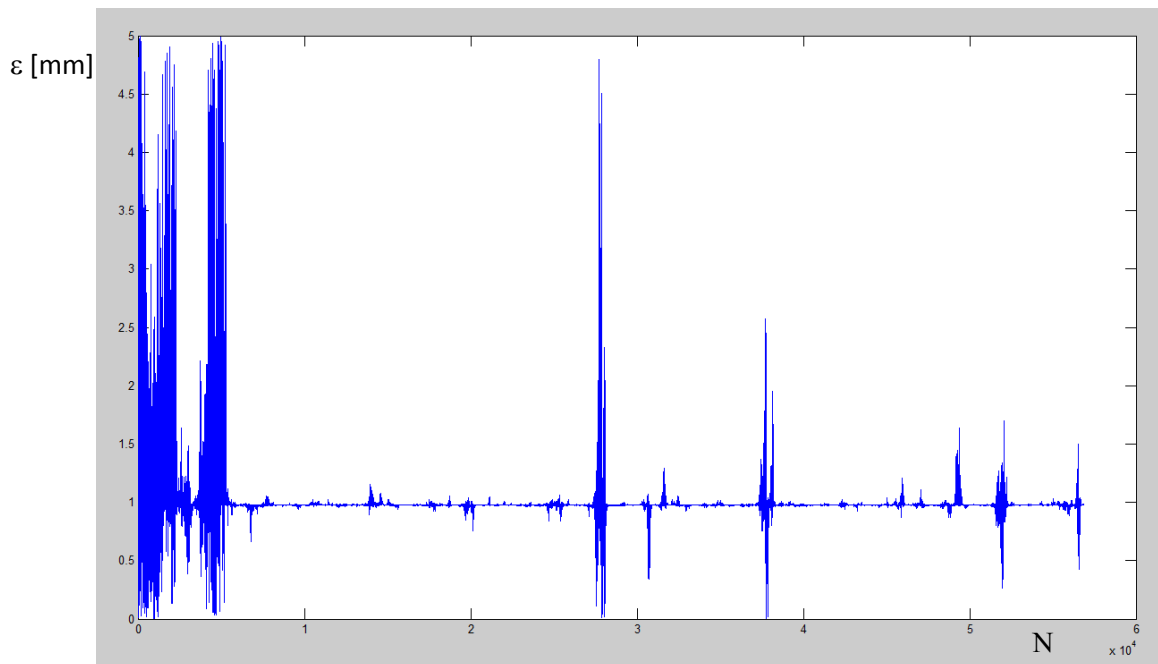


Figura 2.2 Esempio del tracciato di una CM

Nel tracciato di Figura 2.2, che si riferisce alla calibrazione di una sola scabrezza, in ascissa è riportato il numero del passo della CM e in ordinata il corrispondente valore della scabrezza.

Dal campione della distribuzione a posteriori è possibile ottenere valori centrali, quali moda e/o media aritmetica e indici di variabilità, quali lo scarto quadratico medio. Questi valori sono assunti rispettivamente come la stima del valore del parametro incognito e la stima dell'incertezza associata. Infine dallo stesso campione si ottiene il grafico della distribuzione a posteriori corrispondente al proprio tracciato. In Figura 2.3 è plottato un esempio di grafico di distribuzione a posteriori corrispondente al tracciato di Figura 2.2, in cui in ascisse è riportato il valore della scabrezza e in ordinata il corrispondente valore di probabilità.



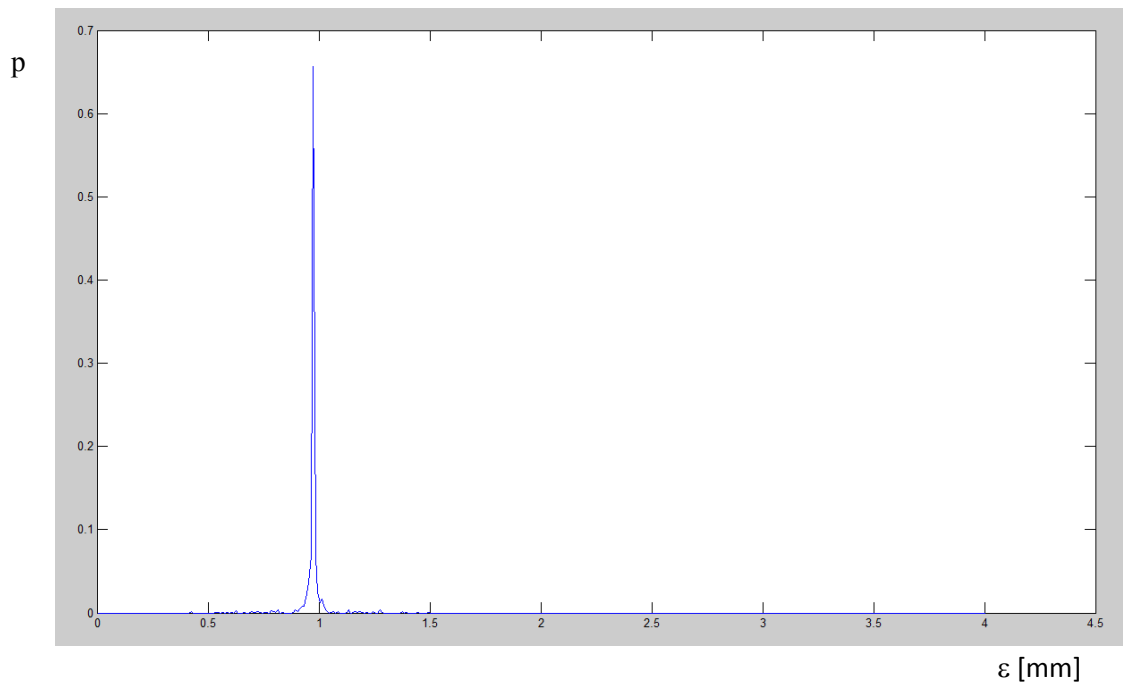


Figura 2.3 Distribuzione a posteriori corrispondente al tracciato di figura 1.2

Concludendo, il modello di calibrazione UNINET, utilizzando come algoritmo di ottimizzazione SCEM-UA e come modello di simulazione INetPDA, presenta le seguenti caratteristiche:

- Non necessita di una soluzione iniziale;
- La ricerca del minimo è effettuata con criteri non esclusivamente deterministici;
- I parametri da stimare sono considerati come variabili casuali, di cui UNINET determina la distribuzione di probabilità a posteriori, con i metodi dell'inferenza bayesiana.
- Adotta un metodo di simulazione reti di tipo PDA (Pressure Driven Analysis).

## 2.2 Stima dell'incertezza dell'output di calibrazione con UNINET

### 2.2.1 Teorema di Bayes

Nella presente ricerca la stima dell'incertezza dei parametri di output viene effettuata con un approccio di tipo statistico-bayesiano, secondo cui la probabilità è definita come il grado di fiducia che il soggetto ha nel verificarsi di un certo evento e i parametri delle distribuzioni sono delle variabili casuali.

Nel metodo bayesiano, poiché la probabilità è soggettiva, è lecito fare delle assunzioni a priori, esempio, sulla distribuzione di probabilità di un parametro. Le informazioni oggettive date dal verificarsi di un evento o quelle contenute nei dati di un campione estratto dalla popolazione sono utilizzate per modificare, applicando il teorema di Bayes, le assunzioni a priori, soggettive, rendendole oggettive.

Indicando con  $H_0$  l'ipotesi e con  $E$  l'evento, il teorema si può scrivere come segue:

$$P(H_0|E) = \frac{P(E|H_0)P(H_0)}{P(E)}$$

in cui:

- $P(H_0)$  è la probabilità assunta a priori sull'ipotesi, in base all'esperienza personale (probabilità a priori).
- $P(E|H_0)$  è la probabilità condizionata del verificarsi dell'evento  $E$  dato che l'ipotesi  $H_0$  sia vera (verosimiglianza).
- $P(E)$  è la probabilità assoluta del verificarsi dell'evento  $E$ , indipendentemente dal fatto che  $H_0$  sia vera o meno (probabilità totale).
- $P(H_0|E)$  è la probabilità che l'ipotesi  $H_0$  sia vera dato che si è verificato l'evento  $E$  (probabilità a posteriori).

La  $P(H_0|E)$ , probabilità a posteriori, corregge la  $P(H_0)$ , assunta a priori, in base alle nuove informazioni rappresentate dal dato oggettivo che si è verificato l'evento  $E$ .

Quindi, con l'approccio statistico-bayesiano, che si basa sull'assunzione che i parametri del modello non vengono considerati come valori deterministici, ma come variabili casuali, il problema consiste nel determinarne la distribuzione di probabilità.

In definitiva, con il teorema di Bayes si correggono le conoscenze a priori, utilizzando le informazioni contenute nel campione e tale correzione può essere applicata ogni volta che si

acquisiscono nuove informazioni. Inoltre un vantaggio dell'analisi bayesiana è dato dal fatto che non è necessario avere campioni di numerosità elevata, ma è sufficiente avere campioni buoni, cioè che contengano informazioni valide sul parametro da stimare.

Per ottenere la distribuzione a posteriori bisogna assegnare la distribuzione a priori. Come già esplicitato, nell'approccio bayesiano la probabilità è soggettiva, per cui anche la distribuzione a priori è soggettiva e deve essere scelta in funzione delle informazioni che si hanno sul particolare problema e a prescindere, ovviamente, dai dati del campione. In assenza di queste informazioni è opportuno scegliere una distribuzione a priori che abbia influenza minima sul risultato finale, in modo che i dati oggettivi del campione abbiano un maggiore peso.

È inoltre possibile controllare la qualità dei dati, osservando la stabilità della distribuzione a posteriori dopo aver scelto diverse distribuzioni a priori; ossia, se la distribuzione a posteriori varia sensibilmente scegliendo diverse a priori, significa che la prima è strettamente dipendente dalla seconda e di conseguenza i dati non contengono informazioni valide e viceversa.

Per quanto la scelta della distribuzione a priori possa essere un passo critico nella soluzione dei problemi di inferenza, il teorema di convergenza bayesiano afferma che al crescere della dimensione del campione la probabilità soggettiva, quindi quella a priori, converge comunque alla probabilità oggettiva, cioè a posteriori, e, quindi, per campioni numerosi la scelta della distribuzione a priori non è influente (Orlando, 2010).

### 2.2.2 Applicazione dei metodi Monte Carlo alla statistica bayesiana

L'analisi bayesiana richiede estesamente il calcolo di integrali che, specie nel caso di più parametri (un vettore di parametri), possono comportare difficoltà di risoluzione analitica. Per superare questa difficoltà si può ricorrere all'integrazione numerica con metodi di tipo Monte Carlo.

In generale, se  $X$  è una variabile casuale con distribuzione  $\pi$  e  $h$  è una funzione di  $X$ , il calcolo dell'integrale:

$$E_{\pi} [h(X)] = \int h(x) \pi(x) dx$$

può essere difficoltoso, specialmente se  $X$  è a più dimensioni. Tuttavia, se è possibile estrapolare un campione  $x_1, x_2, \dots, x_n$  dalla distribuzione  $\pi(x)$ , un'approssimazione del valore dell'integrale può essere ottenuta con la sommatoria:

$$E_{\pi} [h(X)] \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h(x_i)$$

Se gli elementi del campione sono tra loro indipendenti, per la legge dei grandi numeri vale la relazione:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h(x_i) \rightarrow E_{\pi} [h(X)] \quad \text{quando } n \rightarrow \infty$$

e per la distribuzione  $h(X)$  vale il Teorema Limite Centrale.

La risoluzione delle precedenti espressioni può essere facilitata applicando come campione della distribuzione a posteriori quello ottenuto dall'utilizzo delle Catene Markoviane.

### 2.2.3 Cenni sulle Catene Markoviane

Sia  $X_1, X_2, \dots, X_n$  una successione discreta di variabili casuali tale che, per ogni  $t$  e per ogni  $x$ , risulti:

$$P(X_{t+1} = x_{t+1} | X_t = x_t, X_{t-1} = x_{t-1}, \dots) = P(X_{t+1} = x_{t+1} | X_t = x_t)$$

tale che, cioè, la probabilità che al passo  $t+1$  la variabile assuma valore  $x_{t+1}$  dipende solo dal valore  $x_t$  assunto al passo immediatamente precedente. La successione di valori  $x_1, x_2, \dots, x_n$  è un processo stocastico detto Catena Markoviana.

Una CM viene definita assegnando le probabilità  $p_{i,j}$  di transizione dal generico stato  $s_i$  a un qualunque altro stato  $s_j$  ed è omogenea se la probabilità non dipende da  $t$  ma solo dagli stati. Se lo spazio degli stati è finito, la CM può essere rappresentata e studiata tramite una matrice quadrata  $[P]$ , di ordine pari al numero degli stati possibili, i cui elementi sono le  $p_{i,j}$ . In questo caso la somma dei valori di una qualunque riga della matrice  $[P]$  vale 1, in quanto è la probabilità di transizione da uno stato a un qualsiasi altro.

Le CM possono avere diverse caratteristiche e possono essere classificate di conseguenza; in particolare, una Catena Markoviana è detta regolare se e solo se esiste una potenza della matrice  $[P]$  che ha tutti gli elementi strettamente positivi, perciò una CM è regolare se da ogni stato è possibile passare a un qualunque altro stato con un numero finito di passi (non necessariamente in un solo passo).

Inoltre, al limite quando  $n \rightarrow \infty$ , la probabilità di passare da un qualsiasi stato  $i$  a un altro  $j$  diventa indipendente dallo stato iniziale e le probabilità di raggiungere i singoli stati, indipendentemente dallo stato attuale, sono date dal vettore  $\bar{\pi}$ , che è un vettore distribuzione di probabilità, nel senso che gli elementi sono tutti strettamente positivi e con somma 1. In altri termini, qualunque sia il vettore di probabilità iniziale, la CM regolare tende, per  $n \rightarrow \infty$ , al vettore probabilità  $\bar{\pi}$ .

L'applicazione del metodo Monte Carlo che utilizza le Catene Markoviane all'inferenza bayesiana (metodo MCMC, Markov Chain Monte Carlo) consiste nel simulare una opportuna catena Markoviana, che restituisce una sequenza di valori che è un campione della distribuzione a posteriori, l'ultima della quale coincide con la distribuzione stazionaria della CM stessa.

Esistono diversi algoritmi con i quali è possibile ottenere, simulando una CM, un campione dalla distribuzione a posteriori; in SCEM-UA è adottato l'algoritmo di Metropolis-Hastings, di seguito descritto.

Metropolis (Metropoli set al., 1953) definì un algoritmo per costruire una CM in cui la distribuzione stazionaria coincide con la distribuzione a posteriori da determinare; il metodo è stato successivamente generalizzato da Hastings (1970).

Con il classico algoritmo di Metropolis, per ottenere un campione da una distribuzione a posteriori è necessario assegnare un valore iniziale del parametro, che è il passo iniziale della CM, e scegliere una funzione densità di probabilità *di proposta*  $q(\theta^{(t+1)} | \theta^{(t)})$ ; quest'ultima è usata per calcolare la probabilità di ottenere il nuovo valore del parametro  $\theta^{(t+1)}$  dato quello precedente  $\theta^{(t)}$  (probabilità condizionata) e deve essere simmetrica, in modo che la probabilità di passare da  $\theta^{(t+1)}$  a  $\theta^{(t)}$  sia uguale a quella del passaggio inverso da  $\theta^{(t)}$  a  $\theta^{(t+1)}$ . Nelle applicazioni pratiche il valore  $\theta^{(0)}$  è generato casualmente e la distribuzione  $q(\theta^{(t+1)} | \theta^{(t)})$  è scelta in modo tale che sia semplice ottenere un campione con uno dei classici metodi Monte Carlo, per cui la scelta più comune è la distribuzione normale con un valore fissato di  $\sigma$ .

Alla  $(t+1)$ -esima iterazione, l'algoritmo consiste nel generare, dato  $\theta^{(t)}$ , un nuovo valore  $\theta_{new}$  dalla distribuzione *di proposta*  $q(\theta_{new} | \theta^{(t)})$  e decidere se accettare o rigettare tale valore; se il valore è accettato l'algoritmo si ripete a partire da  $\theta^{(t+1)} = \theta_{new}$ , se è rigettato l'algoritmo si ripete a partire da  $\theta^{(t)}$  per un prefissato numero di iterazioni  $T$ . Più precisamente, i passi dell'algoritmo sono i seguenti:

1. si pone  $t=0$  e si sceglie un valore iniziale  $\theta^{(0)}$ ;  $\theta^{(0)}$  può essere un valore arbitrario purché  $p(\theta^{(0)} | \bar{y}) > 0$  (strettamente positivo);
2. si genera un nuovo valore  $\theta_{new}$  dalla distribuzione *di proposta*  $q(\theta_{new} | \theta^{(t)})$  (con un metodo Monte Carlo);
3. si calcola la quantità:

$$r = \min \left\{ \frac{p(\theta_{new} | \bar{y})}{p(\theta^{(t)} | \bar{y})}, 1 \right\}$$

- rapporto tra i valori delle distribuzioni a posteriori calcolate utilizzando i due valori di  $\theta$ ;
4. si genera un numero casuale  $u$  tra 0 e 1 dalla distribuzione uniforme,  $U(0,1)$ ;
  5. si pone  $\theta^{(t+1)} = \theta_{new}$  se  $u < r$  altrimenti  $\theta^{(t+1)} = \theta^{(t)}$ ;
  6. posto  $t = t + 1$ , se  $t < T$  (numero prefissato di iterazioni) si riprende dal passo 2, altrimenti fine.

Il vincolo di simmetria imposto dall'algoritmo di Metropolis sulla distribuzione *di proposta* è superato da Hastings (1970); adottando una qualunque distribuzione, anche asimmetrica  $q(\theta^{(t+1)} | \theta^{(t)}) \neq q(\theta^{(t)} | \theta^{(t+1)})$ , è possibile generare la CM adottando, al passo 3, una diversa espressione per calcolare il rapporto delle densità di probabilità:

$$r = \min \left\{ \frac{p(\theta_{new} | \bar{y})q(\theta^{(t)} | \theta_{new})}{p(\theta^{(t)} | \bar{y})q(\theta_{new} | \theta^{(t)})}, 1 \right\}$$

mentre gli altri passi dell'algoritmo non cambiano.

La CM generata dall'algoritmo si evolve tendendo alla distribuzione stazionaria  $p(\theta | \bar{y})$  perchè per tale catena, per una qualunque coppia di stati  $(x, y)$ , vale l'equazione di reversibilità:

$$\pi(x)P(x, y) = \pi(y)P(y, x)$$

in cui si è indicato con  $\pi(x)$  la distribuzione stazionaria della CM e con  $P(x, y)$  la probabilità di transizione da un qualunque stato  $x$  a un altro  $y$ .

L'algoritmo, descritto nel caso di un solo parametro  $\theta$ , può essere esteso al caso di un vettore di parametri  $\bar{\theta}$ .

Una CM, qualunque sia l'algoritmo utilizzato per generarla, converge alla distribuzione stazionaria asintoticamente, per  $t \rightarrow \infty$ . È necessario, pertanto, verificare che il processo raggiunga lo stato stazionario e determinare in corrispondenza di quale valore  $t'$  tale stato è raggiunto, in quanto solo per  $t > t'$  si può ritenere che i valori ottenuti siano distribuiti casualmente secondo la  $\pi(x)$ .

Per risolvere il problema della convergenza esistono diversi test, anche se, allo stato attuale, nessuno è in grado di fornire una soluzione definitiva. Una prima indicazione sulla convergenza può ottenersi rappresentando graficamente il risultato della simulazione, ovvero il valore  $\theta^{(t)}$  in funzione del numero del passo  $t$  (tracciato della CM). In Figura 2.4 è rappresentato il tracciato di una Catena Markoviana che raggiunge lo stato stazionario.

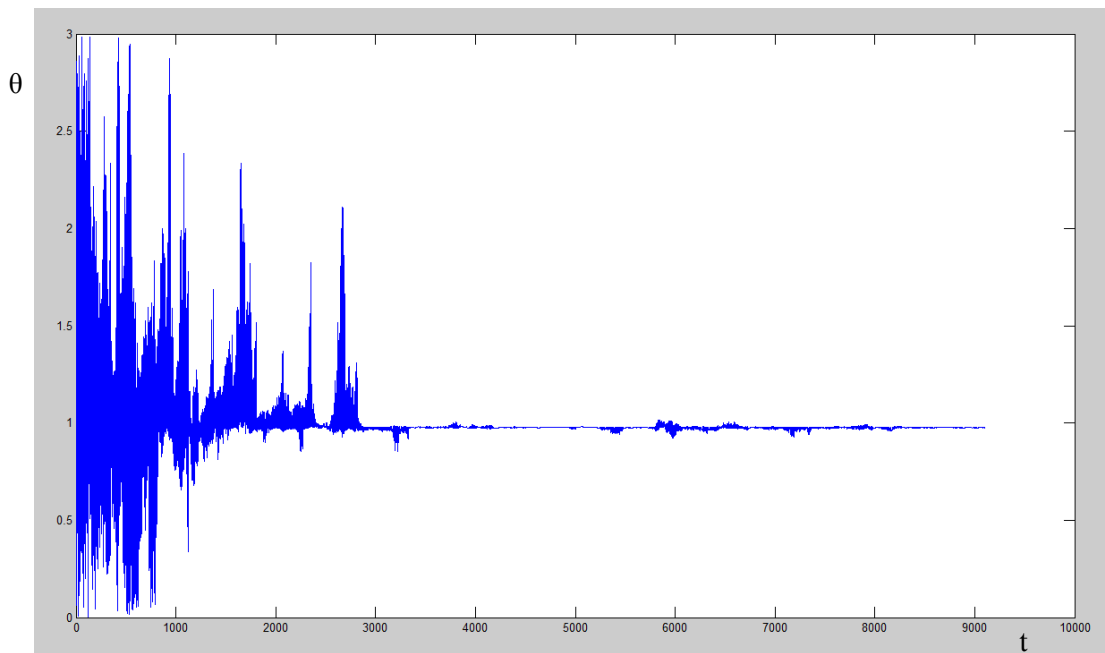


Figura 2.4 Tracciato di una CM che raggiunge lo stato stazionario

Tracciati di questo tipo, che tendono a una media e una varianza costanti, indicano che la CM ha raggiunto lo stato stazionario e, quindi, che i valori ottenuti possono considerarsi come campione estratto dalla distribuzione a posteriori del parametro. In genere, per migliorare il risultato ottenuto, si tiene conto solo degli ultimi valori restituiti dalla CM, scartando quelli iniziali ottenuti per  $t \leq t'$ . L'esame del tracciato della CM può rivelare anche la non convergenza alla distribuzione stazionaria (Figura 2.5 e Figura 2.6).

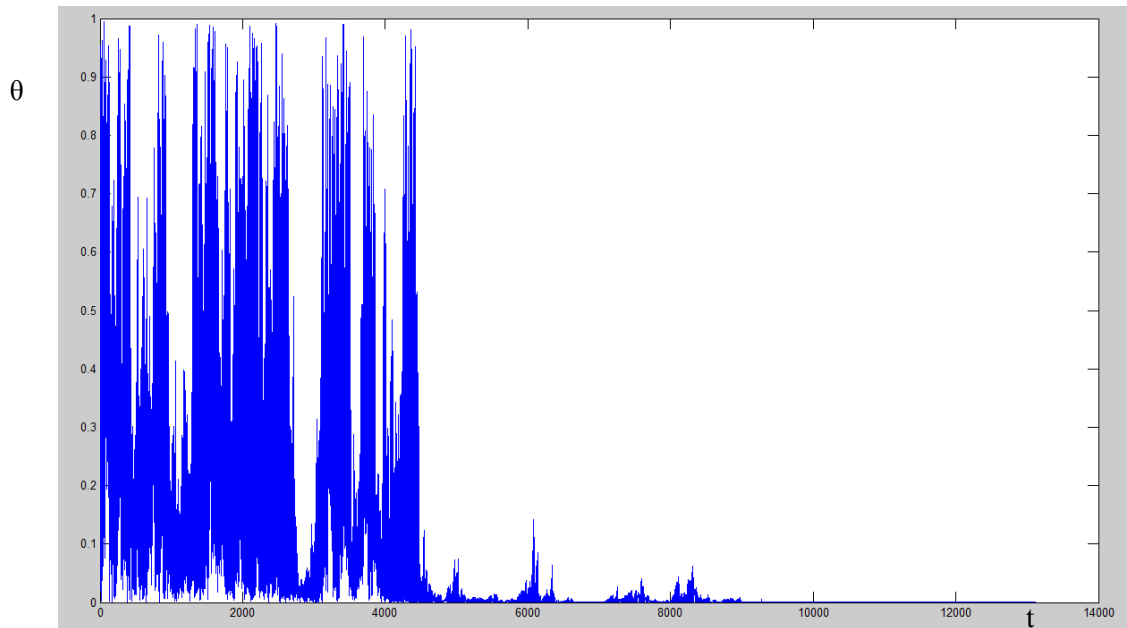


Figura 2.5 Tracciato di una CM non convergente. Il grafico tende ad uno degli estremi dell'intervallo ammissibile

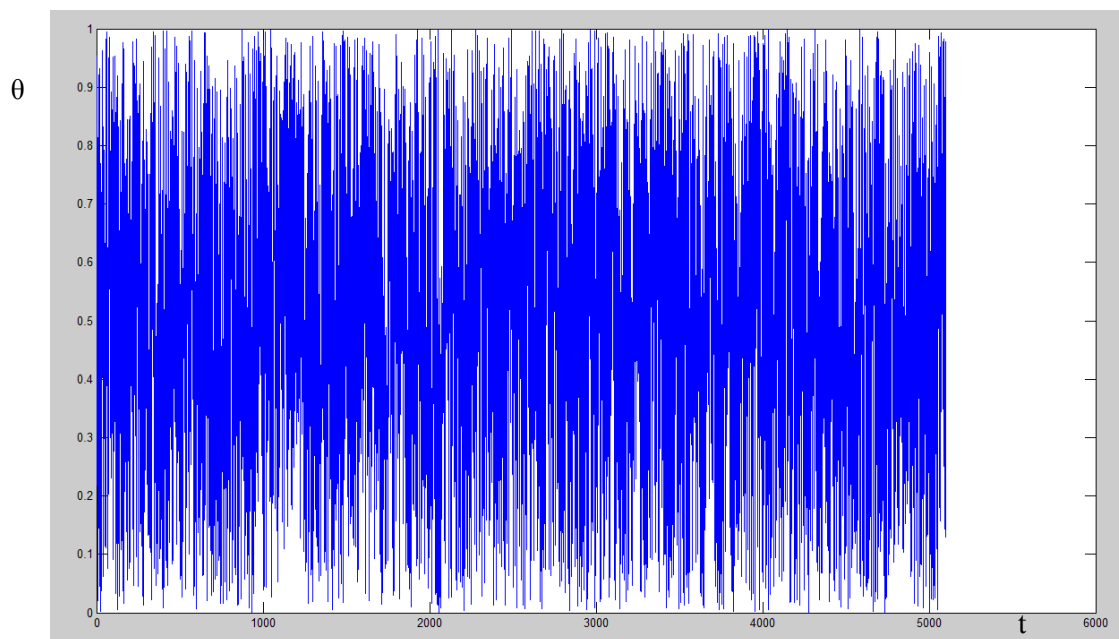


Figura 2.6 Tracciato di una CM non convergente. I valori ottenuti sono distribuiti uniformemente

L'esame del tracciato della CM è solo una prima verifica in grado di rivelare la convergenza o non convergenza in casi molto evidenti. In altre situazioni è possibile adottare test numerici e, in particolare, in SCEM-UA la convergenza alla distribuzione stazionaria è verificata con il test di Brooks e Gelman (1997), che è una versione evoluta del test di Gelman e Rubin (Gelman e Rubin, 1994). Il criterio è basato sull'analisi dei risultati di più CM parallele (che partono da condizioni iniziali diverse) e valuta la convergenza confrontando la varianza dei valori all'interno di ciascuna catena con la varianza tra le diverse catene.



Il metodo bayesiano è stato precedentemente descritto per la stima dei parametri di una distribuzione di probabilità ma può essere esteso, applicando l'espressione generale della regressione non lineare e i risultati di Box e Tiao (1973), anche alla stima dei parametri di un modello di simulazione.

Applicando l'inferenza bayesiana, i parametri del modello non sono più considerati valori deterministici ma variabili casuali, delle quali è possibile determinare la distribuzione di probabilità condizionata date le misure effettuate (distribuzione a posteriori), a partire da una distribuzione iniziale (distribuzione a priori), da un vettore di misure (considerato come un campione della popolazione) e dal modello statistico che descrive la distribuzione del campione (funzione di verosimiglianza, ovvero probabilità condizionata di ottenere il vettore di misure dato il valore dei parametri).

## 2.3 Algoritmi risolutivi

### 2.3.1 L'algoritmo SCEM-UA

L'algoritmo SCEM-UA (Vrugt et al., 2003) è un metodo numerico di ottimizzazione di tipo MCMC, che restituisce un campione della distribuzione a posteriori dei parametri di un modello, generando più catene Markoviane parallele con l'algoritmo di Metropolis e applicando le relazioni di Box e Tiao (1973). In UNINET si è utilizzata una versione dell'algoritmo SCEM-UA, scritta in MatLab e scaricata da internet (url: [http://www.sahra.arizona.edu/software/index\\_main.html](http://www.sahra.arizona.edu/software/index_main.html)).

Il metodo genera e fa evolvere contemporaneamente più CM parallele, raccogliendo i punti ottenuti durante il processo stocastico in gruppi, detti *Complexes*, che vengono sistematicamente riuniti e riordinati e utilizzati per il calcolo dei passi successivi della catena.

Il processo di ottimizzazione inizia generando, dalla distribuzione a priori, una popolazione iniziale di  $s$  valori casuali, corrispondenti ad altrettanti punti nello spazio di ricerca della soluzione del problema. La popolazione iniziale è successivamente suddivisa in un prefissato numero  $q$  di insiemi composti da  $m = s/q$  punti ciascuno, definiti *Sequences*, in modo che ciascun insieme contenga punti con alto valore della distribuzione a posteriori e punti con basso valore della distribuzione a posteriori. Il punto migliore della  $k$ -esima *Sequence* è utilizzato come passo iniziale della corrispondente CM. Le *Sequences* così composte costituiscono, la parte iniziale delle  $q$  catene parallele.

Dalla stessa popolazione iniziale, si possono comporre altri  $q$  insiemi di  $m$  punti ciascuno, i *Complexes*. La media e la matrice delle covarianze dei punti del  $k$ -esimo *Complexes* sono utilizzate per generare un nuovo passo della corrispondente catena Markoviana.

Un nuovo passo  $t+1$  della  $k$ -esima catena è generato, in SCEM-UA, applicando l'algoritmo di Metropolis e adottando come distribuzione *di proposta* la normale. Il nuovo passo della CM è utilizzato anche per aggiornare il *Complexes* e, infine, il calcolo ha termine quando è soddisfatto il criterio di convergenza di Brooks e Gelman.

### 2.3.2 Il modello di simulazione INetPDA

I modelli di calibrazione non possono prescindere dall'utilizzo dei modelli di verifica reti e, poiché la precisione dei risultati dell'uno dipende dalla precisione dei risultati dell'altro, è necessario utilizzare modelli di verifica in grado di fornire valori calcolati di pressione e portata il più possibile prossimi ai valori misurati.

Proprio per evitare che i risultati della simulazione possano essere affetti da errori sistematici, nel caso in cui si faccia riferimento ad uno schema troppo semplificato, quale l'adozione di un modello DDA (Demand Driven Analysis), per UNINET è stato scritto e implementato un modello di simulazione reti denominato INetPDA, che presenta le seguenti caratteristiche principali:

- portate erogate variabili in funzione della pressione al nodo, secondo uno schema PDA;
- utilizzo della formula di Colebrook per il calcolo delle perdite di carico in condotta;
- utilizzo di un efficiente algoritmo di soluzione del sistema algebrico non lineare.

In INetPDA le portate distribuite si considerano concentrate ai nodi e si assumono variabili con la pressione e, come legge di erogazione è stata adottata quella proposta da Calomino e Veltri (1980). Per quanto riguarda la legge del moto in condotta si è utilizzata la formula di Colebrook, che è valida sia in regime assolutamente turbolento sia in regime di transizione sia per regime di moto turbolento in tubo liscio, regimi che possono tutti trovarsi nelle reti reali, nelle quali possono aversi valori di velocità anche molto bassi.

Per la soluzione del sistema non lineare è stato adattato alla verifica di tipo PDA un classico metodo di linearizzazione, da molti anni utilizzato nella verifica di tipo DDA, di seguito descritto.

Data una rete con  $n_s$  nodi serbatoio,  $l$  condotte e  $n_e$  nodi erogazione, le equazioni che consentono di risolvere il problema di verifica, nel caso di portate erogate costanti e concentrate ai nodi (verifica di tipo DDA), sono:

$$\sum_{j=1}^p \pm q_j + Q_i = 0 \quad (n_e \text{ equazioni di continuità}) \quad (2.1)$$

$$|h_j| = r_j q_j^m \quad (l \text{ equazioni del moto}) \quad (2.2)$$

$$h_j = H_k - H_s \quad (l \text{ equazioni perdita di carico-pressione al nodo}) \quad (2.3)$$

In cui:

- $q_j$  rappresenta la portata nella condotta  $j$ ;

- $Q_i$  rappresenta la portata erogata dal nodo  $i$ ;
- $h_j$  è la perdita di carico nella condotta  $j$ ;
- $r_j$  è la resistenza idraulica della condotta  $j$ , la cui espressione dipende dalla particolare formula di moto utilizzata;
- $m$  è l'esponente della portata nella formula del moto, il cui valore dipende dalla particolare formula di moto utilizzata;
- $H_k$  è la quota piezometrica al generico nodo  $k$ .

Le  $n_e + 2l$  equazioni precedenti, che sono tra loro indipendenti, costituiscono un sistema che, risolto, fornisce i valori delle incognite quote piezometriche ai nodi erogazione, portate e perdite di carico nelle condotte.

Per semplificare il problema algebrico è opportuno sostituire i valori  $h_j$  dati dalle equazioni (2.3) nelle (2.2), risolvere le equazioni così ottenute nelle incognite  $q_j$  e sostituire queste ultime nelle equazioni di continuità (2.1). In tal modo si ottiene un sistema di dimensione pari al numero dei nodi erogazione  $n_e$  nelle incognite quote piezometriche degli stessi nodi. La generica equazione del sistema ha la forma:

$$\sum_{j=1}^p r_j^{-1/m} (H_k - H_i) |H_k - H_i|^{1/m-1} + Q_i = 0 \quad (2.4)$$

Il sistema è non lineare e in INetPDA è risolto linearizzando le equazioni del moto (Calomino et al., 1988). Le (2.2), risolte rispetto a  $q_j$ , possono essere poste nella forma:

$$q_j = \left( \frac{|h_j|^{(1/m-1)} h_j}{r_j^{1/m}} \right) = Y_j h_j \quad (2.5)$$

con

$$Y_j = \frac{|h_j|^{(1/m-1)}}{r_j^{1/m}} = Y_j(h_j) \quad (2.6)$$

termine che ha le dimensioni di una conduttanza e che, ritenendo assegnati  $r_j$  e  $m$ , risulta funzione solo di  $h_j$ .

Sostituendo le (2.3) nelle (2.5) e poi nelle equazioni di continuità (2.1), si ottiene un sistema di ordine  $n_e$  nelle incognite quote piezometriche che, considerando le  $Y_j$  costanti, è lineare e la cui generica equazione è:

$$\sum_{j=1}^p Y_j (H_k - H_i) + Q_i = 0 \quad (2.7)$$

Il sistema non lineare delle equazioni (2.4) può essere risolto, quindi, adottando un procedimento iterativo:

- 1) si fissano dei valori  $h_j$  iniziali (normalmente  $h_j = 1$ );
- 2) si calcolano, con le (2.6), i valori  $Y_j$ ;
- 3) si risolve il sistema lineare (2.7) nelle incognite  $H$ ;
- 4) con i valori delle quote piezometriche  $H$  ottenute dalla soluzione del sistema, si calcolano le nuove perdite di carico  $h_j$ ;
- 5) si itera il procedimento dal passo 2 fino ad ottenere la soluzione a meno di uno scarto prefissato sui risultati ottenuti da due iterazioni successive.

Per poter applicare il metodo descritto non è necessario calcolare derivate né dare una soluzione iniziale ed è sufficiente assegnare solo dei valori  $h_j$  iniziali. E' necessario, però, poter scrivere la formula del moto nella forma (2.5) per determinare la particolare espressione di  $Y_j$ .

L'algoritmo di linearizzazione, descritto per la verifica DDA, può essere esteso al caso di verifica PDA ricalcolando a ogni iterazione, in funzione delle quote piezometriche ottenute dalla soluzione del sistema (2.7), oltre al termine  $Y_j$  anche la portata erogata dai nodi  $Q_i$ .

L'algoritmo può essere schematizzato nei seguenti passi:

- 1) si assegnano come portate erogate iniziali le massime  $Q_i^{\max}$ , in cui:

$$Q_i = \alpha_i Q_i^{\max} \quad (2.8)$$

- 2) si fissano dei valori  $h_j$  iniziali (normalmente  $h_j = 1$ );
- 3) si calcolano, con le (2.6), i valori  $Y_j$ ;
- 4) si risolve il sistema lineare (2.7) nelle incognite  $H$ ;
- 5) con i valori delle quote piezometriche  $H$  ottenute dalla soluzione del sistema si calcolano le nuove perdite di carico  $h_j$ ;
- 6) in funzione delle quote piezometriche  $H$  si calcolano i nuovi valori delle portate erogate  $Q_i$  applicando la (2.8) con i valori di  $\alpha$  ricavati dalla seguente:

$$\alpha_i = \left( \frac{H_i - H_i^{\min}}{H_i^{\max} - H_i^{\min}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.9)$$

- 7) si itera il procedimento dal passo 3 fino ad ottenere la soluzione a meno di uno scarto prefissato sui risultati ottenuti da due iterazioni successive;
- 8) si confrontano le portate erogate attuali con quelle date dalla (2.8); se lo scarto massimo è superiore a quello ritenuto accettabile si torna al passo 3.

## Capitolo 3: Metodologie di Analisi di Reti Idriche

### 3.1 Introduzione

In questo capitolo sono descritte tutte le metodologie di analisi utilizzate in questa tesi, finalizzate ai seguenti fini:

- Elaborazione di dati in input al modello di verifica e al modello di calibrazione, quale la definizione della portata erogata ai nodi;
- Elaborazione dei risultati del modello di calibrazione;
- Criteri generali per il progetto della raccolta dati di misura;
- Descrizione dell'analisi di sensitività per la valutazione dei punti di misura.

### 3.2 Elaborazione di dati in input al modello di verifica

#### 3.2.1 Calcolo della portata $Q_{rete}$

La relazione utilizzata nella presente tesi per calcolare la portata complessiva che transita in una rete reale  $Q_{rete}$  è calcolata secondo la seguente:

$$Q_{rete} = C_p \times \frac{d \times P}{86400} \quad (3.1)$$

In cui:

- $C_p$  è un coefficiente di punta adimensionale, che permette di stimare la portata massima che transita in rete;
- $d$  [l/ab/d] è la dotazione idrica giornaliera;
- $P$  è la popolazione presente nell'area di studio;
- 86400 è un fattore di conversione di unità di misura.

La formula (3.1) viene utilizzata per calcolare la portata richiesta ai nodi nelle tre reti reali, oggetto di modellazione nella presente tesi. Le tre reti sono:

- La rete di Marina di Santa Maria del Cedro (CS);
- La rete di San Mango d'Aquino (CZ);
- La rete di Amantea (CS).

### 3.2.2 Stima dei carichi ai nodi

Nelle tre reti reali modellate sono state effettuate sia verifiche di tipo DDA (Demand Driven Analysis) e sia verifiche in condizioni PDA (Pressure Driven Analysis), mentre per le reti di letteratura, in seguito descritte, sono state eseguite unicamente verifiche in condizioni DDA.

In UNINET, o meglio ancora nel suo modello di simulazione interno, INetPDA, per consentire il funzionamento nelle due tipologie di verifica, bisogna assegnare valori diversi di carico ai nodi. In particolare:

- Affinchè la verifica sia di tipo DDA è necessario porre all'interno del codice:

$$H_{min} = 0 \text{ e } H_{max} = 1$$

In cui  $H_{min}$  e  $H_{max}$ , ambedue espresse in metri, rappresentano, rispettivamente, la quota piezometrica al di sotto della quale la portata erogata è nulla e la quota piezometrica necessaria affinché la portata erogata sia pari alla massima.

- Affinchè, invece, la verifica sia di tipo PDA è necessario esprimere  $H_{min}$  e  $H_{max}$  come segue:
  - $H_{min}$  è data dalla quota geodetica di ciascun nodo di erogazione;
  - $H_{max}$  è espresso dalla seguente relazione:

$$H_i^{\max} = H + P_{ms} + P_p + P_D$$

In cui i simboli sono già definiti nel capitolo 1, paragrafo 5.2.

A titolo di esempio si riporta il caso studiato per la rete di San Mango d'Aquino, una delle reti oggetto di studio.

È stato posto  $H_{min}$  pari alla quota del nodo (circa pari alla quota del terreno rispetto al livello medio mare) e per il carico massimo si è considerata la seguente somma:

$$H_{max} = H_{min} + 25 \text{ metri}$$

Per i nodi di alimentazione si definiscono, all'interno del modello di simulazione INetPDA, le seguenti grandezze:

- $H_{piez}$  rappresenta la quota piezometrica del serbatoio;
- $H_{ter}$  rappresenta la quota del terreno.

### 3.3 Elaborazione dei risultati del modello di calibrazione

Effettuata la calibrazione di una rete con il modello UNINET, dalla distribuzione a posteriori si ottengono due tipi di risultati:

- Un valore medio, che rappresenta il valore del parametro calibrato;
- Uno scarto quadratico medio, che fornisce informazioni riguardo il grado di incertezza legato alla soluzione del problema.

In questa tesi è stato anche calcolato, accanto alla scabrezza calibrata di una rete, il valore dello scarto medio relativo ( $\mu_\varepsilon$ ), come segue:

$$\mu_\varepsilon = \sum_{i=1}^n \frac{|\varepsilon_c - \varepsilon_r|}{\varepsilon_r}$$

In cui:

- Con il pedice “c” sono state indicate le grandezze calcolate;
- Con il pedice “r” sono state indicate le grandezze reali;
- Con “ $\varepsilon$ ” il valore di scabrezza in [mm];
- Con “n” il numero di lati della rete.

### **3.4 Criteri generali per il progetto della raccolta dati di misura**

#### **3.4.1 Dati necessari**

Nel problema di calibrazione delle reti idriche assume particolare importanza l’acquisizione dei dati di misura. Perciò, non potendo effettuare misure in tutti i lati e nodi della rete è opportuno scegliere i punti di misura, individuabili tra quelli più sensibili alla variazione di alcune grandezze, quali scabrezza e portata, evitando condotte caratterizzate da basse velocità, in quanto le perdite di carico sono poco apprezzabili e dello stesso ordine di grandezza dell’errore di misura. Walski (2000) suggerisce che per valutare numericamente la bontà dei dati di misura sulla perdita di carico, la misura deve essere circa cinque volte l’errore che può essere commesso.

I dati misurati vengono distinti in base a tre gradi di qualità: buoni, cattivi e inutili (Walski, 2000). Se la perdita di carico è talmente elevata da risultare superiore all’eventuale errore di misura dello strumento, il dato è buono, altrimenti il dato è inutile. I dati cattivi si individuano in base all’esperienza e sono dovuti al cattivo funzionamento dei dispositivi di misura, a negligenze oppure alla mancata individuazione di strozzature o altre incertezze sull’effettivo sviluppo della rete.

Per la scelta dei punti di misura occorre tener presente le seguenti regole di massima:

- massimizzare la perdita di carico eseguendo le rilevazioni durante le condizioni di picco della domanda ed effettuando i test sui nodi idrante avendo note le condizioni di funzionamento del resto della rete.
- Conoscere i carichi nei punti estremi e, se in funzione, nelle pompe.
- Effettuare le misure di pressione lontano dai serbatoi, in quanto nei loro pressi le perdite di carico non saranno sufficienti per essere utilizzabili.
- Usare strumenti di misura delle pressioni accuratamente calibrati.



- Disporre di un'ottima conoscenza topologica della rete.

Inoltre è opportuno tener conto dei due seguenti aspetti:

- che i dati possono avere misure riferite ad un dato tempo e ad un fissato periodo di funzionamento della rete.
- Il problema dell'identificabilità, ossia diversi vettori di parametri di calibrazione possono condurre allo stesso vettore dei parametri predetti; ciò accade quando è stata risolta una calibrazione indeterminata, ossia quando il numero dei dati da calibrare è superiore al numero di misure. Analogo è il caso della calibrazione sovra determinata che, al contrario, si verifica quando il numero dei dati da calibrare è inferiore al numero di misurazioni.

Come già evidenziato, la calibrazione necessita di dati di buona qualità: piccole velocità e perdite di carico modeste danno luogo a cieli piezometrici piatti e quindi poco apprezzabili.

Le sorgenti di errore possono essere molteplici e sono errori del modello e errori della misura.

Gli errori del modello riguardano:

- Schema geometrico semplificato dovuto sia a semplificazioni dello schema o ad errate informazioni, sia ad una scheletrizzazione non corretta, sia ad un raggruppamento di condotte non esatto in termini di scabrezze.
- Errori sulle scabrezze assegnate alle condotte.
- Errori sulle portate erogate ai nodi.

Gli errori della misura riguardano invece:

- Errori sulle misure che si confrontano con i dati calcolati dal modello, precisamente: lettura delle pressioni, errori sulle quote geometriche, livello dei serbatoi, letture dei livelli dei serbatoi.

### **3.4.2 Progetto della raccolta dati**

La raccolta dei dati necessita di un vero e proprio progetto delle misure, scegliendo cosa, quando, quanto, dove e come misurare.

Come già noto le grandezze da misurare sono portata e pressione, ma occorre stabilire le modalità di acquisizione, quindi le condizioni di misura, la frequenza e la localizzazione dei punti di misura.

Per quanto concerne le condizioni, le misure vanno effettuate sia in condizioni normali, sia di punta, sia antincendio e sia per singole condizioni di funzionamento, sia in continuo (EPS, Extended

Period Simulation, monitoraggio continuo). La raccolta dei dati può essere classificata in “lettura puntuale”, consistente in dati raccolti in singole postazioni in uno specifico momento e “monitoraggio continuo”, consistente in lettura in singole postazioni durante un prefissato e non breve intervallo di tempo.

Il numero di misure dipende anche dalla disponibilità economica e dal costo delle stesse.

Precedenti ricerche (Ferrerri e Gangitano, 2001) hanno affermato quanto segue:

- Al crescere delle misure in rete il miglioramento dei risultati è dapprima molto sensibile, quindi diventa trascurabile.
- È opportuno avere a disposizione misure contemporanee di portata e pressione.
- È preferibile aumentare il numero di misuratori durante una prefissata condizione di funzionamento piuttosto che il numero di dati derivanti da diverse condizioni di funzionamento.

Il problema della localizzazione dei punti di misura richiede che i misuratori di pressione debbano essere lontani dai punti a quota fissa, serbatoi, e non in condotte rimosse dalla scheletrizzazione. Inoltre sono necessarie condotte con portate e velocità non basse, in modo che le conseguenti perdite di carico siano apprezzabili e sono preferibili i punti vicini a grandi prelievi.

### **3.5 Descrizione delle matrici di sensitività per la valutazione dei punti di misura**

Nella calibrazione delle reti idriche, un ruolo importante riveste l'analisi di sensitività, di conseguenza, è opportuno fare un richiamo al metodo in esame, anche per comprendere i successivi risultati ottenuti, riportati nei capitoli 4 e 5.

Per rendere oggettiva l'individuazione dei nodi nei quali compiere misurazioni, un possibile metodo è quello legato all'utilizzo delle matrici di sensitività che consentono di individuare i nodi e i lati più sensibili attraverso la valutazione di cosa avviene al variare dei dati in ingresso.

In particolare per lo studio della calibrazione delle scabrezze nelle reti idriche possono essere costruite due particolari matrici, una riferita ai nodi e una riferita alle portate circolanti nelle condotte.

Dette matrici sono  $S_H$  e  $S_q$  costituite dalle derivate del carico e della portata rispetto alla variazione delle scabrezze in cui i singoli elementi assumono la forma:

$$\partial H_{k,i} = \partial H_i / \partial C_k \quad \text{e} \quad \partial q_{k,j} = \partial q_j / \partial C_k$$

in cui  $H_{k,i}$  e  $q_{k,j}$  sono rispettivamente la variazione di carico nel nodo  $i$ -esimo e la variazione di portata circolante nel lato  $j$ -esimo al variare del coefficiente  $C$  relativo alla  $k$ -esima condotta.

Nel dettaglio la matrice di sensitività dei carichi  $H$  rispetto alla variazione di scabrezza è una matrice rettangolare di dimensioni  $[n \times l]$ , dove  $n$  sono i nodi della rete e  $l$  sono i lati:

$$S_H = \begin{bmatrix} \partial H_1 / \partial C_1 & \dots & \partial H_1 / \partial C_l \\ \vdots & \partial H_i / \partial C_k & \vdots \\ \partial H_n / \partial C_1 & \dots & \partial H_n / \partial C_l \end{bmatrix}$$

La matrice di sensitività delle portate circolanti  $q$  rispetto alla variazione di scabrezza è una matrice quadrata di dimensioni  $[l \times l]$ :

$$S_q = \begin{bmatrix} \partial q_1 / \partial C_1 & \dots & \partial q_1 / \partial C_l \\ \vdots & \partial q_j / \partial C_k & \vdots \\ \partial q_l / \partial C_1 & \dots & \partial q_l / \partial C_l \end{bmatrix}$$

In cui si avranno  $l$  righe che rappresentano gli  $l$  lati della rete e  $l$  colonne che rappresentano la variazione del coefficiente di scabrezza nei lati.

In accordo con quanto riportato da Pudar e Ligget (1992), per individuare i nodi e i lati più sensibili si può utilizzare il criterio della Max-Sum. Il criterio prevede che siano i nodi e lati più sensibili quelli corrispondenti ai valori più elevati della somma dei termini di ciascuna riga delle due matrici  $S_H$  e  $S_q$ , definiti come  $\Sigma_{S_H}$  e  $\Sigma_{S_q}$ .

## Capitolo 4: Modellazione di reti teoriche di letteratura con il modello UNINET

### 4.1 *Il miglioramento della soluzione del problema di calibrazione al crescere del numero di misuratori in rete*

Ai fini gestionali di una rete di distribuzione idrica, è utile valutare quale sia il numero di misure necessario per ottenere risultati calcolati dalla calibrazione più vicini ai valori reali della grandezza presa in considerazione (Ferreri e Gangitano, 2001). Allo scopo sono state studiate due reti di letteratura: la rete proposta da Walski (1983) e la rete proposta da Greco M, Di Cristo C., 1999.

#### 4.1.1 **Analisi della rete proposta da Walski**

La rete proposta da Walski è costituita da un nodo di alimentazione, nove condotte, sei nodi di erogazione, tre maglie chiuse elementari e un ramo aperto. La quota piezometrica del serbatoio di alimentazione (nodo 7) è 60.90 m, la geometria della rete è descritta in Figura 4.1 e i dati di input, comprensivi di portata in condotta e carico ai nodi, calcolati da una verifica DDA, sono riportati in Tabella 4-1 e in Tabella 4-2.

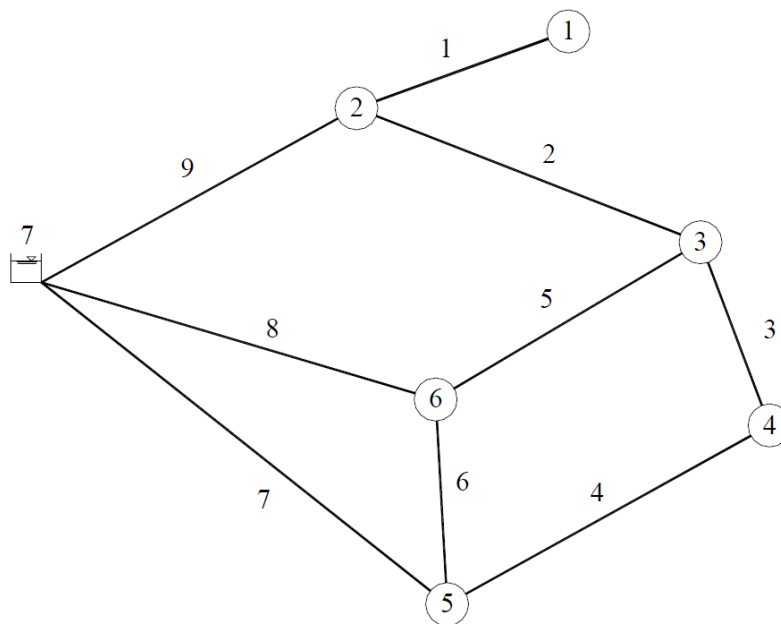


Figura 4.1 La rete proposta da Walski (1983)

Tabella 4-1 Caratteristiche geometriche e portate fluenti della rete proposta da Walski

Lato	Start node	End node	L [m]	D [mm]	$\epsilon$ [mm]	q calcolata[l/s]
1	1	2	304.8	203.2	4.5	-25.24
2	2	3	609.6	304.8	0.45	18.976
3	3	4	609.6	304.8	0.45	-14.639
4	4	5	304.8	304.8	0.45	-46.179
5	3	6	457.2	304.8	0.45	-61.016
6	5	6	152.4	203.2	0.75	-24.796
7	5	7	914.4	254	0.8	-52.933
8	6	7	762	406.4	0.29	-211.99
9	2	7	609.6	304.8	0.9	-107.31

Tabella 4-2 Portate erogate e carichi ai nodi della rete proposta da Walski

Nodo	Portata erogata [l/s]	H calcolato[m]
1	25.24	52.75
2	63.09	55.1
3	94.63	54.93
4	31.54	55.03
5	31.55	55.5
6	126.18	56.13

La calibrazione della rete è stata effettuata assumendo note le misure di pressione in alcuni nodi (Tabella 4-3). Ipotizzando di conoscere un certo numero di misure, via via crescente, è stato possibile determinare il valore della scabrezza calibrata e quindi determinare il valore dello scarto relativo  $\mu_\epsilon$ , per come precedentemente definito, indicativo dell'andamento della soluzione, quindi della scabrezza calibrata, al variare del numero di misuratori in rete.

Tabella 4-3 Sommatoria, valori minimo, massimo e medio del parametro scarto relativo, ipotizzando note misure di pressione ai nodi

misura	nodi	$\mu_{\epsilon i \text{ somm}}$	$\mu_{\epsilon \text{ min}}$	$\mu_{\epsilon \text{ max}}$	$\mu_{\epsilon \text{ medio}}$
pressione	6	1.870	0.052	0.456	0.208
	6, 4	2.590	0.247	0.345	0.287
	6, 4, 1	1.710	0.034	0.278	0.189
	6, 4, 1, 3	2.230	0.012	0.420	0.248
	6, 4, 1,	1.690	0.015	0.286	0.188

In Tabella 4-3 i simboli riportati hanno il seguente significato:

- “ $\mu_{\epsilon i \text{ somm}}$ ” rappresenta la sommatoria degli scarti relativi calcolati, ossia la sommatoria, effettuata su tutti i lati della rete, degli scarti per ciascun lato.
- “ $\mu_{\epsilon \text{ min}}$ ” è il valore minimo degli scarti relativi;

- “ $\mu_{\varepsilon\max}$ ” è il valore massimo degli scarti relativi;
- “ $\mu_{\varepsilon\text{medio}}$ ” è il valore medio degli scarti relativi.

L'andamento di  $\mu_{\varepsilon}$  è plottato in Figura 4.2.

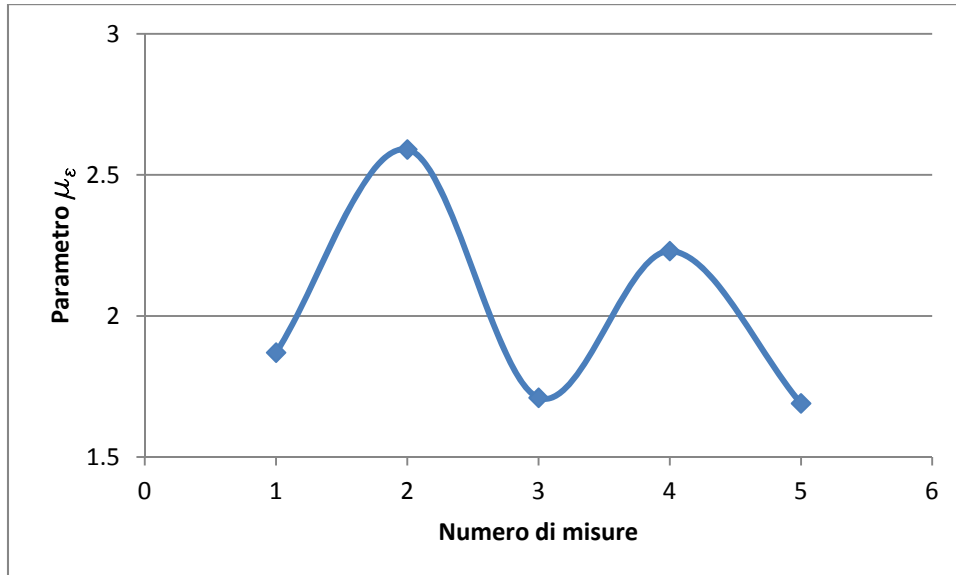


Figura 4.2 Andamento del parametro  $\mu_{\varepsilon}$  relativo alla rete proposta da Walski, ipotizzando di avere a disposizione misure di pressione ai nodi

Il valore di  $\mu_{\varepsilon}$ , come risulta evidente dalla Tabella 4-3 e dalla Figura 4.2, non varia molto con il crescere del numero di misuratori in rete, infatti lo scarto ottenuto ipotizzando note cinque misure di pressione è circa simile al valore ottenuto con tre misure note, ma già con una sola misura di pressione.

Se si opera ipotizzando note le misure di portata, invece che misure di pressione, scelte sempre in modo casuale, si ottengono i risultati, in termini di scarti relativi tra grandezza reale e quella calibrata, riportati in Tabella 4-4 e Figura 4.3.

Tabella 4-4 Sommatoria, valori minimo, massimo e medio del parametro scarto relativo, ipotizzando note misure di portata nei lati

misura	lati	$\mu_{\varepsilon i}$ somm	$\mu_{\varepsilon\min}$	$\mu_{\varepsilon\max}$	$\mu_{\varepsilon\text{medio}}$
portata	4	2.700	0.087	0.662	0.300
	4, 8	9.440	0.395	2.362	1.049
	4, 8, 9	1.440	0.034	0.512	0.159
	3, 4, 8, 9	0.770	0.010	0.391	0.086
	3, 4, 7,	2.010	0.149	0.522	0.223

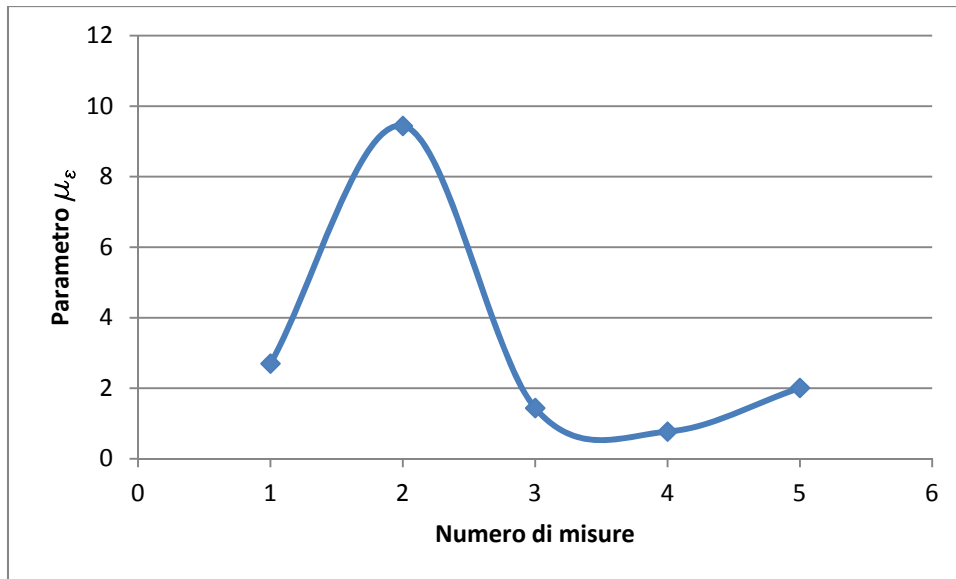


Figura 4.3 Andamento del parametro  $\mu_\varepsilon$  relativo alla rete proposta da Walski, ipotizzando di avere a disposizione misure di portata in condotta

Anche in questo caso, il valore dello scarto relativo non varia di molto al crescere del numero di misure in rete, tranne nel caso in cui si ipotizza di disporre di due misure di portata in condotta. Inoltre dal confronto tra scabrezze reali e calibrate riportato in Figura 4.4 si nota che la maggiore differenza tra valore reale e valore calibrato è quello relativo alla condotta 1, lato della rete che costituisce un ramo a se della stessa.

I valori delle scabrezze reali e di quelle calibrate, sia ipotizzando note misure di pressione ai nodi, che di portata ai lati, sono stati riportati in Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8.

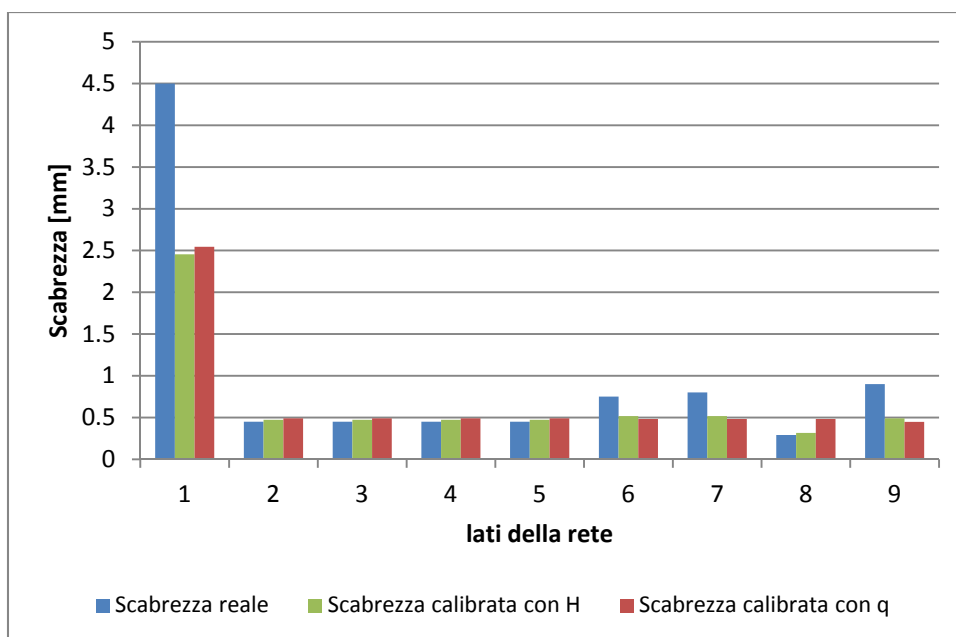


Figura 4.4 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere una misura di portata e successivamente una misura di pressione

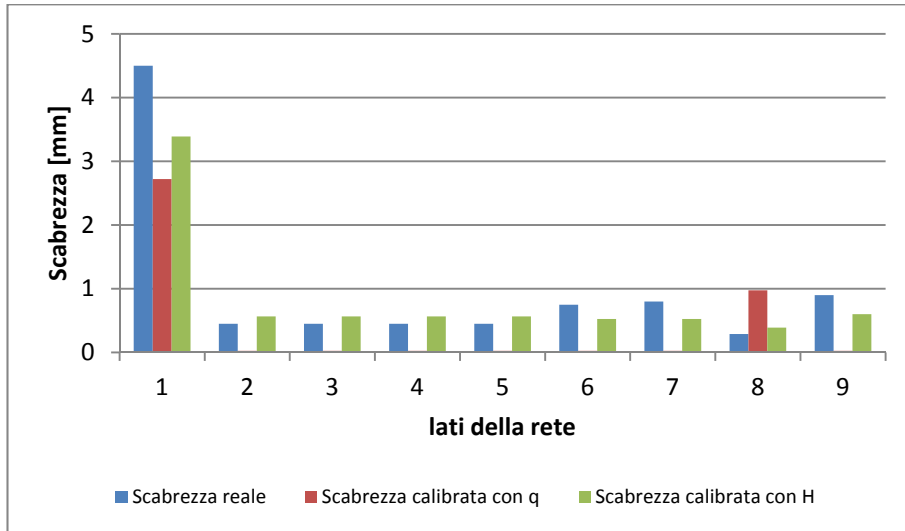


Figura 4.5 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere due misure di portata e successivamente due misure di pressione

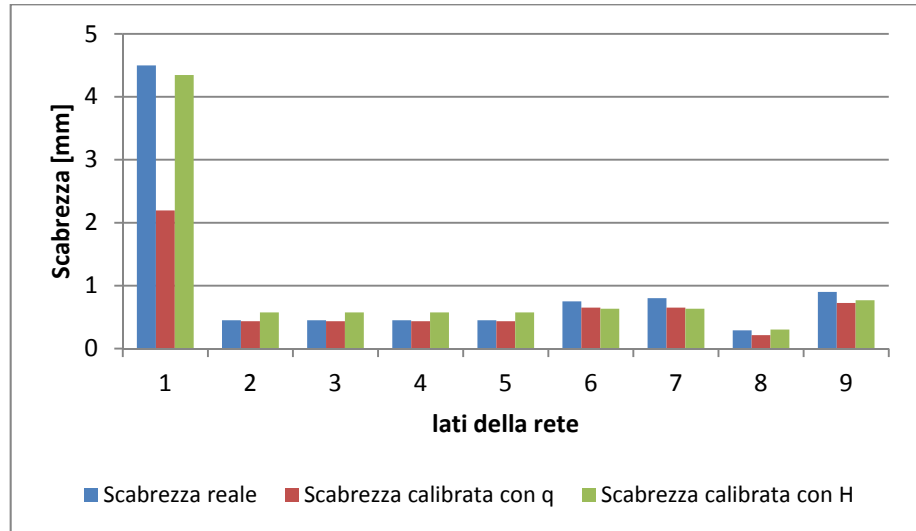


Figura 4.6 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere tre misure di portata e successivamente tre misure di pressione

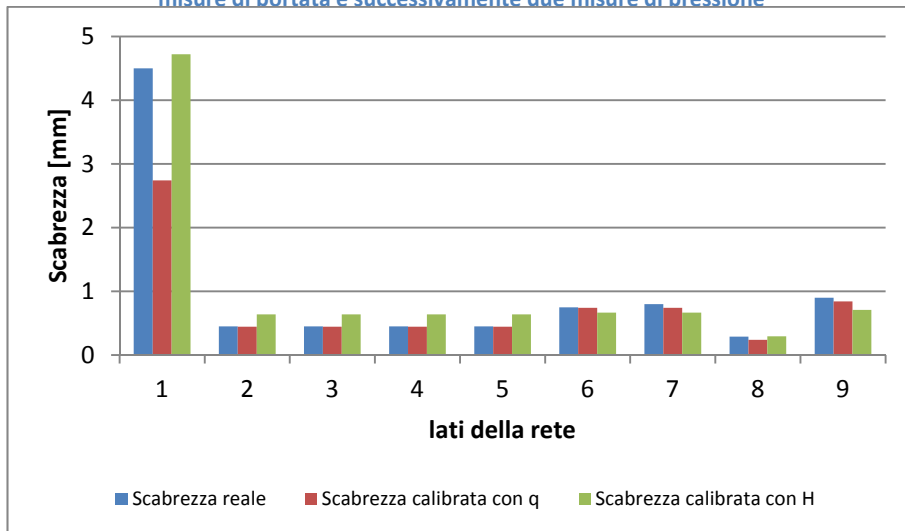


Figura 4.7 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere quattro misure di portata e successivamente quattro misure di pressione

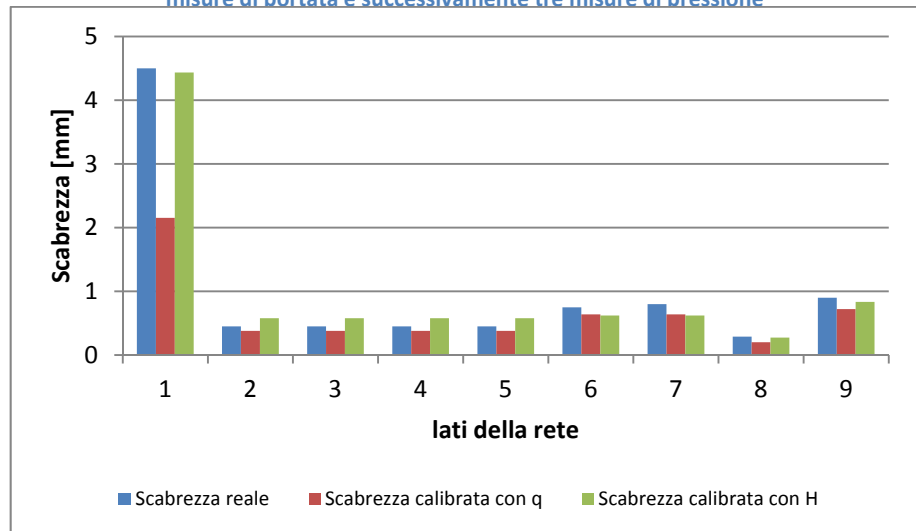


Figura 4.8 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere cinque misure di portata e successivamente cinque misure di pressione



#### 4.1.2 Analisi della rete proposta da Greco

L'analisi effettuata per la rete proposta da Walski è stata condotta anche per la rete proposta da Greco M. e Di Cristo C. (1999).

La rete è costituita da quattro maglie chiuse elementari, due nodi di alimentazione, undici nodi di erogazione e sedici condotte (Figura 4.9). La quota piezometrica al serbatoio numero 12 è di 123 m, mentre quella al serbatoio numero 13 è di 112m.

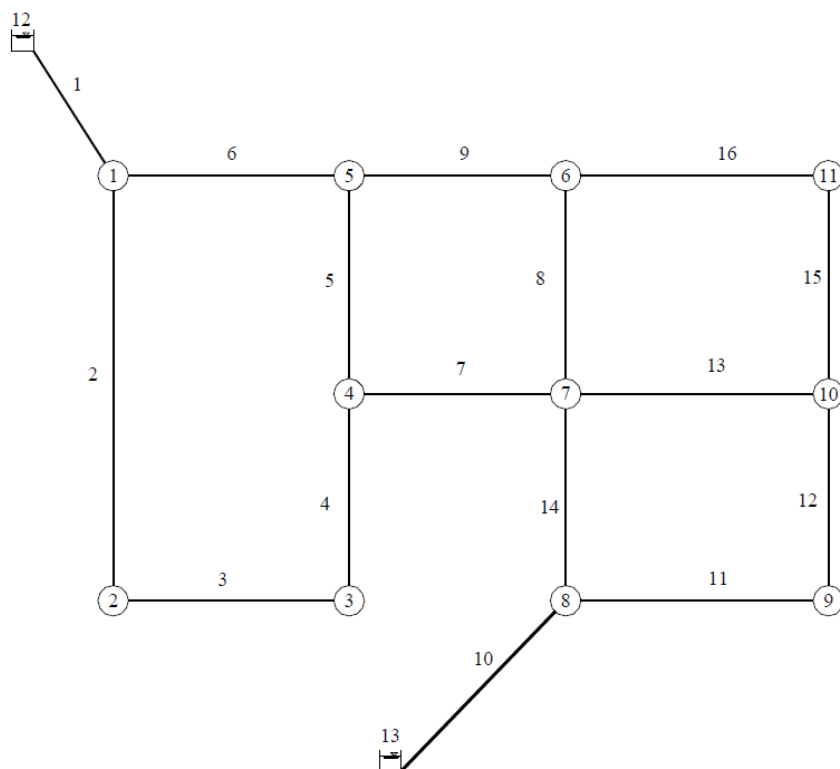


Figura 4.9 Rete proposta da Greco M. e Di Cristo C. (1999)

Nella Tabella 4-5 sono riportati i valori della lunghezza, del diametro, della scabrezza e delle portate circolanti nelle condotte della rete, mentre nella Tabella 4-6 sono indicati i valori delle portate erogate ai nodi, con i carichi corrispondenti.

Tabella 4-5 Caratteristiche geometriche e portate fluenti della rete proposta da Greco M. e Del Giudice G. (1999)

Numero condotta	Lunghezza [m]	Diametro [mm]	Scabrezza C	Scabrezza $\epsilon$ [mm]	q calcolato [l/s]
1	200	250	105	1	176.62
2	400	150	118	0.4	42.706
3	300	200	130	0.2	22.706
4	190	300	140	0.1	12.706
5	210	80	130	0.2	-4.5733
6	300	200	95	2	78.91
7	160	150	140	0.1	2.721

8	200	300	120	0.5	20.342
9	180	200	120	0.5	49.337
10	140	250	105	1	118.38
11	360	200	115	0.6	61.657
12	200	150	105	1	36.657
13	340	150	105	1	10.652
14	180	80	120	0.5	11.728
15	180	150	120	0.5	16.005
16	345	200	130	0.2	3.9951

Tabella 4-6 Portate erogate e carichi della rete proposta da Greco M. e Del Giudice G. (1999)

Numero nodo	Portata erogata [l/s]	H calcolato [m]
1	55	107.95
2	20	87.545
3	10	86.687
4	20	86.664
5	25	89.635
6	25	86.767
7	40	86.699
8	45	107.26
9	25	97.896
10	10	88.127
11	20	86.729

Dalle simulazioni, effettuate assumendo note le misure di pressione in alcuni nodi, sono stati ottenuti i risultati di Tabella 4-7.

Tabella 4-7 Sommatoria, valori minimo, massimo e medio del parametro scarto relativo, ipotizzando note misure di pressione ai nodi

misura	nodi	$\mu\varepsilon$ isomm	$\mu\varepsilon$ min	$\mu\varepsilon$ max	$\mu\varepsilon$ medio
pressione	1,9	14.52	0.006	4.078	0.908
	1, 4, 9	15.54	0.027	3.874	0.971
	1, 4, 8, 9	12.05	0.007	2.853	0.753
	1, 2, 4, 8, 9	15.37	0.001	5.824	0.961
	1, 2, 4, 7, 8, 9	9.21	0.020	3.781	0.576
	1, 2, 4, 5, 7, 8, 9	8.62	0.017	3.546	0.539

I valori delle scabrezze reali e di quelle calibrate ipotizzando note misure di pressione ai nodi sono plottati in Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15.

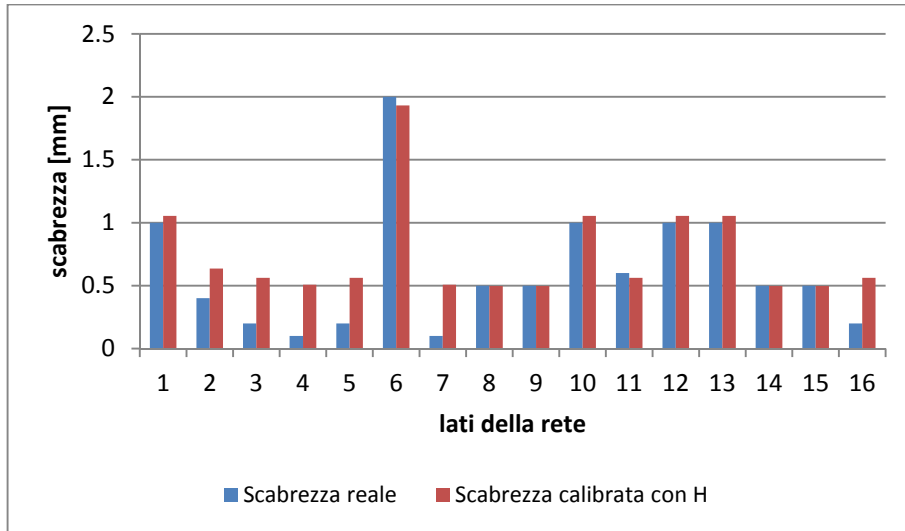


Figura 4.10 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere due misure di pressione

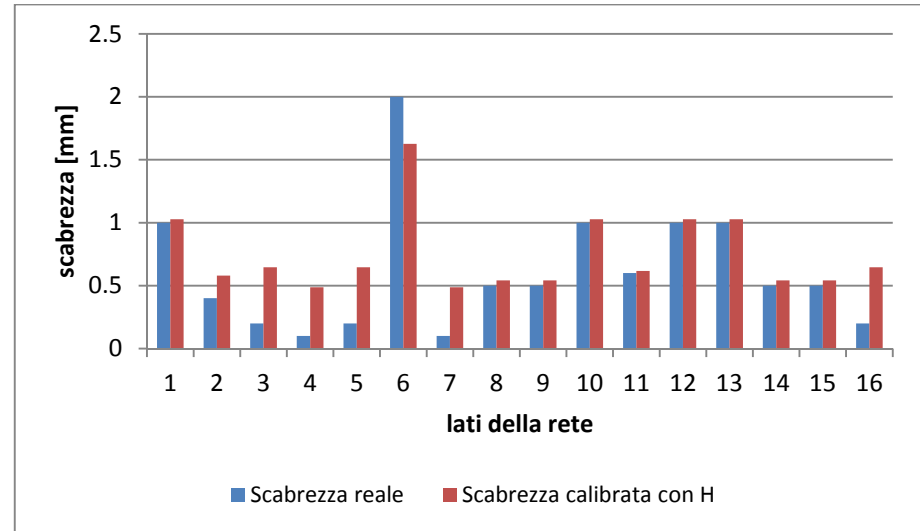


Figura 4.11 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere tre misure di pressione

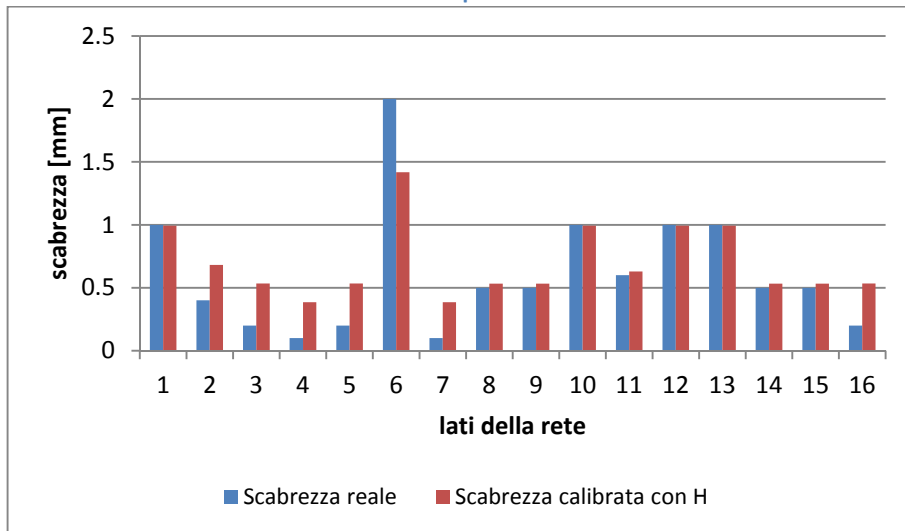


Figura 4.12 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere quattro misure di pressione

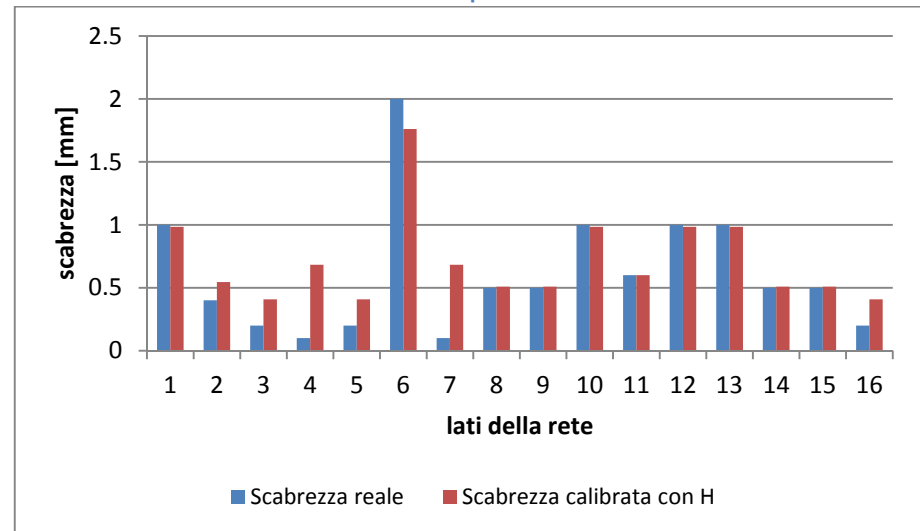


Figura 4.13 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere cinque misure di pressione

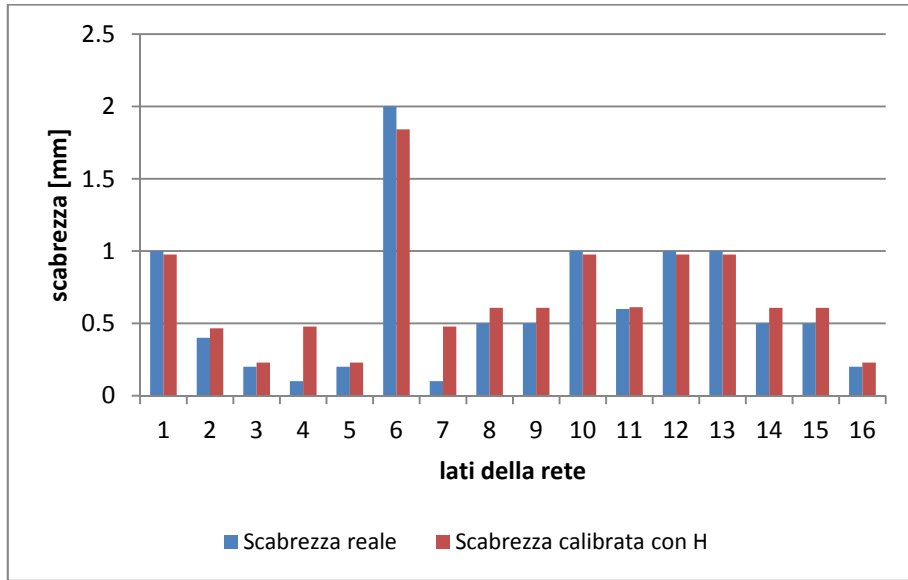


Figura 4.14 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere sei misure di pressione

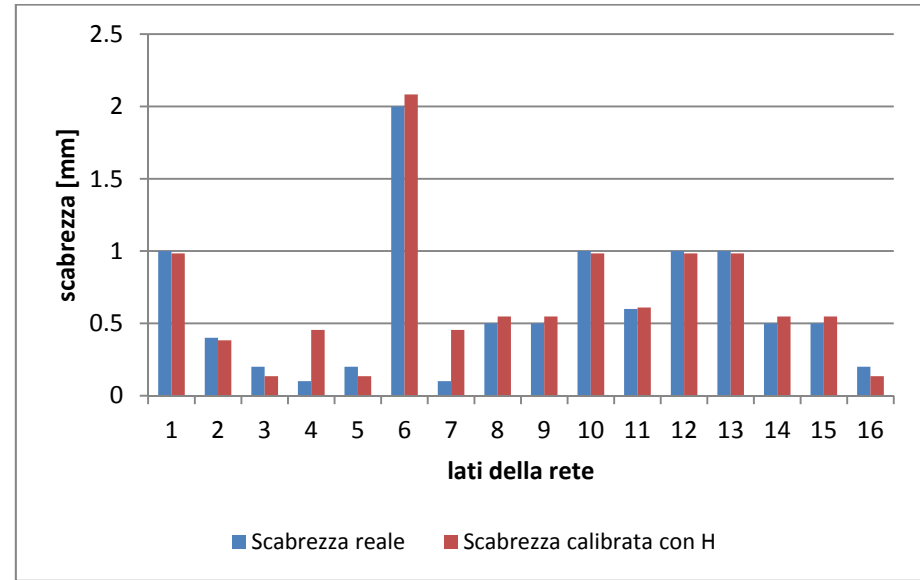


Figura 4.15 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere sette misure di pressione

L'andamento dello scarto relativo è plottato in Figura 4.16.

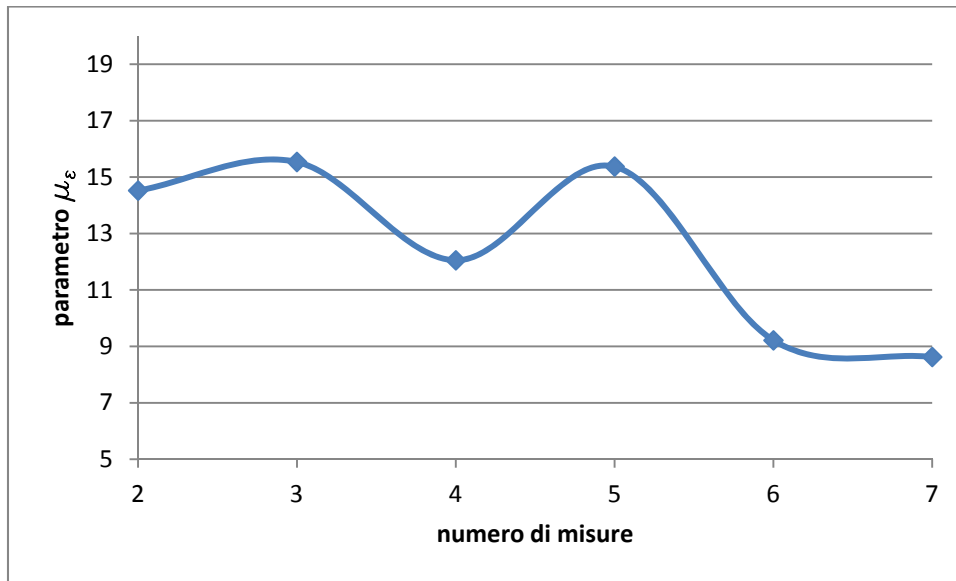


Figura 4.16 Andamento del parametro  $\mu_\varepsilon$  relativo alla rete proposta da Greco et al., ipotizzando di avere a disposizione misure di pressione ai nodi

In questo caso il modello UNINET non da soluzione quando si suppone nota la sola misura di pressione nel nodo 1 o 9, che sono i nodi prossimi alle condotte di avvicinamento. Inoltre, da Figura 4.16, si nota che lo scarto relativo mostra un andamento irregolare al crescere del numero di misuratori in rete, anche se buoni risultati si ottengono già solo con quattro misure di pressione. Nel caso in cui siano note misura di portata in condotta si ottengono gli scarti di Tabella 4-8.

Tabella 4-8 Sommatoria, valori minimo, massimo e medio del parametro scarto relativo, ipotizzando note misure di portata in condotta

misura	lati	$\mu_\varepsilon$ isomm	$\mu_\varepsilon$ min	$\mu_\varepsilon$ max	$\mu_\varepsilon$ medio
portata	6, 11	18.27	0.080433	4.3418	1.141968
	6, 7, 11	14.41	0.0358	5.2263	0.900658
	6, 7, 11, 16	17.28	0.045133	3.117	1.079719
	2, 6, 7, 11, 16	14.71	0.0518	4.1192	0.919628
	2, 6, 7, 9, 11, 16	no conv	no conv	no conv	no conv
	2, 6, 7, 9, 11, 13, 16	12.44	0.11755	4.2972	0.777268

I valori delle scabrezze reali e di quelle calibrate ipotizzando note misure di portata in condotta sono plottati in Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21. L'andamento dello scarto relativo  $\mu_\varepsilon$  è mostrato in Figura 4.22.

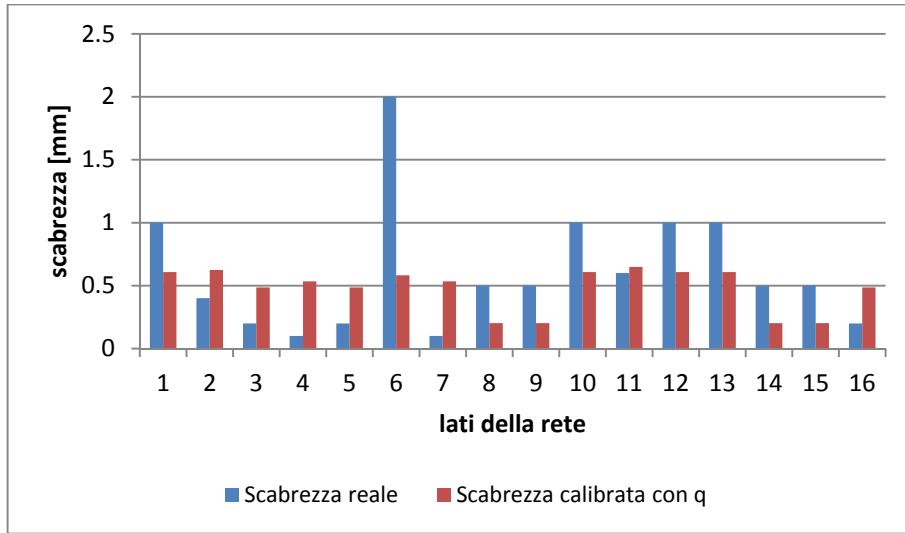


Figura 4.17 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere due misure di portata

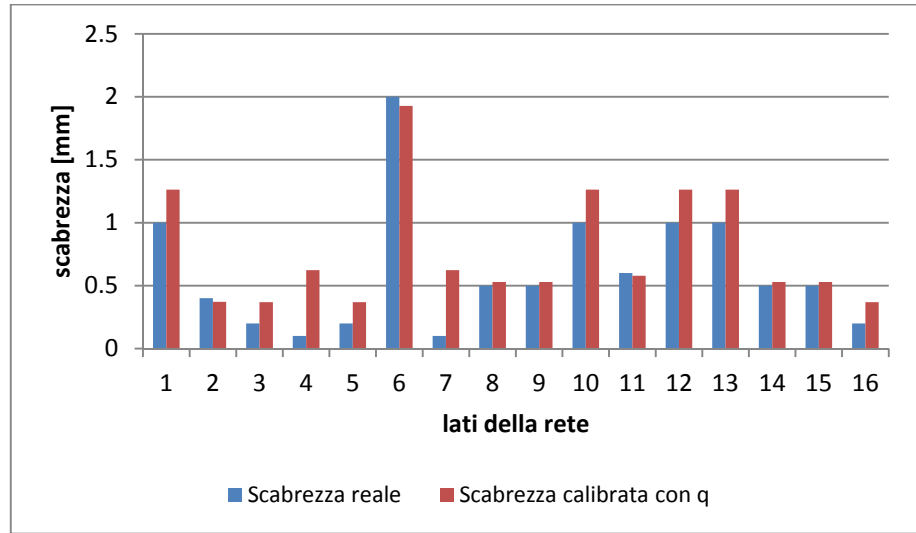


Figura 4.18 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere tre misure di portata

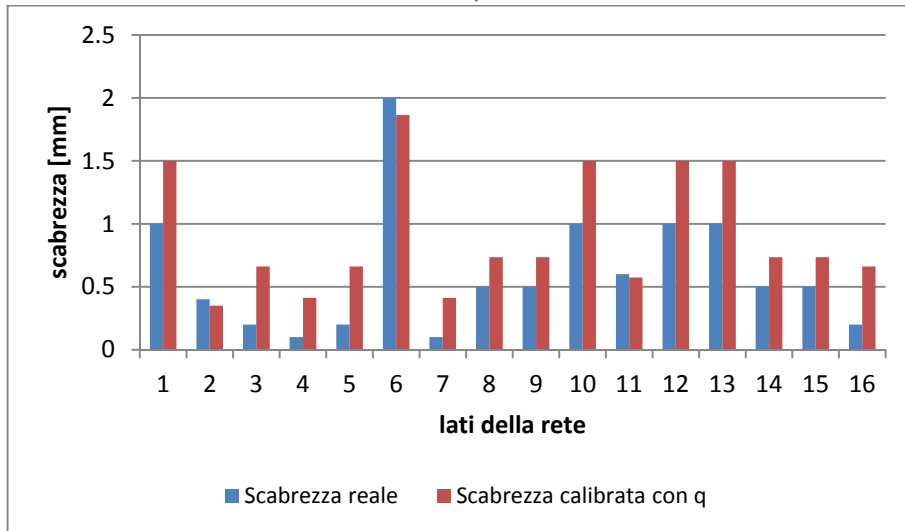


Figura 4.19 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere quattro misure di portata

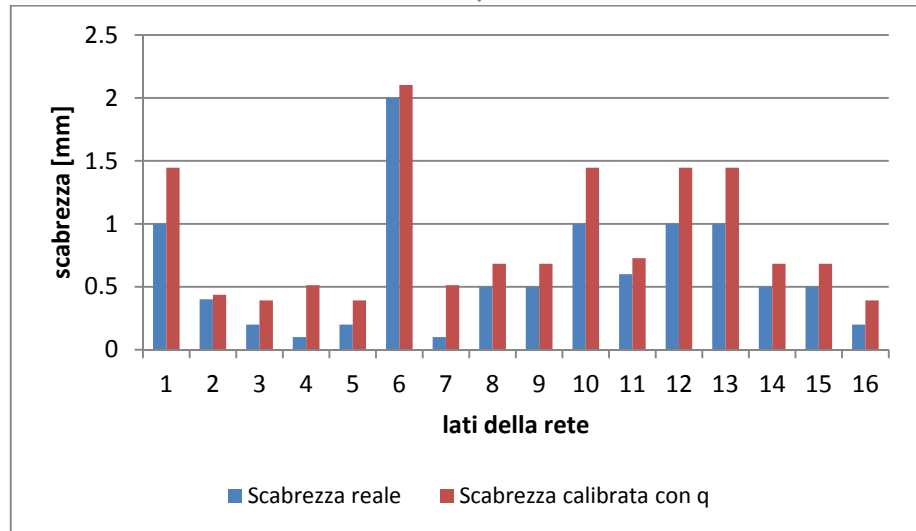


Figura 4.20 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere cinque misure di portata

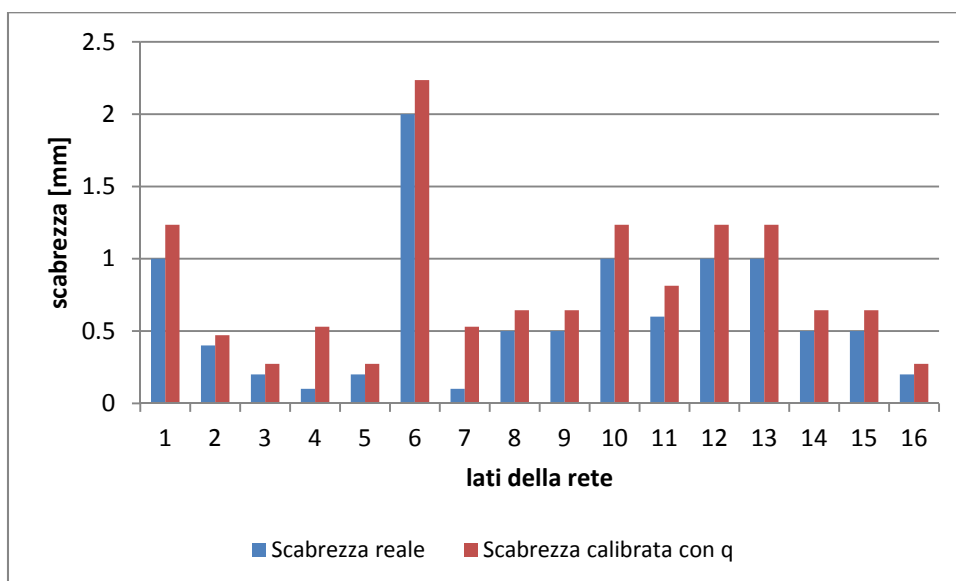


Figura 4.21 Confronto tra le scabrezze reali e quelle calibrate, ipotizzando di conoscere sette misure di portata

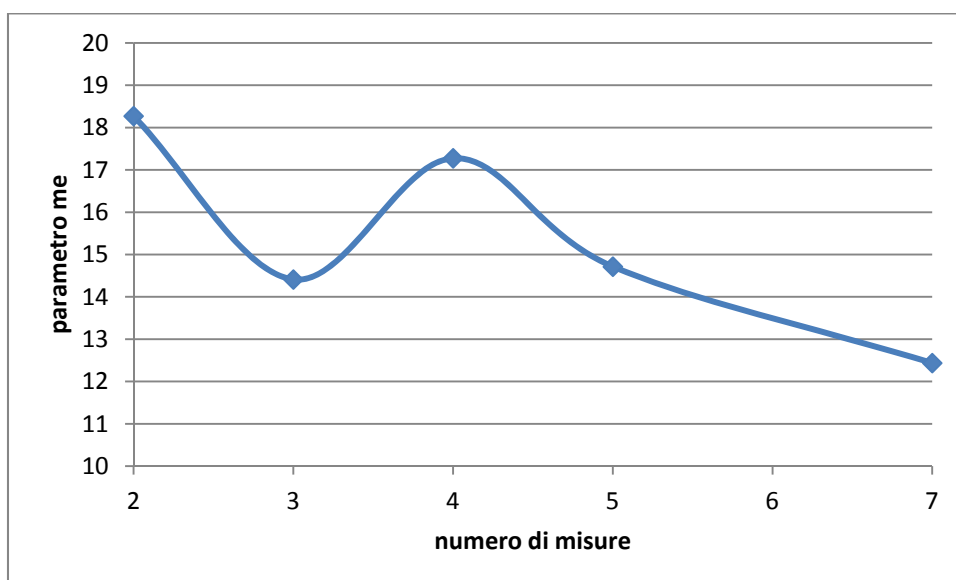


Figura 4.22 Andamento del parametro  $\mu_e$  relativo alla rete proposta da Greco et al., ipotizzando di avere a disposizione misure di portata in condotta

Anche in questo tipo di elaborazione il modello UNINET non converge per alcune tipologie di misure utilizzate, in particolare quando si calibra la rete ipotizzando nota la sola misura di portata nel lato 6 o 11, che sono i lati della rete prossimi alle condotte di avvicinamento. Tuttavia, il valore dello scarto relativo non varia di molto al variare del numero di misure in rete, infatti come evidente da Figura 4.22, potrebbero essere sufficienti cinque o addirittura tre misure di portata in condotta.

Dai risultati ottenuti, quindi dall'andamento del parametro scarto relativo, è possibile dedurre che, generalmente, al crescere delle misure in rete si ottengono calibrazioni migliori anche se tecnicamente è possibile conseguire risultati accettabili anche con un numero di misure limitato.

## 4.2 Confronto fra modelli per la scelta ottimale dei punti di misura in reti idriche ai fini della calibrazione

Volendo fornire indicazioni sul posizionamento dei punti di misura strettamente necessari per la calibrazione delle reti idriche al fine di ottenere risultati validi per il problema di verifica, è stata elaborata una procedura di analisi testata su reti di letteratura (Veltri et.al., 2012b).

Le analisi sono state condotte su tre reti di letteratura, applicando le due seguenti diverse metodologie:

- Il metodo delle matrici di sensitività (Del Giudice e Di Cristo, 2003);
- La calibrazione delle reti con il modello UNINET.

Nel primo caso, i nodi e i lati più sensibili sono stati determinati utilizzando il criterio della Max-Sum (Pudar et Ligget, 1992), già descritto nel capitolo 3; nel secondo caso, invece, le reti sono state calibrate assumendo noto, di volta in volta, il valore della misura in un lato e, di nuovo di volta in volta assumendo noto il valore della misura in un nodo. Si è così valutato quale fosse il miglior punto di misura e si è, quindi, verificato se il punto così individuato fosse lo stesso di quello ottenibile dall'utilizzo delle matrici di sensitività ovvero dove si ponesse all'interno della gerarchia che le matrici consentono di definire.

### 4.2.1 Analisi con le matrici di sensitività

#### 4.2.1.1 Analisi della rete proposta da Walski

La rete (Figura 4.23) è costituita da un nodo di alimentazione, nove condotte, sei nodi di erogazione, tre maglie chiuse elementari e un ramo aperto.

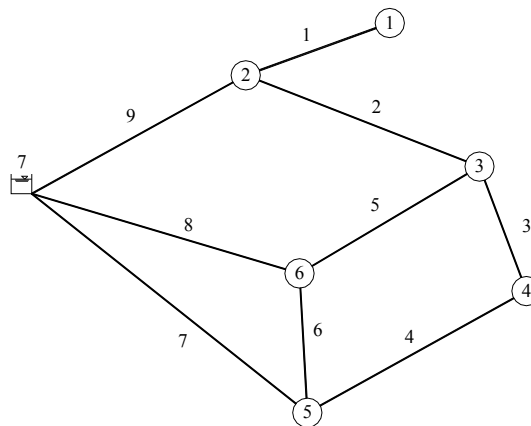


Figura 4.23 Rete proposta da Walski (1983)



I risultati, ottenuti dall'applicazione del metodo delle matrici di sensitività, sono riportati in Tabella 4-9 e in Tabella 4-10, in cui  $\Sigma_{Sh}$  e  $\Sigma_{Sq}$  sono rispettivamente le somme per riga delle matrici di sensitività relative ai nodi e ai lati. Le tabelle mostrano la gerarchia degli elementi a valori decrescenti di  $\Sigma_{Sh}$  e  $\Sigma_{Sq}$ .

**Tabella 4-9 Risultati ottenuti per i carichi ai nodi con: A) scabrezza decrementata del 10%; B) scabrezza incrementata del 10%**

A) Nodo	$\Sigma_{Sh}$	B) Nodo	$\Sigma_{Sh}$
1	0.16168	1	0.134422
3	0.121584	4	0.102998
4	0.119495	3	0.100063
5	0.118119	6	0.099056
6	0.116569	5	0.096428
2	0.115367	2	0.096077

**Tabella 4-10 Risultati ottenuti per le portate circolanti nei lati con: A) scabrezza decrementata del 10%; B) scabrezza incrementata del 10%**

A) Lato	$\Sigma_{Sq}$	B) Lato	$\Sigma_{Sq}$
8	1.546066	8	1.356952
2	1.241175	9	1.090435
9	1.222762	2	1.079145
5	1.07309	5	0.921964
6	1.021462	6	0.904458
7	0.898854	7	0.808571
3	0.785649	3	0.669772
4	0.785649	4	0.664772
1	0	1	0

Il risultato dell'analisi mostra che in riferimento alla variazione del valore di scabrezza il nodo più sensibile è il nodo 1, mentre il lato più sensibile è il lato 8.

#### **4.2.1.2 La rete proposta da Greco e Di Cristo**

La rete (Figura 4.24) è costituita da quattro maglie chiuse elementari, due nodi di alimentazione, undici nodi di erogazione e sedici condotte.

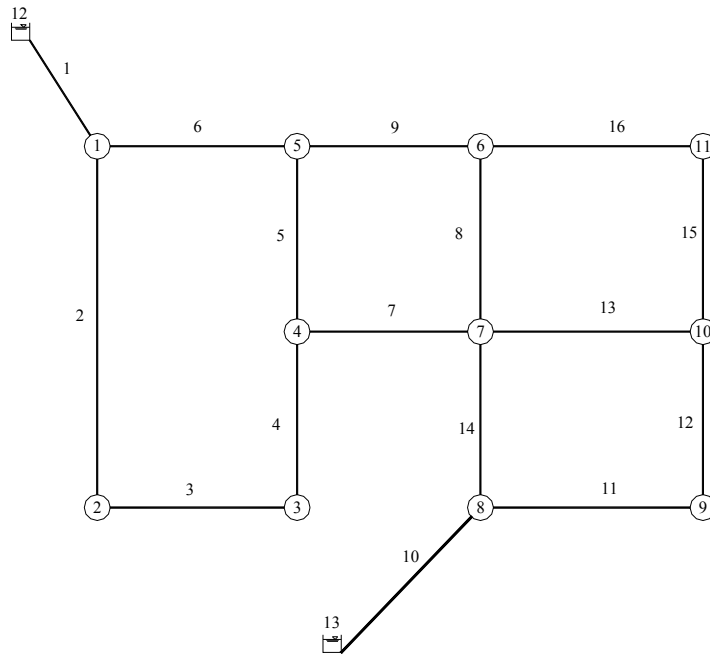


Figura 4.24 Rete proposta da Greco M. e Di Cristo C. (1999)

Applicando anche in questo caso il metodo delle matrici di sensitività, sono stati ottenuti i risultati riportati in Tabella 4-11 e in Tabella 4-12.

Tabella 4-11 Risultati ottenuti per i carichi ai nodi con: A) scabrezza decrementata del 10%; B) scabrezza incrementata del 10%

A)	Nodo	$\Sigma_{Sh}$	B)	Nodo	$\Sigma_{Sh}$
	5	0.562461		5	0.468376
	3	0.554218		2	0.458162
	2	0.554192		6	0.45203
	11	0.546272		4	0.451371
	4	0.545527		7	0.45047
	6	0.544916		11	0.44529
	7	0.544561		3	0.445263
	10	0.532223		10	0.440536
	9	0.374259		9	0.310741
	1	0.32337		1	0.264879
	8	0.140859		8	0.112408

Tabella 4-12 Risultati ottenuti per le portate circolanti nei lati con: A) scabrezza decrementata del 10%; B) scabrezza incrementata del 10%

A)	Lato	$\Sigma_{Sd}$	B)	Lato	$\Sigma_{Sd}$
	6	0.992892		6	0.850971
	9	0.967238		9	0.833465
	1	0.924788		10	0.777751
	10	0.924788		1	0.777751
	11	0.804374		8	0.682647
	12	0.804374		11	0.671764

8	0.764691	12	0.671764
7	0.704641	7	0.621066
3	0.671051	2	0.591024
2	0.671051	4	0.591024
4	0.671051	3	0.591024
16	0.572271	16	0.488134
15	0.572271	15	0.488134
13	0.431218	13	0.369962
14	0.282557	14	0.25209
5	0.147367	5	0.12924

In questo caso, i nodi e i lati più sensibili sono, rispettivamente, il nodo 5 e il lato 6.

#### 4.2.1.3 La rete proposta da Komsı

Analoghe simulazioni sono state svolte per la rete di letteratura proposta da Komsı ripresa da Ardenti et al. (2007), schematicamente riportata di seguito in Figura 4.25.

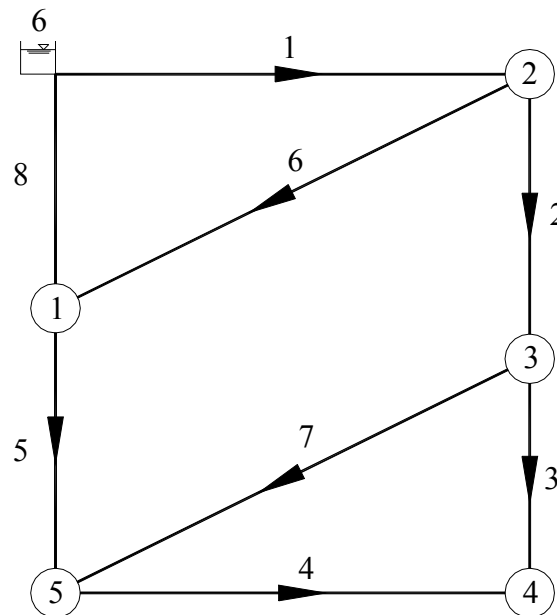


Figura 4.25 Rete proposta da Komsı e ripresa da Ardenti et al. (2007)

La quota piezometrica al nodo di alimentazione (nodo numero 6) è di 200 m, e i diametri delle condotte, tutte di lunghezza 1000 m, sono riportati in Tabella 4-13.

Tabella 4-13 Caratteristiche geometriche della rete

Numero condotta	Diametro (mm)	Numero condotta	Diametro (mm)
1	250	5	200
2	250	6	150
3	100	7	150
4	200	8	300

La rete è caratterizzata da un' unica classe di scabrezza di valore 0.20 mm e si è ipotizzato l'esclusione, per fuori servizio, della condotta numero 8.

Nella Tabella 4-14 e nella Tabella 4-15, sono riportati i valori delle quote piezometriche (H) e delle portate erogate ai nodi (Q), delle portate circolanti in condotta (q) e delle perdite di carico (h).

**Tabella 4-14 Caratteristiche idrauliche dei nodi della rete**

Numero nodo	H (m)	Q erogata (l/s)
1	169.6149	0.00
2	183.0094	20.00
3	177.2878	29.28
4	163.1845	32.96
5	166.5513	19.83

**Tabella 4-15 Caratteristiche idrauliche dei lati della rete**

Numero condotta	Verso della portata		q (l/s)	h (m)
	Dal nodo	Al nodo		
1	6	2	102.0683	16.99058
2	2	3	58.54152	5.721588
3	3	4	8.259175	14.10337
4	5	4	24.70686	3.366805
5	1	5	23.52676	3.063682
6	2	1	23.52676	13.39447
7	3	5	21.00317	10.73657
8	fuori servizio			

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 4-16 e Tabella 4-17, ricavando i nodi e i lati più sensibili, che sono, rispettivamente, i nodi 1 e 4 e il lato 7.

**Tabella 4-16 Risultati ottenuti per i carichi ai nodi con: A) scabrezza decrementata del 10%; B) scabrezza incrementata del 10%**

<p>A)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nodo</th> <th><math>\Sigma_{Sh}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.134667</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.114667</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.107444</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.037111</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.024</td> </tr> </tbody> </table>	Nodo	$\Sigma_{Sh}$	1	0.134667	4	0.114667	5	0.107444	3	0.037111	2	0.024	<p>B)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nodo</th> <th><math>\Sigma_{Sh}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4</td> <td>0.128111</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0.093</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.092667</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.031778</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.017333</td> </tr> </tbody> </table>	Nodo	$\Sigma_{Sh}$	4	0.128111	1	0.093	5	0.092667	3	0.031778	2	0.017333
Nodo	$\Sigma_{Sh}$																								
1	0.134667																								
4	0.114667																								
5	0.107444																								
3	0.037111																								
2	0.024																								
Nodo	$\Sigma_{Sh}$																								
4	0.128111																								
1	0.093																								
5	0.092667																								
3	0.031778																								
2	0.017333																								

**Tabella 4-17 Risultati ottenuti per le portate circolanti nei lati con: A) scabrezza decrementata del 10%; B) scabrezza incrementata del 10%**

<p>A)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Lato</th> <th><math>\Sigma_{Sq}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>0.110889</td> </tr> </tbody> </table>	Lato	$\Sigma_{Sq}$	7	0.110889	<p>B)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Lato</th> <th><math>\Sigma_{Sq}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>0.100778</td> </tr> </tbody> </table>	Lato	$\Sigma_{Sq}$	7	0.100778
Lato	$\Sigma_{Sq}$								
7	0.110889								
Lato	$\Sigma_{Sq}$								
7	0.100778								

5	0.109889
6	0.109889
2	0.109889
3	0.071667
4	0.071667
1	0

5	0.097111
6	0.097111
2	0.097111
3	0.063556
4	0.063556
1	0

#### 4.2.2 Analisi con la calibrazione in UNINET

La valutazione dei lati e dei nodi più sensibili al variare della scabrezza lungo i lati è stata effettuata in un secondo tempo con il modello di calibrazione UNINET, ipotizzando di conoscere una sola misura di pressione in un nodo e successivamente una sola misura di portata in condotta.

In questo modo, si è proceduto alla calibrazione delle scabrezze delle condotte delle tre reti di letteratura.

Il modello, che dal punto di vista computazionale è oneroso, consente di valutare l'affidabilità della scelta attraverso il parametro  $\mu_\epsilon$ , definito come la misura dello scarto tra la grandezza calcolata e il valore reale.

##### 4.2.2.1 La rete proposta da Walski

I risultati ottenuti, in termini di scarti  $\mu_\epsilon$ , consentono di individuare la gerarchia di nodi e lati nei quali effettuare la misura, secondo quanto riportato in Tabella 4-18.

Tabella 4-18 Risultati ottenuti: A) Nodi sensibili; B) Lati sensibili

A) <i>Nodo</i>	$\mu_\epsilon$	B) <i>Lato</i>	$\mu_\epsilon$
3	2.8625	1	5.6202
4	2.9841	9	34.115
1	3.2684	3	58.342
5	4.4129	6	80.487
2	5.3827	8	85.582
6	105.76	4	113.82
		7	136.34
		2	164.88
		5	176.46

##### 4.2.2.2 La rete proposta da Greco e Di Cristo

In maniera analoga, per la rete proposta da Greco e Di Cristo, la gerarchia dei nodi e dei lati sensibili della rete è quella riportata in Tabella 4-19.

Tabella 4-19 Risultati ottenuti: A) Nodi sensibili; B) Lati sensibili

A) <i>Nodo</i>	$\mu_\epsilon$	B) <i>Lato</i>	$\mu_\epsilon$
1	5.504	7	9.595
8	5.579	10	19.444
6	5.978	3	20.079

3	5.997	4	24.562
5	6.466	2	25.559
2	6.499	1	27.90
10	8.734	15	28.723
7	12.717	12	34.728
4	29.886	5	35.375
11	114.56	16	37.467
9	211.48	14	38.416
		8	44.103
		11	50.631
		9	67.55
		6	72.901
		13	84.543

#### 4.2.2.3 La rete proposta da Komsì

Per la rete proposta da Komsì si ottengono i risultati di Tabella 4-20.

Tabella 4-20 Risultati ottenuti: A) Nodi sensibili; B) Lati sensibili

A)	Nodo	$\mu\epsilon$	B)	Lato	$\mu\epsilon$
	4	2.673		1	4.120
	2	4.534		4	5.417
	3	4.817		7	5.417
	5	5.538		2	5.547
	1	5.540		3	7.964
				5	41.389
				6	41.389

#### 4.2.3 Confronto dei risultati

Riguardo la rete di Walski si nota che il nodo 1, che è il più sensibile con l'analisi delle matrici di sensitività, è uno tra quelli più sensibili anche calibrando la rete in UNINET, mentre meno evidente è il risultato ottenuto facendo riferimento ad un'analisi utilizzando i lati (Tabella 4-21 e Tabella 4-22).

Tabella 4-21 Risultati ottenuti da: A) matrici di sensitività; B) UNINET

A)	Nodo	$\Sigma_{Sh}$	B)	Nodo	$\mu\epsilon$
	1	0.16168		3	2.8625
	3	0.121584		4	2.9841
	4	0.119495		1	3.2684
	5	0.118119		5	4.4129
	6	0.116569		2	5.3827
	2	0.115367		6	105.76

Tabella 4-22 Risultati ottenuti da: A) matrici di sensitività; B) UNINET

A)	Lato	$\Sigma_{Sd}$	B)	Lato	$\mu\epsilon$
	8	1.546066		1	5.6202
	2	1.241175		9	34.115
	9	1.222762		3	58.342

5	1.07309	6	80.487
6	1.021462	8	85.582
7	0.898854	4	113.82
3	0.785649	7	136.34
4	0.785649	2	164.88
1	0	5	176.46

Per quanto riguarda la rete di Greco e Di Cristo , non possono essere individuate corrispondenze nell'applicazione dei due metodi, degne di essere menzionate (Tabella 4-23 e Tabella 4-24).

Tabella 4-23 Risultati ottenuti da: A) matrici di sensitività; B) UNINET

A) Nodo	$\Sigma_{Sh}$	B) Nodo	$\mu\epsilon$
5	0.562461	1	5.504
3	0.554218	8	5.579
2	0.554192	6	5.978
11	0.546272	3	5.997
4	0.545527	5	6.466
6	0.544916	2	6.499
7	0.544561	10	8.734
10	0.532223	7	12.717
9	0.374259	4	29.886
1	0.32337	11	114.56
8	0.140859	9	211.48

Tabella 4-24 Risultati ottenuti da: A) matrici di sensitività; B) UNINET

A) Lato	$\Sigma_{Sa}$	B) Lato	$\mu\epsilon$
6	0.992892	7	9.595
9	0.967238	10	19.444
1	0.924788	3	20.079
10	0.924788	4	24.562
11	0.804374	2	25.559
12	0.804374	1	27.90
8	0.764691	15	28.723
7	0.704641	12	34.728
3	0.671051	5	35.375
2	0.671051	16	37.467
4	0.671051	14	38.416
16	0.572271	8	44.103
15	0.572271	11	50.631
13	0.431218	9	67.55
14	0.282557	6	72.901
5	0.147367	13	84.543

Nel caso della rete proposta da Komsi si ottengono risultati simili, in termini qualitativi, a quelli della rete proposta da Walski, ossia valori migliori se si considerano i nodi e meno affidabili quando si faccia riferimento ai lati (Tabella 4-25 e Tabella 4-26).

Tabella 4-25 Risultati relativi ai nodi ottenuti da: A) matrici di sensitività; B) UNINET

A) Nodo	$\Sigma_{Sh}$	B) Nodo	$\mu\epsilon$
1	0.134667	4	2.673
4	0.114667	2	4.534
5	0.107444	3	4.817
3	0.037111	5	5.538
2	0.024	1	5.540

Tabella 4-26 Risultati ottenuti da: A) matrici di sensitività; B) UNINET

A) Lato	$\Sigma_{Sa}$	B) Lato	$\mu\epsilon$
7	0.110889	1	4.120
5	0.109889	4	5.417
6	0.109889	7	5.417
2	0.109889	2	5.547
3	0.071667	3	7.964
4	0.071667	5	41.389
1	0	6	41.389

In riferimento alla determinazione dei nodi e dei lati sensibili, l'utilizzo delle matrici di sensitività, unito al modello di calibrazione UNINET, consente di ottenere buoni risultati.

Si può affermare che il metodo delle matrici di sensitività, anche se più approssimato rispetto al modello di simulazione, risulta un buon metodo per una rapida determinazione dei punti in cui posizionare gli strumenti di misura, non richiedendo un costo computazionale elevato.

#### 4.3 Metodologia in UNINET per la ricerca perdite in reti idriche

Uno dei possibili utilizzi del modello UNINET riguarda la ricerca delle perdite nelle reti. La linea guida che ha ispirato questo filone di ricerca è la seguente:

- 1) La rete originaria viene modificata inserendo di volta in volta in ciascun ramo un nodo fittizio, con cui si vuole simulare la perdita nel lato in cui è inserito.
- 2) Con questo schema e attribuendo al nodo fittizio una portata erogata pari alla perdita ipotizzata nel lato, si verifica la rete, ricavando i valori calcolati di pressioni ai nodi e di portata in condotta, ipotizzando un unico valore di scabrezza per tutta la rete.
- 3) Sempre utilizzando lo schema di rete appena citato, si procede alla calibrazione delle scabrezze, inserendo nel nodo fittizio una portata erogata di valore nullo.



Questa metodologia è stata applicata su le due seguenti reti di letteratura:

- La rete proposta da Walski (1983);
- La rete proposta da Komsı.

#### **4.3.1 Elaborazioni sulla rete proposta da Walski**

Sono state esaminate nove diverse configurazioni di rete, posizionando, di volta in volta, il nodo fittizio in tutti i lati della rete (Figura 4.26, Figura 4.27, Figura 4.28, Figura 4.29, Figura 4.30, Figura 4.31, Figura 4.32, Figura 4.33 e Figura 4.34).

È stata ipotizzata una perdita di 10 l/s, nel lato in cui viene inserito il nodo fittizio, e la verifica della rete è stata condotta in condizioni DDA (Demand Driven Analysis). La procedura di calibrazione è avvenuta ipotizzando un'unica classe di scabrezza per tutta la rete e ipotizzando nota la misura di portata nel lato numero 2. I risultati ottenuti dalle elaborazioni sulle configurazioni sopra mostrate sono riportati in Tabella 4-27 e plottati in Figura 4.36.

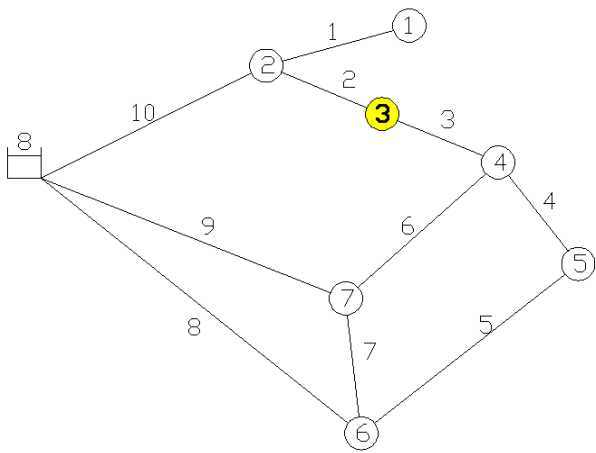


Figura 4.26 Configurazione "a"

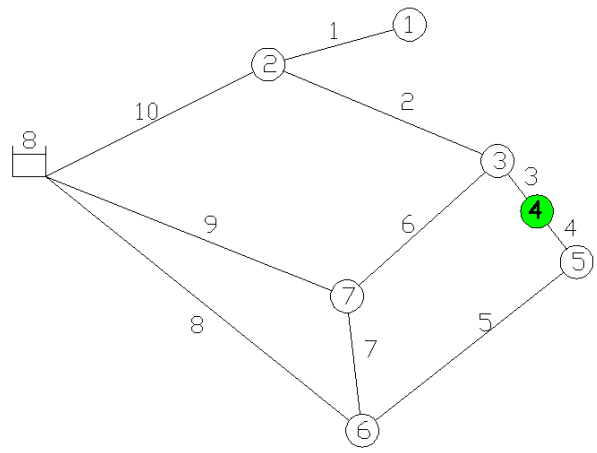


Figura 4.27 Configurazione "b"

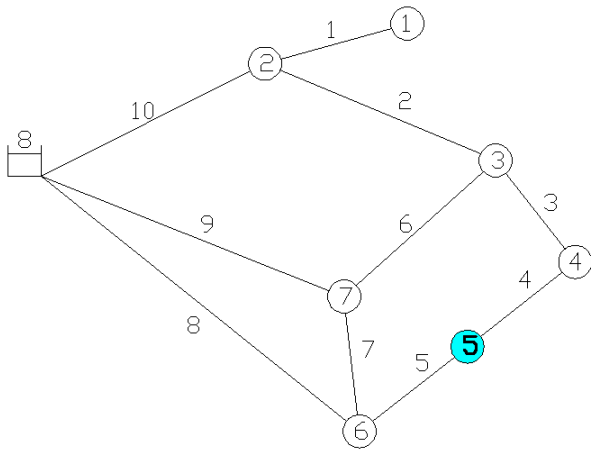


Figura 4.28 Configurazione "c"

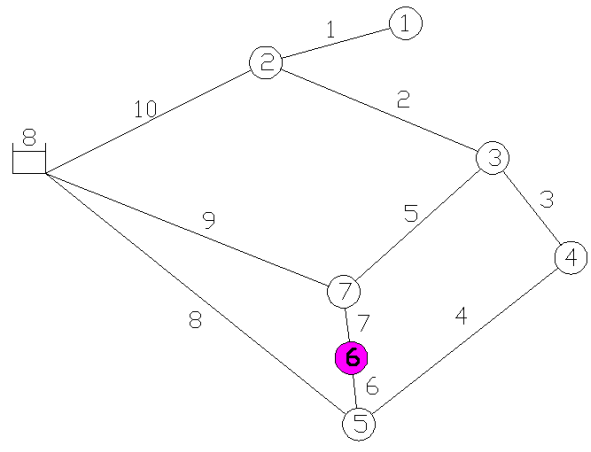


Figura 4.29 Configurazione "d"

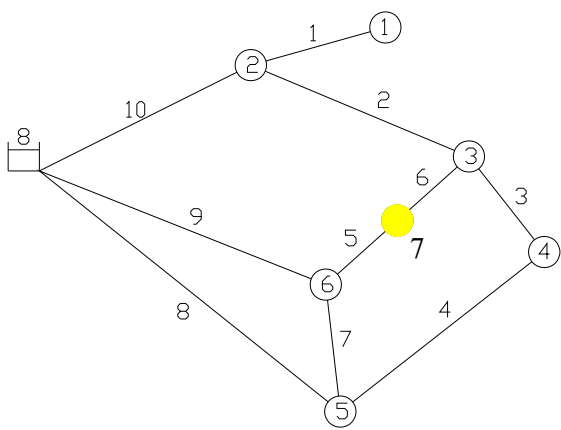


Figura 4.30 Configurazione "e"

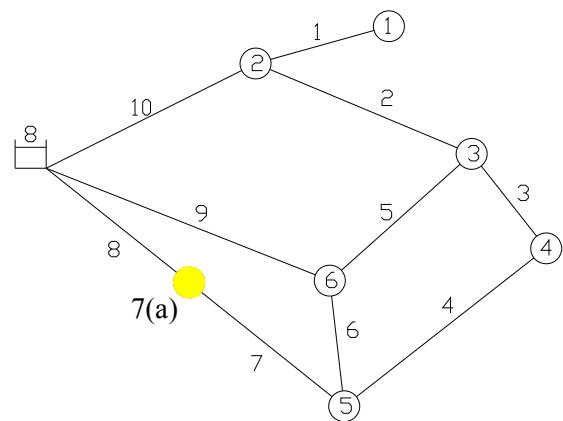


Figura 4.31 Configurazione "f"

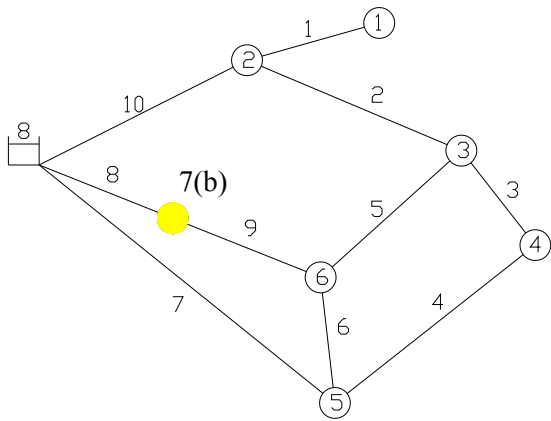


Figura 4.32 Configurazione "g"

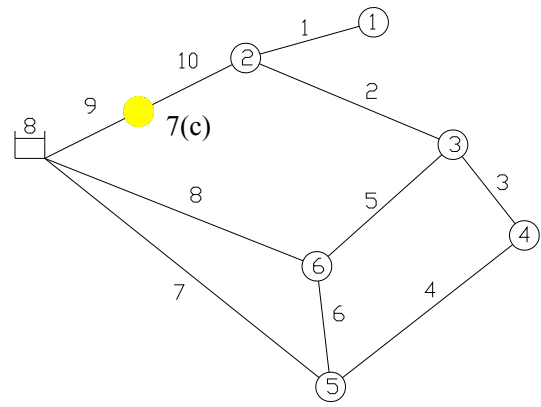


Figura 4.33 Configurazione "h"

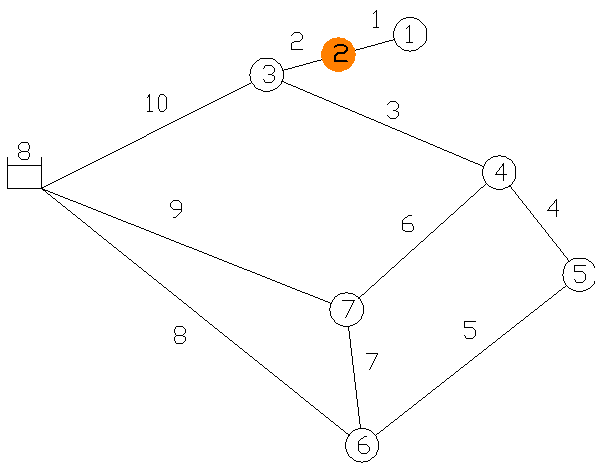


Figura 4.34 Configurazione "i"

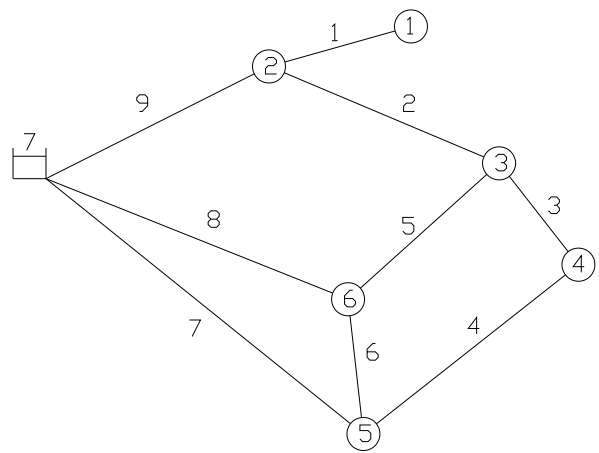


Figura 4.35 Configurazione "l"

Tabella 4-27 Risultati in termini di scabrezza calcolata e scarto medio relativo

Configurazione	q nel lato 2 [l/s]	Classi di scabrezza della rete	Scabrezza ipotizzata [mm]	Scabrezza calcolata [mm]	scarto medio relativo
a	29.08	1	1	2.93	193.00%
b	28.39		1	2.94	194.00%
c	28.02		1	2.98	198.00%
d	27.57		1	2.91	191.00%
e	27.94		1	2.98	198.00%
f	26.57		1	2.93	193.00%
g	26.32		1	2.94	194.00%
h	71.32		1	2.98	198.00%
i	35.24		1	1.46	46.00%
l	25.27		1	1.08	8.00%

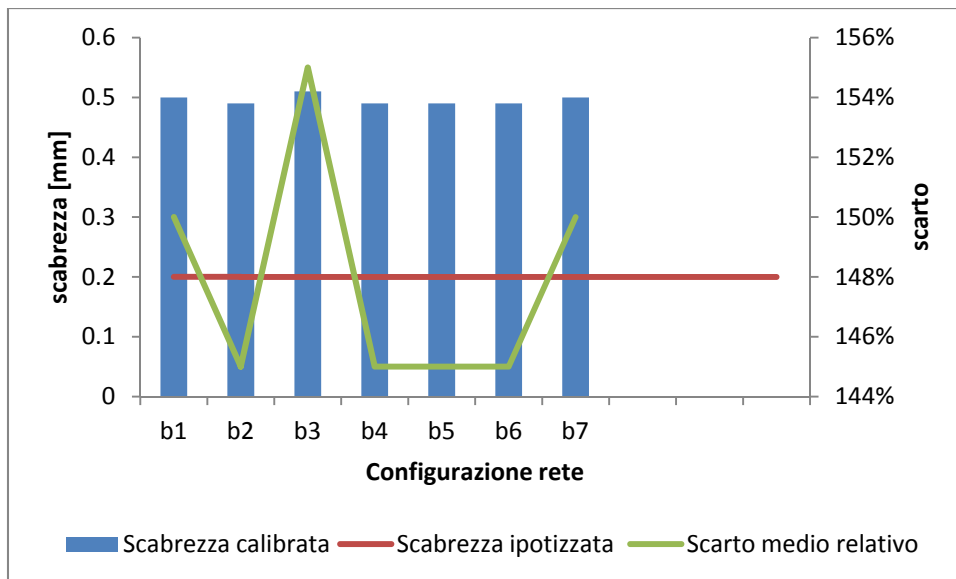


Figura 4.36 Scabrezza calibrata VS scabrezza ipotizzata e scarto

I risultati mostrano una sensibilità del modello a valutare l'anomala circolazione di portata nella rete e, nell'analisi, il valore di scabrezza calcolato per le configurazioni che presentano perdite in rete, ha valori circa tre volte superiori al valore ipotizzato, eccetto un caso; si nota infatti che, quando la perdita è posizionata lungo il ramo isolato la scabrezza calcolata è più vicina a quella ipotizzata. D'altra parte il modello dimostra di rispondere bene alla calibrazione della rete, in quanto nella configurazione "I", che non prevede perdite in rete, il valore della scabrezza calcolata è molto prossimo a quello ipotizzato.

#### 4.3.2 Elaborazioni sulla rete proposta da Komsì

Sono state esaminate diverse configurazioni di possibili perdite nella rete di Komsì, spostando, di volta in volta, il nodo fittizio in tutti i lati della rete e calibrando le scabrezze, ipotizzando nota, di caso in caso, una misura di portata in condotta, per tutti i rami della rete.

##### 4.3.2.1 Analisi dello scenario "a"

È stata ipotizzata una perdita di 0.5 l/s, nel lato in cui viene inserito il nodo fittizio, e la verifica della rete è stata condotta in condizioni DDA (Demand Driven Analysis). La procedura di calibrazione è avvenuta ipotizzando un'unica classe di scabrezza per tutta la rete, ipotizzando nota la misura di portata nel lato numero 7, ramo che cambia collocazione all'interno della rete al variare delle diverse configurazioni analizzate (Figura 4.37, Figura 4.38, Figura 4.39, Figura 4.40, Figura 4.41, Figura 4.42 e Figura 4.43).

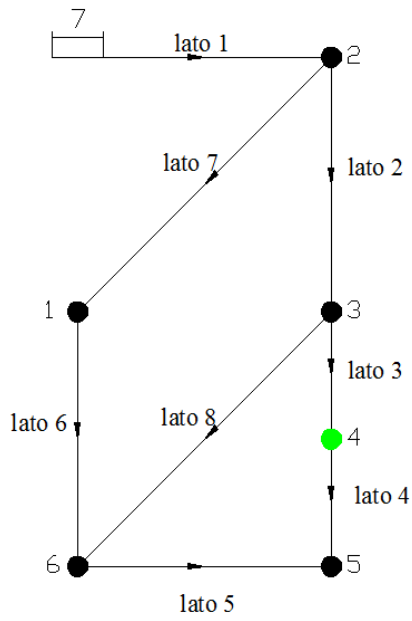


Figura 4.37 Configurazione "a1"

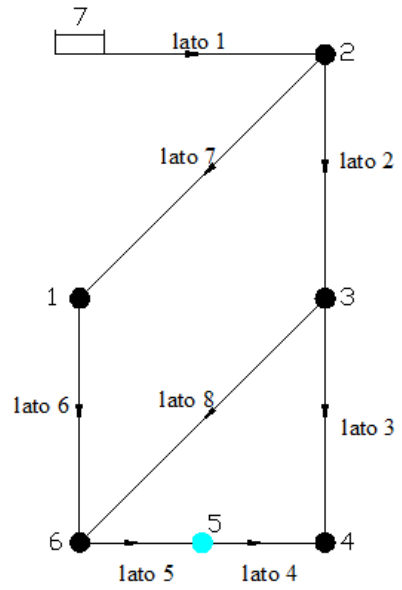


Figura 4.38 Configurazione "a2"

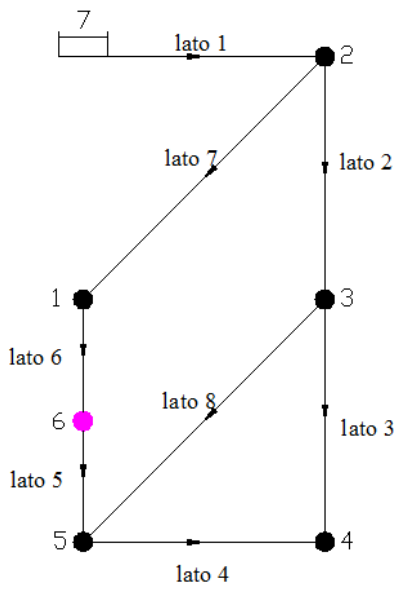


Figura 4.39 Configurazione "a3"

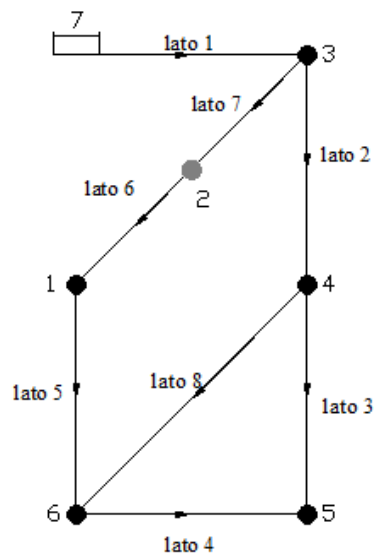


Figura 4.40 Configurazione "a4"

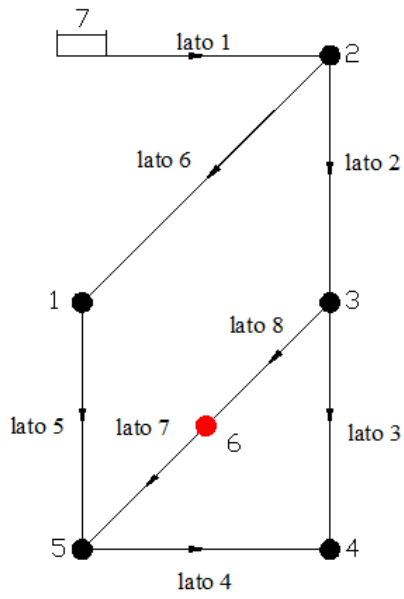


Figura 4.41 Configurazione "a5"

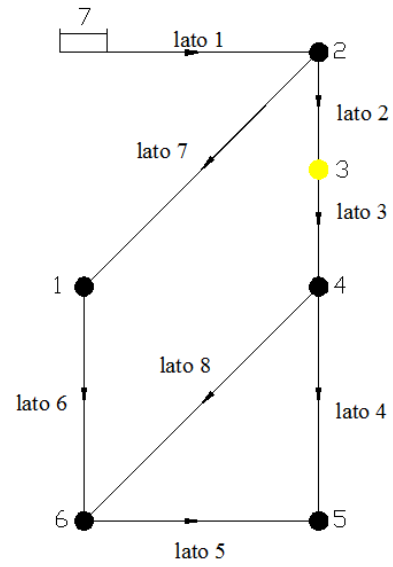


Figura 4.42 Configurazione "a6"

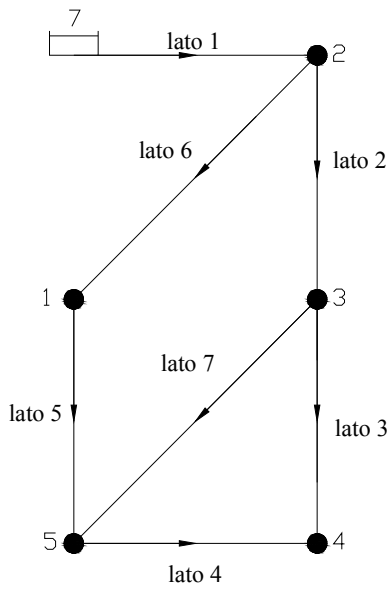


Figura 4.43 Configurazione "a7"

I risultati ottenuti dalle elaborazioni sulle configurazioni sopra mostrate sono riportati in Tabella 4-28 e plottati in Figura 4.44.

Tabella 4-28 Risultati in termini di scabrezza calcolata e scarto medio relativo

Configurazione	q nel lato 7 [l/s]	Classi di scabrezza della rete	Scabrezza ipotizzata [mm]	Scabrezza calcolata [mm]	scarto medio relativo
a1	9.33	1	0.2	0.47	135.00%
a2	9.41		0.2	0.49	145.00%
a3	9.45		0.2	0.5	150.00%
a4	9.59		0.2	0.51	155.00%
a5	6.09		0.2	no convergenza	
a6	9.22		0.2	0.46	130.00%
a7	9.2		0.2	0.005	97.50%

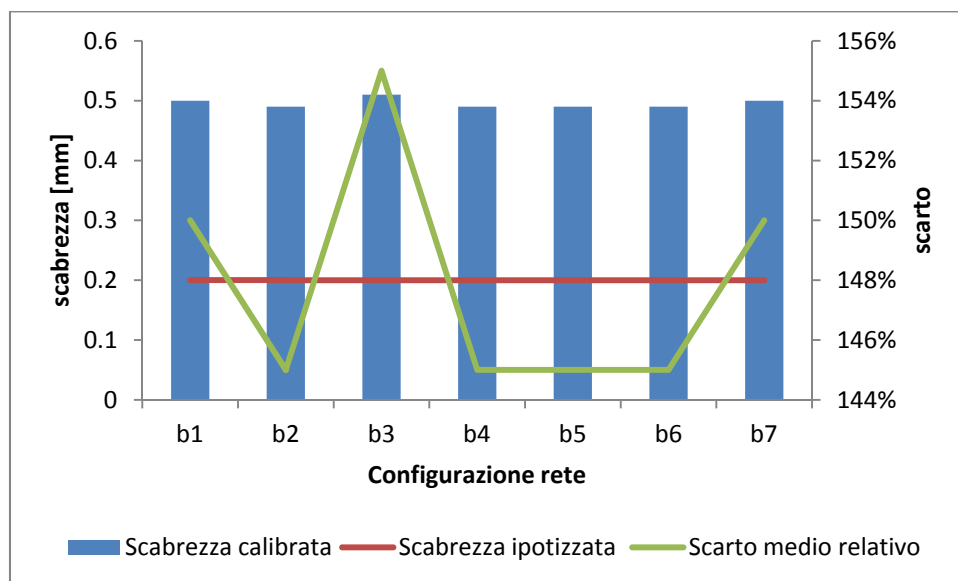


Figura 4.44 Scabrezza calibrata VS scabrezza ipotizzata e scarto

#### 4.3.2.2 Analisi dello scenario "b"

È stata ipotizzata una perdita di 0.5 l/s, nel lato in cui viene inserito il nodo fittizio, e la verifica della rete è stata condotta in condizioni DDA (Demand Driven Analysis). La procedura di calibrazione è avvenuta ipotizzando un'unica classe di scabrezza per tutta la rete e assumendo nota la misura di portata nel lato numero 1 (Figura 4.45, Figura 4.46, Figura 4.47, Figura 4.48, Figura 4.49, Figura 4.50 e Figura 4.51).

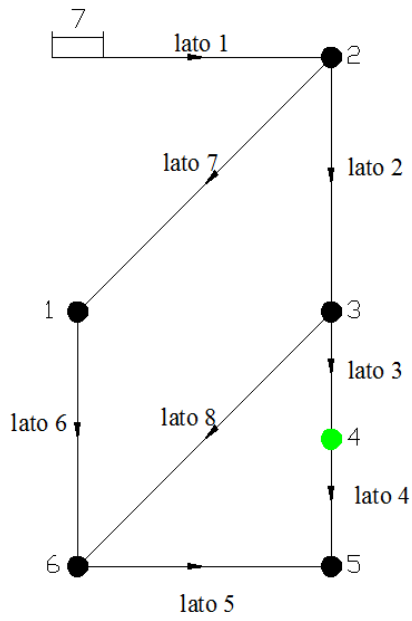


Figura 4.45 Configurazione "b1"

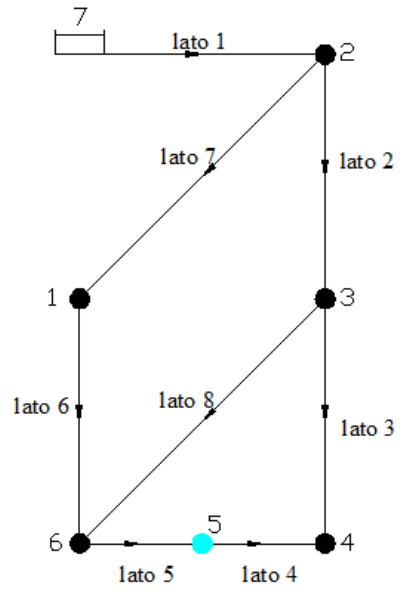


Figura 4.46 Configurazione "b2"

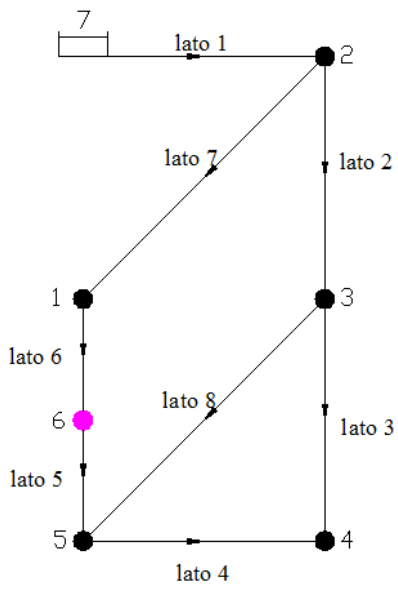


Figura 4.47 Configurazione "b3"

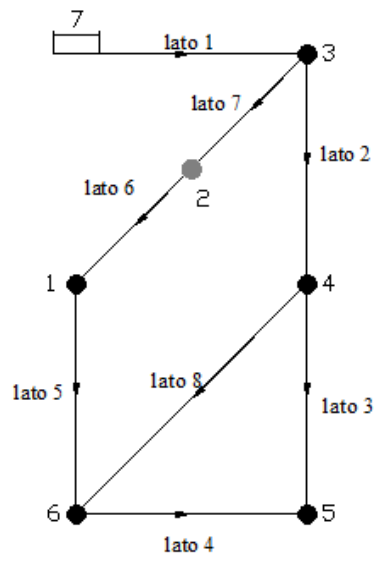


Figura 4.48 Configurazione "b4"



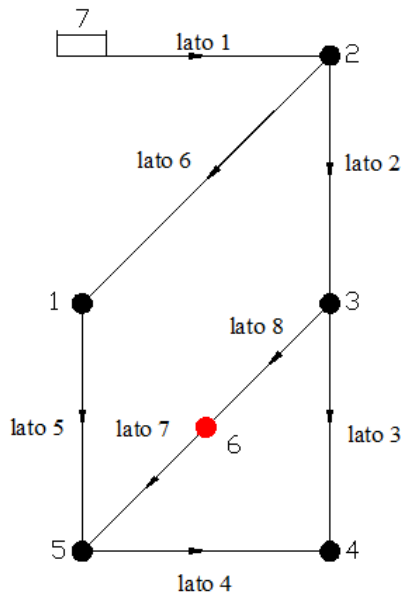


Figura 4.49 Configurazione "b5"

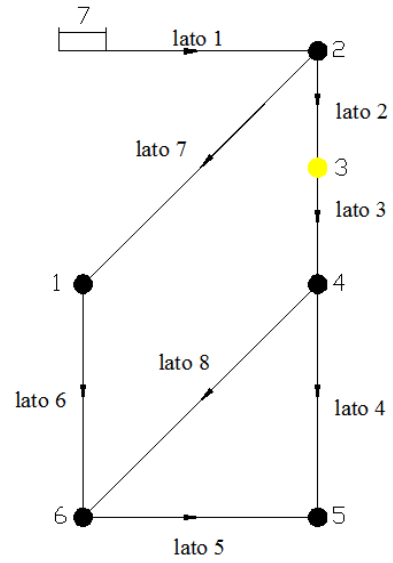


Figura 4.50 Configurazione "b6"

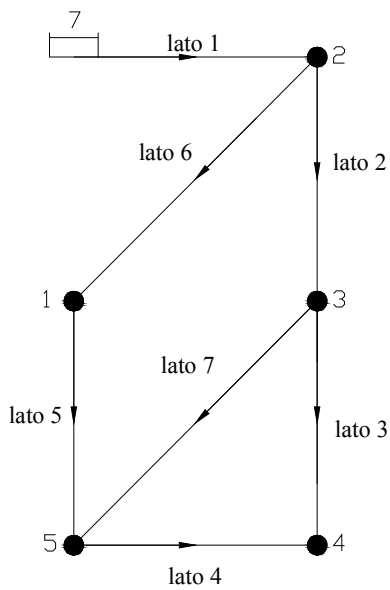


Figura 4.51 Configurazione "b7"

I risultati ottenuti dalle elaborazioni sulle configurazioni sopra mostrate sono riportati in Tabella 4-29 e plottati in Figura 4.52.

Tabella 4-29 Risultati in termini di scabrezza calcolata e scarto medio relativo

Configurazione	q nel lato 1 [l/s]	Classi di scabrezza della rete	Scabrezza ipotizzata [mm]	Scabrezza calcolata [mm]	scarto medio relativo
b1	34.5	1	0.2	0.5	150.00%
b2	34.5		0.2	0.49	145.00%
b3	34.5		0.2	0.51	155.00%
b4	34.5		0.2	0.49	145.00%
b5	34.5		0.2	0.49	145.00%
b6	34.5		0.2	0.49	145.00%
b7	34		0.2	0.5	150.00%

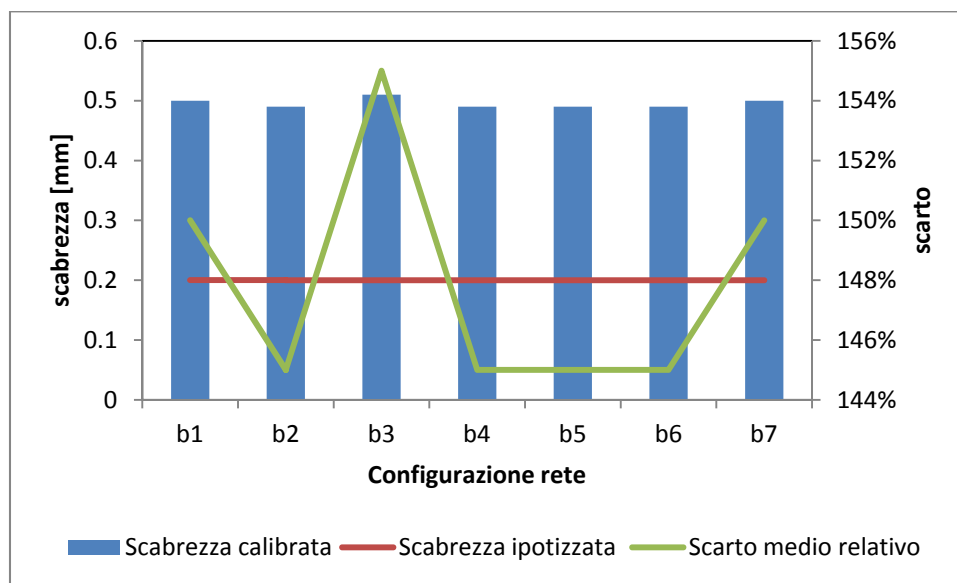


Figura 4.52 Scabrezza calibrata VS scabrezza ipotizzata e scarto

I due scenari qui presentati sono esemplificativi degli altri sei scenari di simulazione eseguiti sulla rete proposta da Komsi. Sono state riscontrate, infatti, le seguenti casistiche di errore:

- Non convergenza di gran parte delle simulazioni.
- Valori della scabrezza calibrata secondo la configurazione originaria della rete, poco credibili (configurazione “a7” di Tabella 4-28).
- Valori della scabrezza calibrata secondo la configurazione originaria della rete, con ordine di grandezza pari ai valori di scabrezza calibrata nelle configurazioni modificate dalla presenza dei nodi fittizi (Tabella 4-29).

Sono state, inoltre, implementati scenari di calibrazione effettuate ipotizzando, di volta in volta, nota una misura di pressione al generico nodo della rete. È stata considerata una perdita di 0.5 l/s variabile per i tutti i lati della rete e una sola classe di scabrezza per tutta la rete. Analogamente al

procedimento utilizzato negli scenari “a” e “b” sopra descritti, sono state effettuate le elaborazioni in questo caso, ottenendo risultati affetti dalle seguenti anomalie:

- Scabrezza calibrata secondo lo schema originario della rete quasi tre volte superiore alla scabrezza ipotizzata;
- Diverse simulazioni non convergenti.

Lo studio di queste due reti di letteratura ha evidenziato alcuni problemi nella determinazione e nella ricerca delle perdite in rete.

La procedura resta comunque degna di attenzione, rappresentando uno dei possibili futuri sviluppi dell'utilizzo, ai fini di ricerca, del modello numerico UNINET e della sua applicabilità in ambiti anche diversi dalla calibrazione.

## Capitolo 5: Modellazione di reti reali con UNINET

### 5.1 Modellazione PDA della rete di Marina di Santa Maria del Cedro

#### 5.1.1 Descrizione della rete

La rete oggetto di questo studio è di recente posa in opera, essendo stata completata nel 2009. Questa rete è costituita principalmente da condotte in PeaD, essendo in acciaio un solo tratto. Essa convoglia acqua potabile da un serbatoio posto a quota 65 m s.l.m, nei pressi del Centro storico di Santa Maria del Cedro, alla Marina di Santa Maria del Cedro, zona sviluppatasi in modo caotico lungo la statale S.S. 18 (Figura 5.1 e Figura 5.2). La caratteristica peculiare di questa rete, connessa alla particolarità del costruito, riguarda l'utilizzo stagionale della risorsa idrica: durante la stagione estiva gravitano oltre 50200 abitanti, durante l'inverno, invece, all'incirca 2000 abitanti. Questo squilibrio di popolazione comporta problemi gestionali non trascurabili, in quanto è necessario considerare un'infrastruttura in grado di servire il massimo della popolazione nell'ora di massimo consumo, garantendo tutta la portata alle pressioni di esercizio corrette ed è necessario effettuare anche una verifica delle pressioni durante la stagione invernale quando pochi abitanti usufruiscono del servizio di acquedotto.

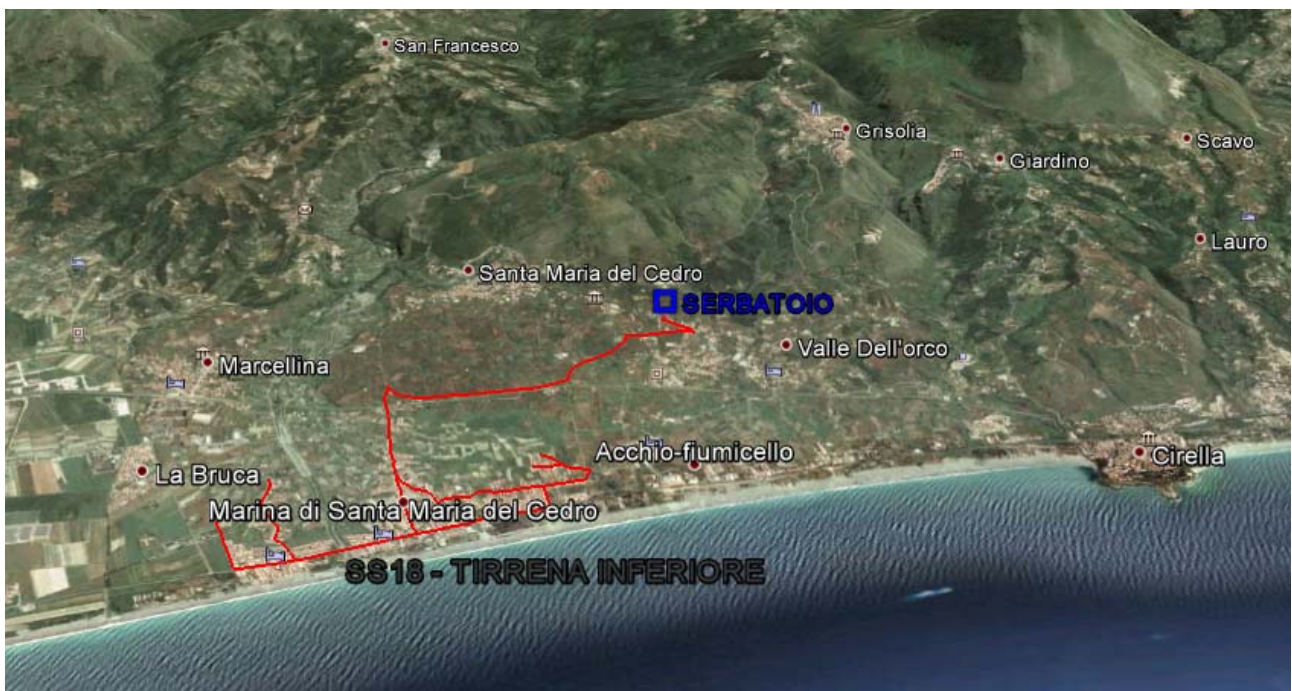


Figura 5.1 Ubicazione plano-altimetrica della rete

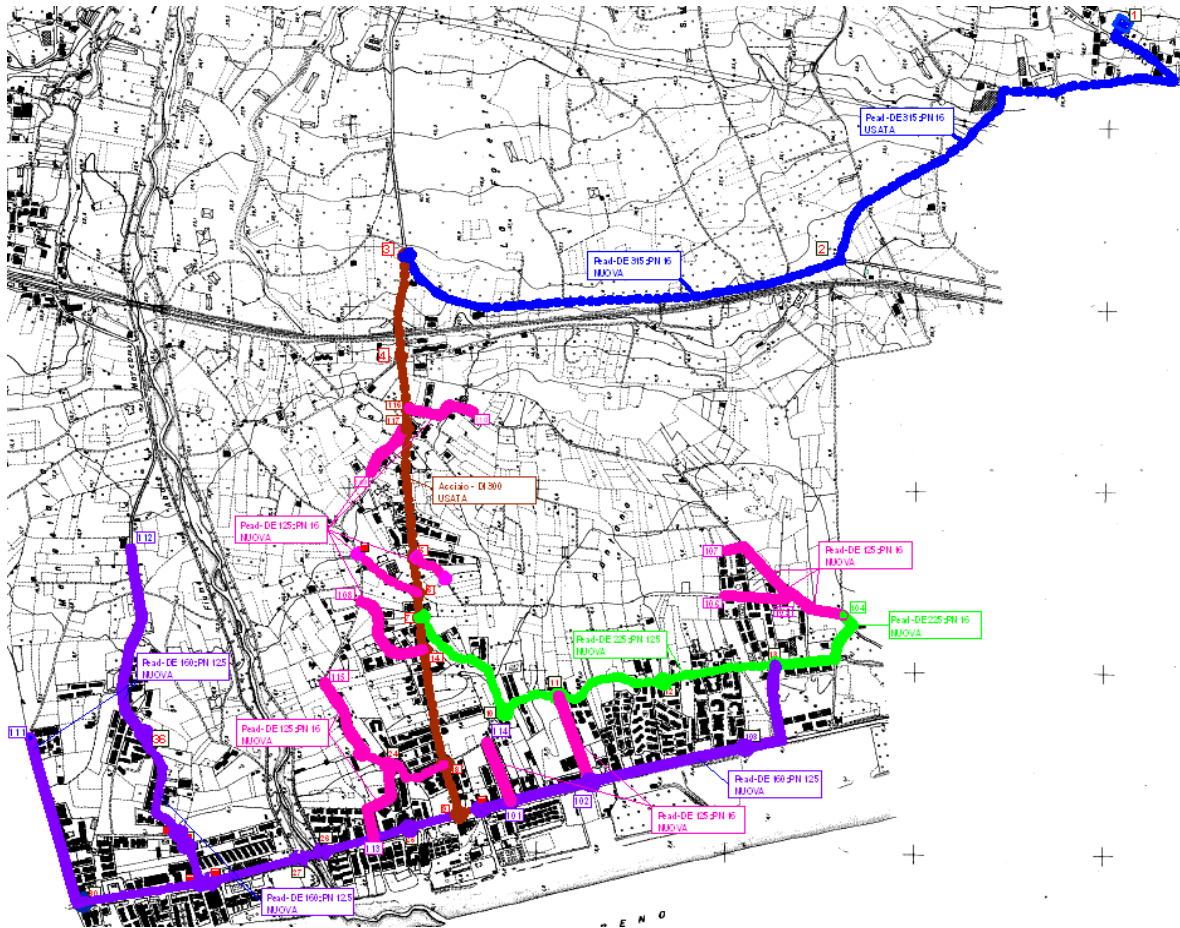


Figura 5.2 schema della rete di Santa Maria del Cedro marina

La rete attualmente è formata da circa 12 km di condotte, distribuite secondo quanto riportato in Tabella 5-1, dove sono riassunte tutte le caratteristiche geometriche.

Tabella 5-1: Caratteristiche geometriche dei tratti

lato	start node	end node	L [m]	Diametro [mm]	scabrezza [mm]	lato	start node	end node	L [m]	Diametro [mm]	scabrezza [mm]
1	44	1	1366	277.6	0.02	24	15	16	304	130.8	0.02
2	1	2	1240	277.6	0.02	25	16	17	306	191.8	0.02
3	2	3	273	300	0.3	26	17	18	165	106.6	0.02
4	3	4	150	300	0.3	27	18	19	216	106.6	0.02
5	4	5	57	300	0.3	28	18	20	173	106.6	0.02
6	4	29	222	106.6	0.02	29	16	21	300	191.8	0.02
7	5	28	157	106.6	0.02	30	21	22	297	191.8	0.02
8	5	6	345	300	0.3	31	22	23	152	191.8	0.02
9	6	27	102	106.6	0.02	32	11	30	134	130.8	0.02
10	7	26	284	106.6	0.02	33	30	31	87	130.8	0.02
11	6	7	93	300	0.3	34	31	32	236	106.6	0.02
12	7	8	58	300	0.3	35	10	32	176	106.6	0.02
13	8	9	84	300	0.3	36	32	33	146	106.6	0.02
14	9	25	259	106.6	0.02	37	31	34	136	130.8	0.02

15	8	23	360	191.8	0.02	38	34	35	55	130.8	0.02
16	9	10	315	300	0.3	39	35	36	234	130.8	0.02
17	10	11	137	300	0.3	40	36	37	21	130.8	0.02
18	11	12	55	130.8	0.02	41	37	38	105	130.8	0.02
19	12	13	59	130.8	0.02	42	38	39	35.4	130.8	0.02
20	13	24	134	106.6	0.02	43	39	40	364	130.8	0.02
21	13	14	216	106.6	0.02	44	40	41	364	130.8	0.02
22	14	22	252	106.6	0.02	45	37	42	317	130.8	0.02
23	14	15	660	130.8	0.02	46	42	43	506	130.8	0.02

La rete attualmente riesce a raggiungere praticamente tutte le abitazioni della Marina di Santa Maria del Cedro, ovvero tutti i 50200 abitanti previsti. Per una dotazione di 200 l/ab/d ipotizzata e in condizioni di massimo utilizzo si determina una portata complessiva pari a circa 261.25 l/s.

Per la condizione estiva di utilizzo medio si è considerato un coefficiente di punta unitario per una portata complessiva pari a circa 116 l/s, mentre per la condizione invernale si è considerato un coefficiente di punta unitario e una popolazione stimata pari a 2000 unità, per una portata complessiva pari a 4.62 l/s.

La distribuzione delle portate per singolo nodo è stata determinata in base alle abitazioni che afferiscono a ciascuno di essi. Le successive Tabella 5-2, Tabella 5-3 e Tabella 5-4, riportano le caratteristiche idrauliche e piezometriche dei nodi rispettivamente in condizioni estive di portata media, estive di portata di picco e invernale di portata media. Nelle tabelle con Hmin e Hmax si sono indicate rispettivamente la quota piezometrica minima e la quota piezometrica massima al nodo, ovvero la quota sotto la quale non si ha erogazione di portata al nodo e la quota minima affinché si possa ottenere al generico nodo l'erogazione di portata richiesta. In Tabella 5-5 sono riportate le caratteristiche orografiche e il livello iniziale del serbatoio di alimentazione.

**Tabella 5-2 caratteristiche idrauliche e piezometriche dei nodi della rete in condizione estiva – portata media**

nodo	Q [l/s]	Hmin [m s.l.m.]	Hmax [m s.l.m.]	nodo	Q [l/s]	Hmin [m s.l.m.]	Hmax [m s.l.m.]
1	1.18	28	53	23	2.14	4	29
2	0.37	30	55	24	0.09	3.5	28.5
3	6.96	17.5	42.5	25	1.78	6	31
4	0.12	16	41	26	2.84	10	35
5	0.12	14.5	39.5	27	0	8.5	33.5
6	3.06	8.5	33.5	28	0.23	14	39
7	1.48	7.9	32.9	29	0.12	15	40
8	3.12	7.86	32.86	30	2.27	5	30
9	0	6	31	31	3.48	5.5	30.5
10	4.72	4.19	29.19	32	7.59	4.5	29.5

11	2.03	5	30	33	0.09	4.5	29.5
12	4.73	5	30	34	1.49	7.5	32.5
13	2.2	5	30	35	4.02	7.5	32.5
14	11.57	5	30	36	0.54	5.5	30.5
15	15.51	5	30	37	3.57	5.5	30.5
16	3.68	4.3	29.3	38	0.89	5	30
17	10.02	4.6	29.6	39	3.93	5	30
18	0.74	4.6	29.6	40	1.28	9	34
19	0.23	4.6	29.6	41	0.09	7.5	32.5
20	1.4	4.6	29.6	42	1.02	5	30
21	2.92	5	30	43	0.09	7.5	32.5
22	2.4	4	29				

Tabella 5-3 caratteristiche idrauliche e piezometriche dei nodi della rete in condizione estiva – portata di picco

nodo	Q [l/s]	Hmin [m s.l.m.]	Hmax [m s.l.m.]	nodo	Q [l/s]	Hmin [m s.l.m.]	Hmax [m s.l.m.]
1	2.66	28	53	23	4.82	4	29
2	0.83	30	55	24	0.20	3.5	28.5
3	15.66	17.5	42.5	25	4.01	6	31
4	0.27	16	41	26	6.39	10	35
5	0.27	14.5	39.5	27	0.00	8.5	33.5
6	6.89	8.5	33.5	28	0.52	14	39
7	3.33	7.9	32.9	29	0.27	15	40
8	7.02	7.86	32.86	30	5.11	5	30
9	0.00	6	31	31	7.83	5.5	30.5
10	10.62	4.19	29.19	32	17.08	4.5	29.5
11	4.57	5	30	33	0.20	4.5	29.5
12	10.64	5	30	34	3.35	7.5	32.5
13	4.95	5	30	35	9.05	7.5	32.5
14	26.03	5	30	36	1.22	5.5	30.5
15	34.90	5	30	37	8.03	5.5	30.5
16	8.28	4.3	29.3	38	2.00	5	30
17	22.55	4.6	29.6	39	8.84	5	30
18	1.67	4.6	29.6	40	2.88	9	34
19	0.52	4.6	29.6	41	0.20	7.5	32.5
20	3.15	4.6	29.6	42	2.30	5	30
21	6.57	5	30	43	0.20	7.5	32.5
22	5.40	4	29				

**Tabella 5-4 caratteristiche idrauliche e piezometriche dei nodi della rete in condizione invernale – portata media**

nodo	Q [l/s]	Hmin [m s.l.m.]	Hmax [m s.l.m.]	nodo	Q [l/s]	Hmin [m s.l.m.]	Hmax [m s.l.m.]
1	0.05	28	53	23	0.09	4	29
2	0.01	30	55	24	0.00	3.5	28.5
3	0.28	17.5	42.5	25	0.07	6	31
4	0.00	16	41	26	0.11	10	35
5	0.00	14.5	39.5	27	0.00	8.5	33.5
6	0.12	8.5	33.5	28	0.01	14	39
7	0.06	7.9	32.9	29	0.00	15	40
8	0.12	7.86	32.86	30	0.09	5	30
9	0.00	6	31	31	0.14	5.5	30.5
10	0.19	4.19	29.19	32	0.30	4.5	29.5
11	0.08	5	30	33	0.00	4.5	29.5
12	0.19	5	30	34	0.06	7.5	32.5
13	0.09	5	30	35	0.16	7.5	32.5
14	0.46	5	30	36	0.02	5.5	30.5
15	0.62	5	30	37	0.14	5.5	30.5
16	0.15	4.3	29.3	38	0.04	5	30
17	0.40	4.6	29.6	39	0.16	5	30
18	0.03	4.6	29.6	40	0.05	9	34
19	0.01	4.6	29.6	41	0.00	7.5	32.5
20	0.06	4.6	29.6	42	0.04	5	30
21	0.12	5	30	43	0.00	7.5	32.5
22	0.10	4	29				

**Tabella 5-5 Caratteristiche orografiche e livello iniziale del serbatoio**

numero serbatoio	quota piezometrica [m]	quota terreno [m]
44	65	60

### 5.1.2 Verifica della rete

Il modello INetPDA, interno ad UNINET, è stato testato per le due diverse tipologie di verifica, PDA (Pressure Driven Analysis) e DDA (Demand Driven Analysis), utilizzando i dati della rete, che, per conformazione topografica e fluttuazione stagionale di portata, si prestava ad un confronto efficace sulle pressioni ai nodi e le portate erogate.

Le tre condizioni di portata immesse in rete (media invernale, media estiva ed estiva di punta) sono state analizzate compiutamente nelle due diverse tipologie di verifica e il confronto dei risultati rende evidente la migliore aderenza alla realtà della procedura PDA rispetto alla procedura DDA.

Entrando nel dettaglio delle simulazioni si vedrà come la verifica PDA meglio interpreta il funzionamento reale della rete in condizioni di portata di picco. La procedura PDA, infatti, consente



di valutare effettivamente la capacità di soddisfacimento della richiesta ai nodi e, quindi, l' effettivo valore delle portate erogate ai nodi con le pressioni determinatesi per effetto delle reali perdite di carico possibili.

#### 5.1.2.1 La verifica per la portata media in condizioni invernali

La condizione invernale di portata media è quella che caratterizza il funzionamento della rete per circa nove mesi all'anno. La popolazione stimata, infatti, ammonta a circa 2000 unità ed è uniformemente distribuita nel territorio interessato. La portata complessivamente richiesta è di circa 4.62 l/s, che si è scelto di distribuire sui nodi in base alla densità abitativa presente nell'intorno. La schematizzazione delle rete e la distribuzione delle portate è evidenziata in Tabella 5-4, mentre nelle successive Tabella 5-6 e Tabella 5-7, grafici in Figura 5.3 e Figura 5.4, sono riportati i risultati della simulazione, in termini di confronti della portata erogata e della pressione ai nodi.

Tabella 5-6 confronto tra le portate richieste e quelle calcolate nelle verifiche PDA e DDA e relativi scarti

No di	Q richieste [l/s]	Q calcolate DDA [l/s]	Q calcolate PDA [l/s]	scarto Q richieste-Q DDA	scarto Q richieste-Q PDA
1	0.05	0.05	0.05	0.00%	0.00%
2	0.01	0.01	0.01	0.00%	0.00%
3	0.28	0.28	0.28	0.00%	0.00%
4	0	0	0	0.00%	0.00%
5	0	0	0	0.00%	0.00%
6	0.12	0.12	0.12	0.00%	0.00%
7	0.06	0.06	0.06	0.00%	0.00%
8	0.12	0.12	0.12	0.00%	0.00%
9	0	0	0	0.00%	0.00%
10	0.19	0.19	0.19	0.00%	0.00%
11	0.08	0.08	0.08	0.00%	0.00%
12	0.19	0.19	0.19	0.00%	0.00%
13	0.09	0.09	0.09	0.00%	0.00%
14	0.46	0.46	0.46	0.00%	0.00%
15	0.62	0.62	0.62	0.00%	0.00%
16	0.15	0.15	0.15	0.00%	0.00%
17	0.4	0.4	0.4	0.00%	0.00%
18	0.03	0.03	0.03	0.00%	0.00%
19	0.01	0.01	0.01	0.00%	0.00%
20	0.06	0.06	0.06	0.00%	0.00%
21	0.12	0.12	0.12	0.00%	0.00%
22	0.1	0.1	0.1	0.00%	0.00%
23	0.09	0.09	0.09	0.00%	0.00%
24	0	0	0	0.00%	0.00%
25	0.07	0.07	0.07	0.00%	0.00%
26	0.11	0.11	0.11	0.00%	0.00%
27	0	0	0	0.00%	0.00%

28	0.01	0.01	0.01	0.00%	0.00%
29	0	0	0	0.00%	0.00%
30	0.09	0.09	0.09	0.00%	0.00%
31	0.14	0.14	0.14	0.00%	0.00%
32	0.3	0.3	0.3	0.00%	0.00%
33	0	0	0	0.00%	0.00%
34	0.06	0.06	0.06	0.00%	0.00%
35	0.16	0.16	0.16	0.00%	0.00%
36	0.02	0.02	0.02	0.00%	0.00%
37	0.14	0.14	0.14	0.00%	0.00%
38	0.04	0.04	0.04	0.00%	0.00%
39	0.16	0.16	0.16	0.00%	0.00%
40	0.05	0.05	0.05	0.00%	0.00%
41	0	0	0	0.00%	0.00%
42	0.04	0.04	0.04	0.00%	0.00%
43	0	0	0	0.00%	0.00%

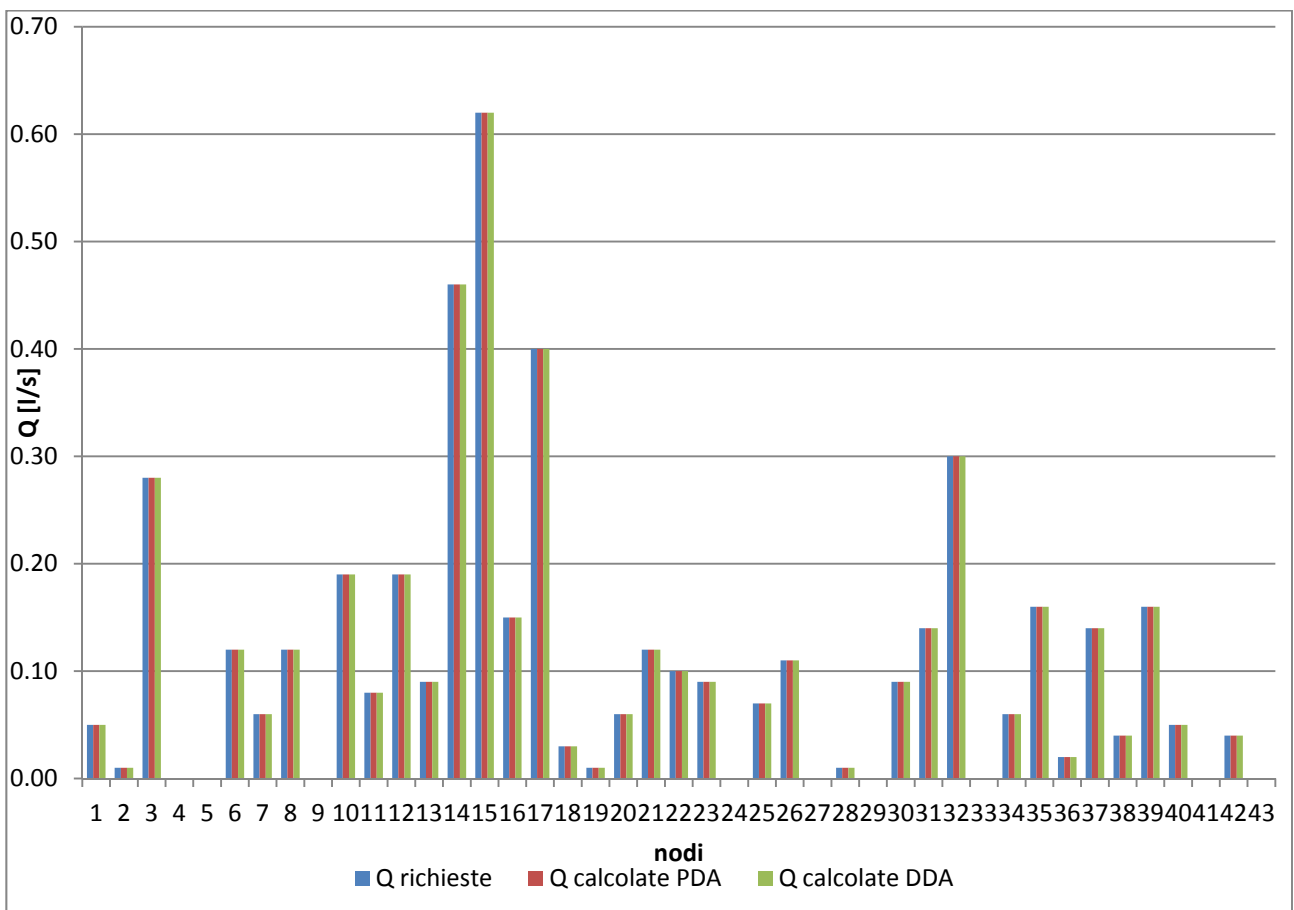


Figura 5.3 confronto tra le portate richieste e quelle calcolate nelle verifiche PDA e DDA

Tabella 5-7 confronto tra i carichi ai nodi calcolati in PDA e DDA e relativi scarti

H [m]				H [m]			
nodì	PDA	DDA	scarto	nodì	PDA	DDA	scarto
1	64.962	64.962	0.00%	23	64.902	64.902	0.00%
2	64.929	64.929	0.00%	24	64.904	64.904	0.00%
3	64.923	64.923	0.00%	25	64.91	64.91	0.00%
4	64.92	64.92	0.00%	26	64.911	64.911	0.00%
5	64.919	64.919	0.00%	27	64.913	64.913	0.00%
6	64.913	64.913	0.00%	28	64.919	64.919	0.00%
7	64.912	64.912	0.00%	29	64.92	64.92	0.00%
8	64.911	64.911	0.00%	30	64.902	64.902	0.00%
9	64.91	64.91	0.00%	31	64.9	64.9	0.00%
10	64.909	64.909	0.00%	32	64.901	64.901	0.00%
11	64.908	64.908	0.00%	33	64.901	64.901	0.00%
12	64.906	64.906	0.00%	34	64.895	64.895	0.00%
13	64.904	64.904	0.00%	35	64.893	64.893	0.00%
14	64.894	64.894	0.00%	36	64.889	64.889	0.00%
15	64.888	64.888	0.00%	37	64.889	64.889	0.00%
16	64.892	64.892	0.00%	38	64.888	64.888	0.00%
17	64.891	64.891	0.00%	39	64.888	64.888	0.00%
18	64.89	64.89	0.00%	40	64.888	64.888	0.00%
19	64.89	64.89	0.00%	41	64.888	64.888	0.00%
20	64.89	64.89	0.00%	42	64.889	64.889	0.00%
21	64.895	64.895	0.00%	43	64.889	64.889	0.00%
22	64.899	64.899	0.00%				

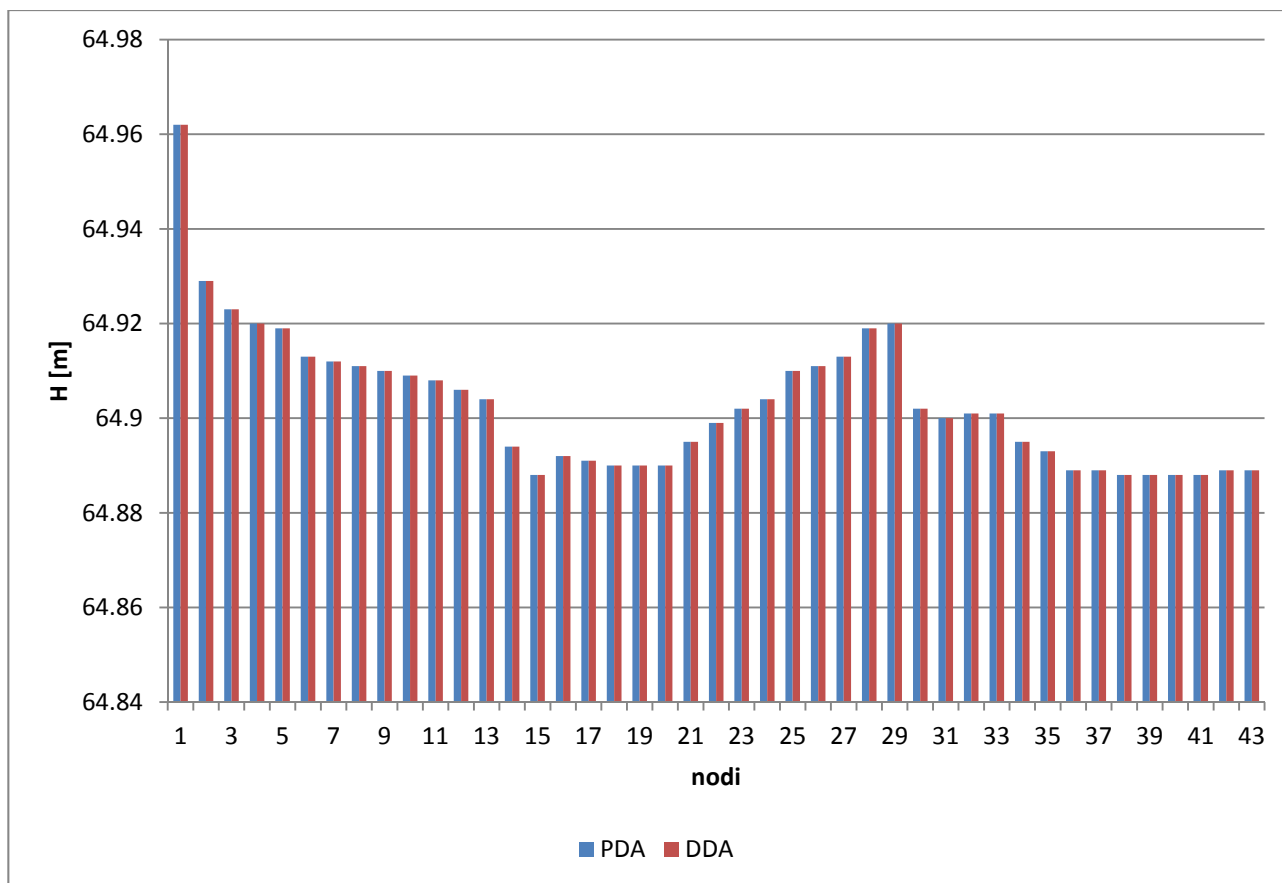


Figura 5.4 confronto tra i carichi ai nodi calcolati in PDA e DDA

Dal confronto risulta evidente che non ci sono differenze sia nei valori delle portate erogate ai nodi, che dei carichi.

### 5.1.2.2 La verifica per la portata media in condizioni estive

La condizione estiva di portata media è quella che si verifica per circa un mese all'anno. La popolazione stimata, infatti, ammonta a circa 50200 unità, uniformemente distribuita nel territorio interessato. La portata complessivamente richiesta è di circa 116 l/s (secondo lo schema di calcolo riportato in par. 3.2.1), che si è scelto di distribuire sui nodi in base alla densità abitativa presente nell'intorno. La schematizzazione delle rete e la distribuzione delle portate è evidenziata in Tabella 5-2, mentre nelle successive Tabella 5-8, Tabella 5-9, Tabella 5-10 e Tabella 5-11 e, grafici in Figura 5.5 e Figura 5.6, sono riportati i risultati della simulazione, in termini di confronti della portata erogata e della pressione ai nodi.

Tabella 5-8 confronto tra Q richieste e Q calcolate dalle verifiche DDA e PDA, con relativi scarti

No	Q richieste	Q calcolate DDA	Q calcolate PDA	scarto Q richieste-Q	scarto Q richieste-Q
1	1.18	1.18	1.17	0.00%	0.59%
2	0.37	0.37	0.25	0.00%	45.77%
3	6.96	6.96	6.52	0.00%	6.78%
4	0.12	0.12	0.11	0.00%	5.92%
5	0.12	0.12	0.12	0.00%	3.48%

6	3.06	3.06	3.06	0.00%	0.00%
7	1.48	1.48	1.48	0.00%	0.00%
8	3.12	3.12	3.12	0.00%	0.00%
9	0	0	0.00		
10	4.72	4.72	4.72	0.00%	0.00%
11	2.03	2.03	2.03	0.00%	0.00%
12	4.73	4.73	4.73	0.00%	0.00%
13	2.2	2.2	2.20	0.00%	0.00%
14	11.57	11.57	11.37	0.00%	1.78%
15	15.51	15.51	14.80	0.00%	4.80%
16	3.68	3.68	3.63	0.00%	1.50%
17	10.02	10.02	9.75	0.00%	2.72%
18	0.74	0.74	0.72	0.00%	3.00%
19	0.23	0.23	0.22	0.00%	3.01%
20	1.4	1.4	1.36	0.00%	3.12%
21	2.92	2.92	2.89	0.00%	1.07%
22	2.4	2.4	2.40	0.00%	0.00%
23	2.14	2.14	2.14	0.00%	0.00%
24	0.09	0.09	0.09	0.00%	0.00%
25	1.78	1.78	1.78	0.00%	0.00%
26	2.84	2.84	2.80	0.00%	1.49%
27	0	0	0.00		
28	0.23	0.23	0.22	0.00%	2.39%
29	0.12	0.12	0.12	0.00%	3.63%
30	2.27	2.27	2.27	0.00%	0.00%
31	3.48	3.48	3.48	0.00%	0.00%
32	7.59	7.59	7.59	0.00%	0.00%
33	0.09	0.09	0.09	0.00%	0.00%
34	1.49	1.49	1.40	0.00%	6.76%
35	4.02	4.02	3.73	0.00%	7.84%
36	0.54	0.54	0.51	0.00%	5.59%
37	3.57	3.57	3.37	0.00%	5.80%
38	0.89	0.89	0.85	0.00%	5.00%
39	3.93	3.93	3.74	0.00%	5.09%
40	1.28	1.28	1.10	0.00%	15.93%
41	0.09	0.09	0.08	0.00%	11.52%
42	1.02	1.02	0.97	0.00%	4.69%
43	0.09	0.09	0.08	0.00%	10.95%

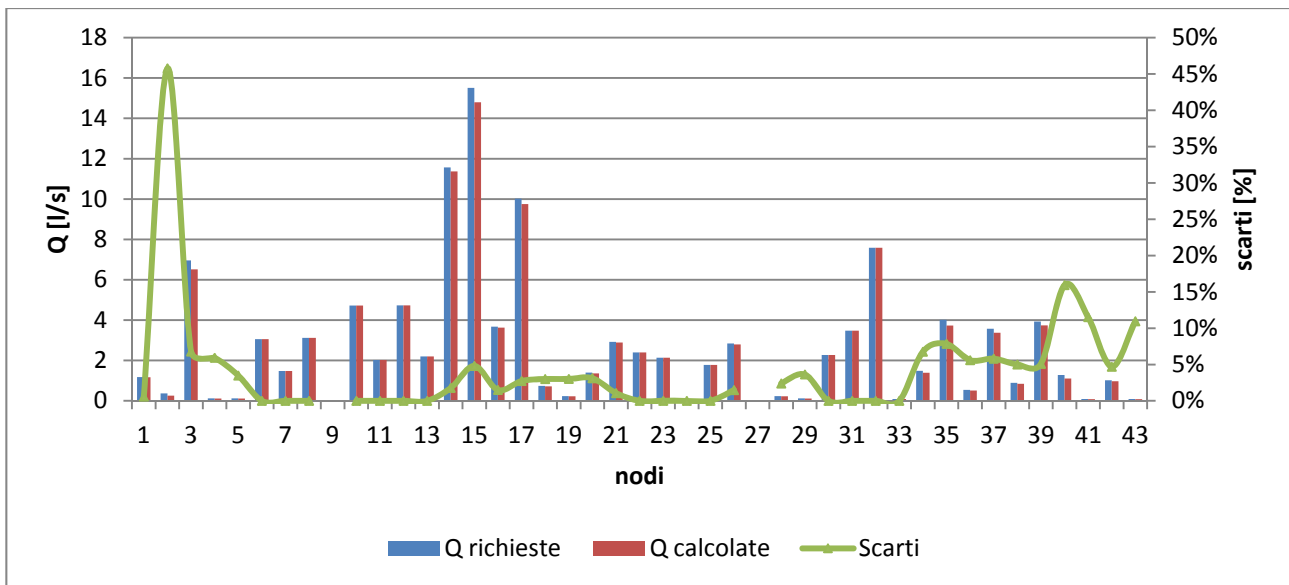


Figura 5.5 grafico di confronto tra Q richieste e Q calcolate in PDA e relativi scarti

Tabella 5-9 scarti minimo, medio e massimo di portata

Scarto minimo	Scarto medio	Scarto massimo
0 %	4.15 %	45.77 %

Tabella 5-10 confronto tra i carichi calcolati dalle verifiche PDA e DDA con relativi scarti

nodi	H [m]			nodi	H [m]		
	PDA	DDA	scarto		PDA	DDA	scarto
1	52.708	52.074	1.20%	23	31.582	29.875	5.40%
2	41.766	40.563	2.88%	24	32.115	30.444	5.20%
3	39.424	38.098	3.36%	25	33.893	32.307	4.68%
4	38.281	36.9	3.61%	26	34.274	32.708	4.57%
5	37.849	36.447	3.70%	27	35.248	33.723	4.33%
6	35.248	33.723	4.33%	28	37.847	36.445	3.70%
7	34.587	33.029	4.50%	29	38.28	36.899	3.61%
8	34.208	32.631	4.61%	30	31.561	29.804	5.57%
9	34.021	32.435	4.66%	31	30.72	28.889	5.96%
10	33.363	31.742	4.86%	32	31.064	29.303	5.67%
11	33.215	31.586	4.90%	33	31.063	29.303	5.67%
12	32.535	30.883	5.08%	34	29.437	27.436	6.80%
13	32.115	30.444	5.20%	35	28.999	26.94	7.10%
14	29.137	27.302	6.30%	36	27.921	25.726	7.86%
15	27.761	25.807	7.04%	37	27.832	25.626	7.93%
16	28.566	26.685	6.58%	38	27.675	25.447	8.05%
17	28.292	26.397	6.70%	39	27.635	25.401	8.08%
18	28.164	26.262	6.75%	40	27.602	25.358	8.13%
19	28.161	26.259	6.75%	41	27.601	25.358	8.13%
20	28.111	26.206	6.78%	42	27.809	25.601	7.94%
21	29.475	27.65	6.19%	43	27.808	25.6	7.94%
22	30.586	28.826	5.75%				

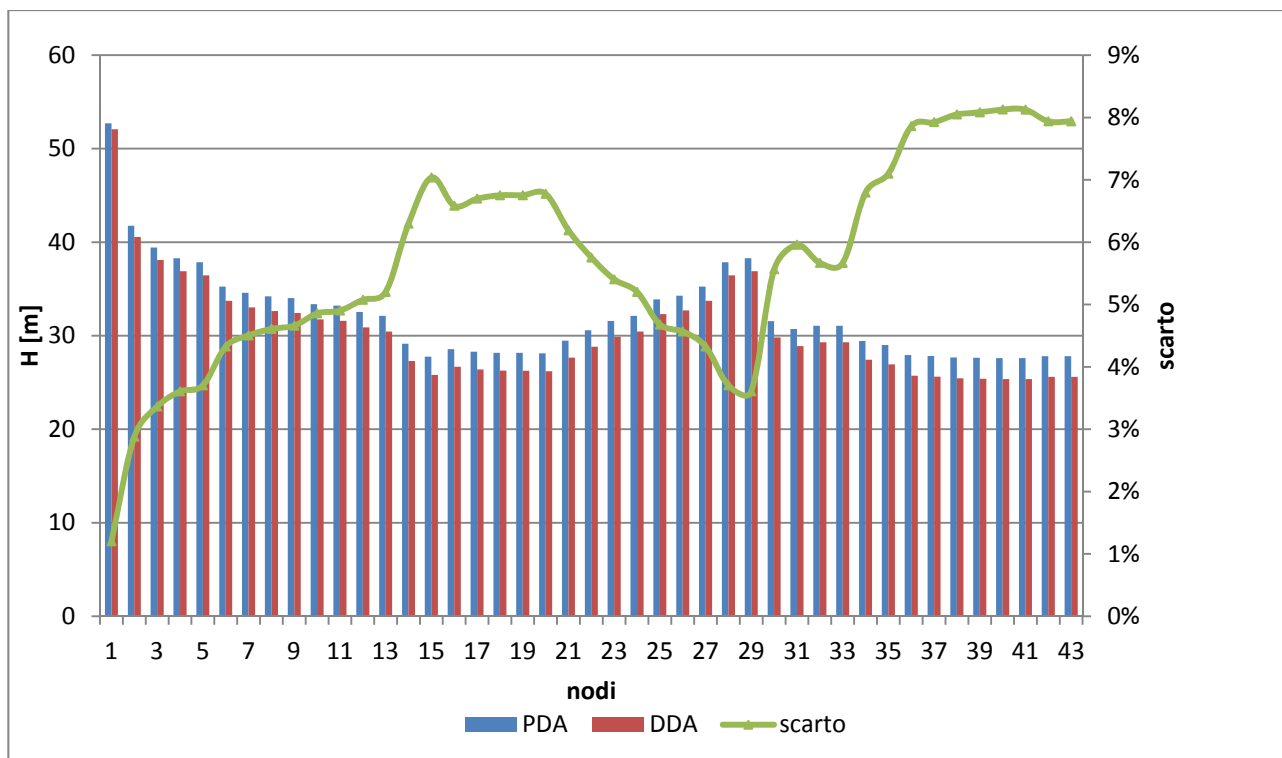


Figura 5.6 grafico di confronto tra i carichi calcolati dalle verifiche PDA e DDA, con relativi scarti

Tabella 5-11 scarti minimo, medio e massimo dei carichi ai nodi

Scarto minimo	Scarto medio	Scarto massimo
1.20%	5.68%	8.13%

Dai risultati delle simulazioni si evince la differenza tra le simulazioni in DDA e in PDA, in termini di portata erogata e carico ai nodi. Complessivamente, infatti, la portata effettivamente erogata è pari a 113.06 l/s, ossia circa il 97% della portata richiesta. La differenza è imputabile al fatto che, in alcuni nodi, non viene raggiunta la pressione minima capace di erogare la portata richiesta, per cui il modello riequilibra la rete, quindi viene simulato il comportamento reale.

### 5.1.2.3 La verifica per la portata di picco in condizioni estive

La condizione estiva di portata di picco è quella che si verifica per qualche ora della giornata nell'arco di un mese all'anno e che, in definitiva, rappresenta la portata per la quale è necessario sempre effettuare le verifiche di una rete di distribuzione idrica.

La popolazione stimata ammonta a 50200 unità, uniformemente distribuita nel territorio interessato. La portata complessivamente richiesta è di circa 261.25 l/s, pari alla  $Q_{media}$  estiva moltiplicata per un coefficiente di punta pari a 2.25, che si è scelto di distribuire sui nodi in base alla densità abitativa presente nell'intorno. La schematizzazione delle rete e la distribuzione delle portate è evidenziata in Tabella 5-3, mentre nelle successive Tabella 5-12, Tabella 5-13, Tabella 5-14 e,

grafici in Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9, sono riportati i risultati della simulazione, in termini di confronti della portata erogata e della pressione ai nodi. In riferimento alla Tabella 5-13, il valore medio dello scarto è pari quasi al 100%, il che vuol dire che mediamente ai nodi viene erogata la metà della portata richiesta. Le simulazioni fatte in DDA hanno evidenziato il sussistere di pressioni negative in rete. Questo risultato è largamente diffuso nella modellazione tradizionale degli acquedotti, dove non si tiene conto della reale capacità di erogazione del nodo in base al carico sullo stesso.

**Tabella 5-12 confronto tra le portate erogate richieste e le portate calcolate dalle verifiche PDA e DDA, con relativi scarti**

No di	Q richieste [l/s]	Q calcolate DDA [l/s]	Q calcolate PDA [l/s]	scarto Q richieste-Q DDA	scarto Q richieste-Q PDA
1	2.655	2.66	2.27	0.19%	17.05%
2	0.8325	0.83	0.00	0.30%	
3	15.66	15.66	9.12	0.00%	71.80%
4	0.27	0.27	0.15	0.00%	74.38%
5	0.27	0.27	0.16	0.00%	66.11%
6	6.885	6.89	4.59	0.07%	50.04%
7	3.33	3.33	2.18	0.00%	52.91%
8	7.02	7.02	4.48	0.00%	56.80%
9	0	0	0.00		
10	10.62	10.62	7.52	0.00%	41.20%
11	4.5675	4.57	3.10	0.05%	47.28%
12	10.6425	10.64	6.90	0.02%	54.30%
13	4.95	4.95	3.12	0.00%	58.47%
14	26.0325	9.0116	13.18	188.88%	97.49%
15	34.8975	0	15.49		125.32%
16	8.28	0	4.22		96.07%
17	22.545	0	10.92		106.46%
18	1.665	0	0.80		108.86%
19	0.5175	0	0.25		108.56%
20	3.15	0	1.49		110.72%
21	6.57	2.8062	3.45	134.12%	90.31%
22	5.4	5.4	3.29	0.00%	64.18%
23	4.815	4.82	3.13	0.10%	53.77%
24	0.2025	0.2	0.14	1.25%	49.58%
25	4.005	4.01	2.71	0.12%	47.52%
26	6.39	6.39	3.63	0.00%	75.87%
27	0	0	0.00		
28	0.5175	0.52	0.32	0.48%	60.97%
29	0.27	0.27	0.16	0.00%	64.67%
30	5.1075	4.6416	3.13	10.04%	63.42%
31	7.83	0	4.38		78.88%
32	17.0775	0	10.27		66.22%



33	0.2025	0	0.12	68.33%
34	3.3525	0	1.42	136.51%
35	9.045	0	3.63	149.18%
36	1.215	0	0.54	125.40%
37	8.0325	0	3.51	128.58%
38	2.0025	0	0.91	120.98%
39	8.8425	0	3.99	121.58%
40	2.88	0	0.60	381.00%
41	0.2025	0	0.06	215.17%
42	2.295	0	1.05	117.56%
43	0.2025	0	0.07	204.81%

Tabella 5-13 scarti minimo, medio e massimo tra i valori di portata richiesta e calcolata in PDA

Scarto minimo	Scarto medio	Scarto massimo
17.05%	95.71%	381%

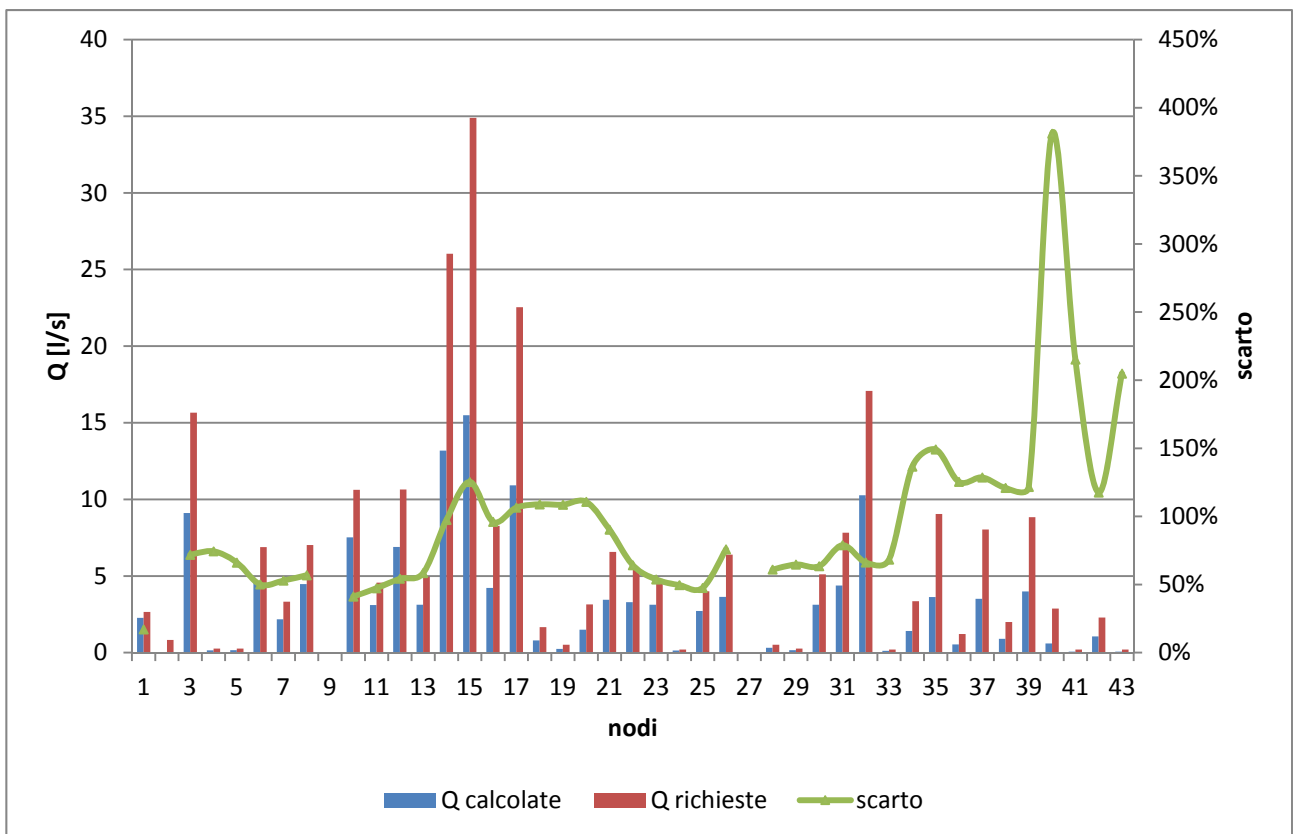


Figura 5.7 grafico di confronto tra le portate richieste e calcolate in PDA, con relativo andamento degli scarti

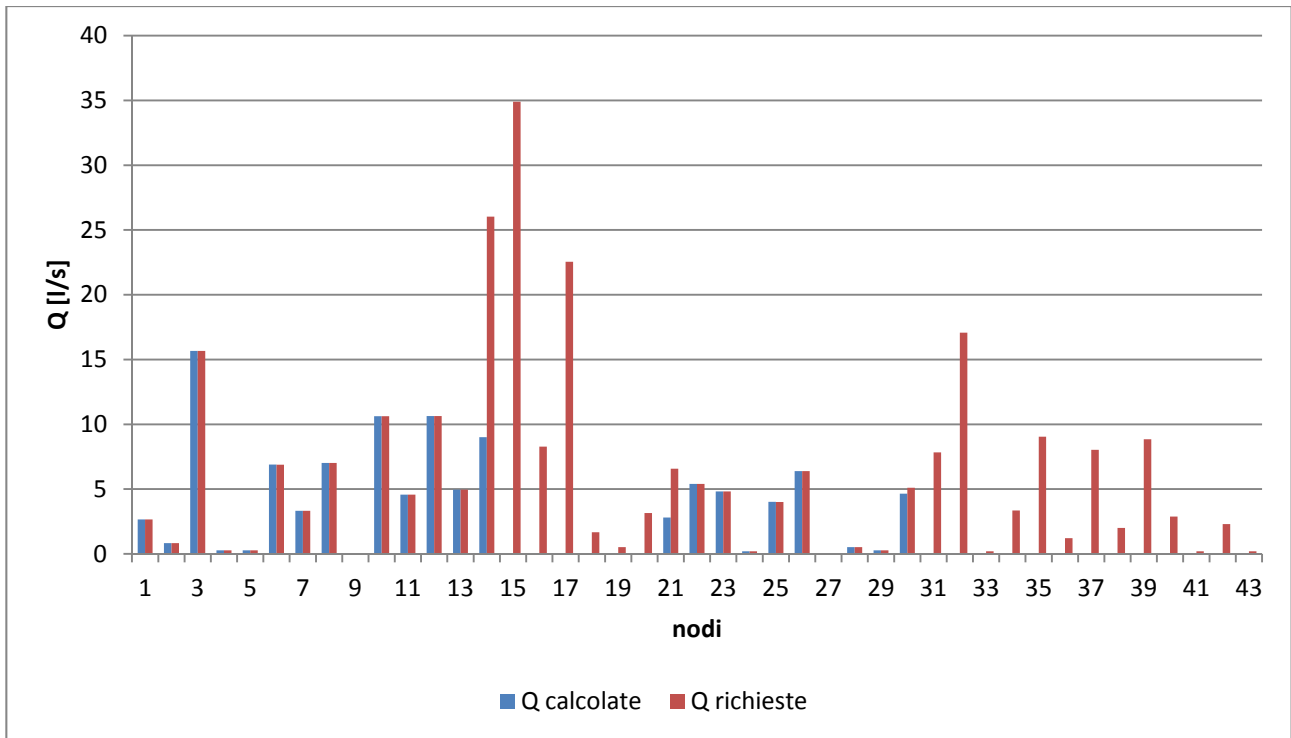


Figura 5.8 grafico di confronto tra le portate richieste e calcolate in DDA

Tabella 5-14 confronto tra i carichi calcolati dalle verifiche PDA e DDA, con relativi scarti

H [m]				H [m]			
nodì	PDA	DDA	scarto	nodì	PDA	DDA	scarto
1	46.179	40.631	12.01%	23	14.552	2.0822	85.69%
2	29.609	19.186	35.20%	24	14.955	1.6571	88.92%
3	25.97	14.461	44.32%	25	17.459	4.0672	76.70%
4	24.221	12.345	49.03%	26	18.083	4.2168	76.68%
5	23.56	11.547	50.99%	27	19.589	6.7695	65.44%
6	19.589	6.7695	65.44%	28	23.556	11.538	51.02%
7	18.593	5.602	69.87%	29	24.22	12.341	49.05%
8	18.028	4.9734	72.41%	30	14.352	0.82506	94.25%
9	17.737	4.6115	74.00%	31	13.313	-0.14261	101.07%
10	16.729	3.3865	79.76%	32	13.546	-0.1484	101.10%
11	16.513	3.1409	80.98%	33	13.545	-0.1491	101.10%
12	15.505	2.0474	86.80%	34	11.976	-0.84753	107.08%
13	14.955	1.658	88.91%	35	11.522	-1.1326	109.83%
14	11.411	0.11985	98.95%	36	10.381	-1.6136	115.54%
15	9.9233	-0.51772	105.22%	37	10.288	-1.6568	116.10%
16	10.803	-0.35215	103.26%	38	10.132	-1.715	116.93%
17	10.462	-0.48388	104.63%	39	10.095	-1.7346	117.18%
18	10.296	-0.50905	104.94%	40	10.081	-1.7346	117.21%
19	10.292	-0.51148	104.97%	41	10.08	-1.7346	117.21%
20	10.23	-0.51789	105.06%	42	10.259	-1.6571	116.15%
21	11.903	0.18243	98.47%	43	10.258	-1.6575	116.16%
22	13.274	1.1194	91.57%				

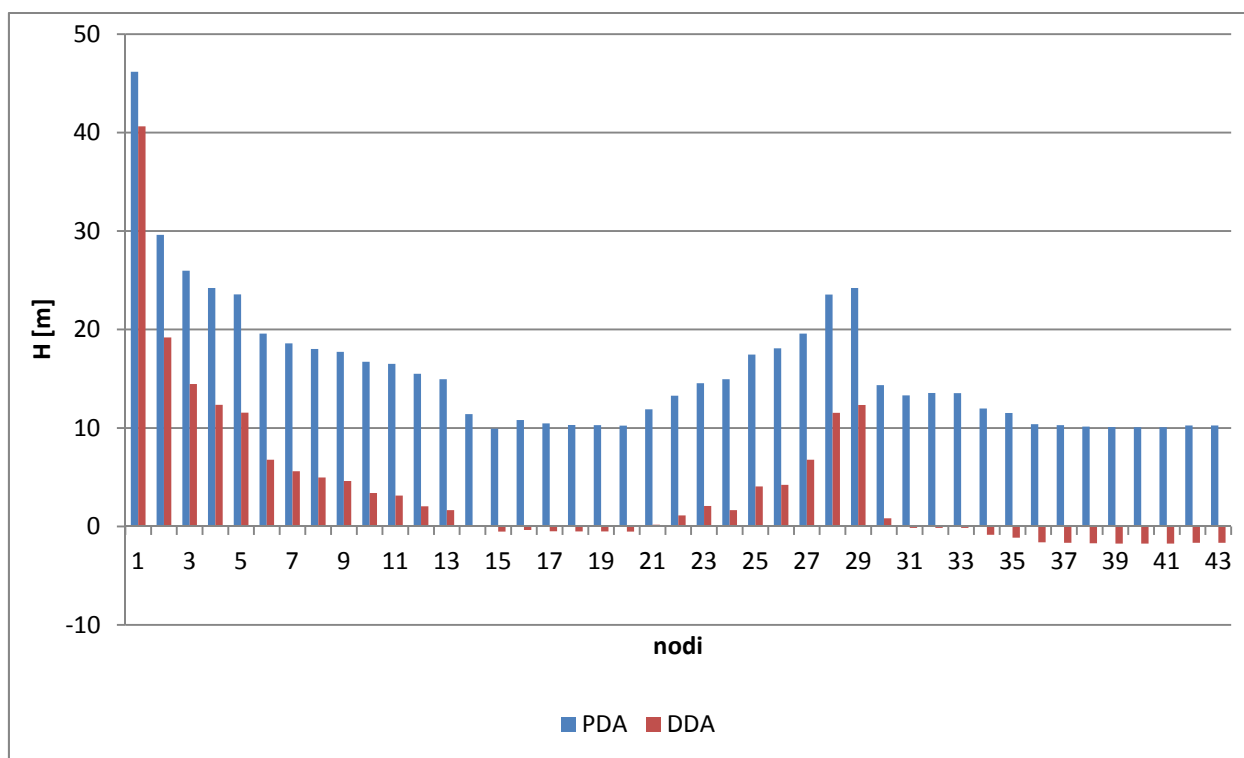


Figura 5.9 grafico di confronto tra i carichi calcolati dalle verifiche PDA e DDA

Come anticipato in premessa, il caso di studio qui presentato permette di appurare il fatto che la verifica della rete in PDA consente di valutare il reale comportamento della rete in condizioni di notevole utilizzo. È noto, infatti, che, durante i momenti di massimo utilizzo di un acquedotto, l'acqua giunge ai primi piani dei palazzi e non agli ultimi e, modellando la rete in modo tradizionale, senza tenere conto del legame esistente fra portata erogata e carico, si determinerebbero pressioni negative che non rispecchiano la reale erogazione. Il grafico in Figura 5.9, da questo punto di vista, è esemplare: per alcuni nodi, la tradizionale verifica in DDA non consente di apprezzare il fatto che nei nodi più sfavoriti è presente una minima erogazione della risorsa idrica, anche se lontana da quella richiesta. Analizzando i valori complessivi della portata in rete, infine, risulta evidente che nelle condizioni di massimo utilizzo la portata realmente assorbita dalla rete è di gran lunga superiore a quella prevista dalla verifica tradizionale (DDA), cosa che si riesce ad apprezzare con una verifica PDA (Tabella 5-15 e Tabella 5-16).

Tabella 5-15 confronto tra portata richiesta e portata erogata in PDA

Q erogata - PDA	Q richiesta	% di erogazione
140.46	261.25	53.76

Tabella 5-16 confronto tra portata richiesta e portata erogata in DDA

Q erogata - DDA	Q richiesta	% di erogazione
105.78	261.25	40.49

## 5.2 Modellazione e calibrazione teorica della rete del comune di San Mango d'Aquino

### 5.2.1 Descrizione della rete idrica

La rete oggetto di studio si sviluppa per circa 24000 metri, di cui 9400 metri di condotte principali e 13000 metri di diramazioni secondarie per un totale di circa 930 allacci (Figura 5.10). Il materiale di cui sono costituite le condotte è acciaio con diametri effettivi pari a 100 mm, 80 mm, 60 mm e due pollici.

La rete viene alimentata da due serbatoi che hanno un volume complessivo di circa 320 m<sup>3</sup>. Il primo serbatoio, ubicato in località Pruno, è posto a circa 630 m s.l.m. e ha un volume di accumulo pari a 70 m<sup>3</sup>, mentre il secondo è ubicato in località Campo a quota 554 m s.l.m. e ha un volume di accumulo pari a 250 m<sup>3</sup>.

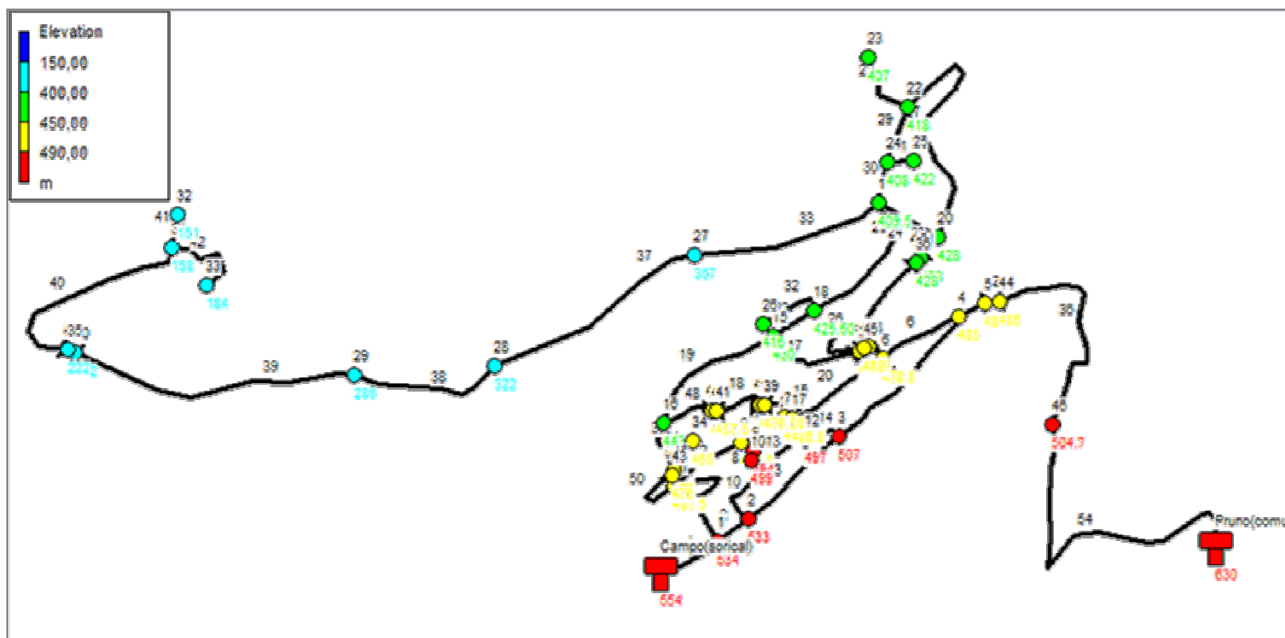


Figura 5.10 schema della rete di San Mango d'Aquino

Le principali fonti di approvvigionamento idrico sono rappresentate da sorgenti presenti nel territorio comunale e l'adduttrice regionale di proprietà della SO.RI.CAL..

Dal punto di vista altimetrico, la rete presenta una notevole variabilità di carico per effetto dello sviluppo urbanistico del centro urbano, adagiato su un costone. La quota più alta, infatti, è rappresentata dal serbatoio di Pruno, mentre il punto più depresso si trova a quota 161 m s.l.m. in località Buda (Figura 5.11), con dislivello complessivo di circa 469 metri.



Figura 5.11 Ubicazione plano-altimetrica della rete

I serbatoi non sono tra loro direttamente collegati, per cui uno dei problemi gestionali più importanti riguarda la sincronizzazione delle portate in uscita, ovvero che si eviti il riempimento e lo sfioro di un serbatoio e il contemporaneo svuotamento dell'altro.

Nella rete sono state installate otto valvole riduttrici di pressione ubicate nella parte bassa della rete, utili ad evitare eccessive pressioni di esercizio durante lo scarso utilizzo dell'acquedotto.

Complessivamente la portata richiesta ammonta a circa 6 l/s, valore che è in accordo con le misure di portata in arrivo ai serbatoi. La dotazione idrica corrispondente è pari a 300 l/ab/d.

Per ogni sottoarea comunale omogenea sono stati individuati gli abitanti residenti, un nodo di alimentazione e, infine, la portata erogata in ciascun nodo in funzione dell'effettivo numero di utenti serviti (Tabella 5-17).

Tabella 5-17 distribuzione degli abitanti per i nodi della rete

nodo	abitanti	Q [l/s]	z nodi [m]	nodo	abitanti	Q [l/s]	z nodi [m]
1	104	0.36	534	24	49	0.17	408
2	75	0.26	533	25	40	0.14	422
3	84	0.29	507	26	14	0.05	416
4	69	0.24	485	27	20	0.07	367
5	49	0.17	486	28	0	0	322

6	135	0.47	478.5	29	0	0	286
7	35	0.12	487	30	3	0.01	222
8	72	0.25	488.5	31	0	0	168
9	37	0.13	494	32	6	0.02	161
10	75	0.26	499	33	43	0.15	184
11	58	0.2	487.5	34	60	0.21	465
12	23	0.08	497	35	0	0	222
13	43	0.15	476.5	36	0	0	428
14	43	0.15	468	37	0	0	468
15	29	0.1	430	38	0	0	468
16	32	0.11	443.5	39	0	0	476.5
17	17	0.06	486.5	40	0	0	457.5
18	132	0.46	425.5	41	115	0.4	457.5
19	112	0.39	409.5	42	0	0	476
20	0	0	428	43	0	0	476
21	26	0.09	428	44	0	0	486
22	6	0.02	418	45	0	0	468
23	49	0.17	407	46	95	0.33	504.7

### 5.2.1.1 Schema della rete

Le caratteristiche geometriche e topologiche della rete sono riportate sia in Figura 5.10, sia nelle Tabella 5-18, Tabella 5-19, Tabella 5-20. Il valore di scabrezza è stato omogeneo e di valore unitario, essendo le condotte di un unico materiale e posate all'incirca nello stesso periodo.

I nodi in cui sono state poste in opera le valvole riduttrici di pressione sono riportate in coda alla Tabella 5-18. Poiché il modello UNINET non consente di inserire nei dati impianti speciali, quali valvole e pompe, le valvole sono state schematizzate inserendo tratti di condotta di caratteristiche geometriche tali da ottenere lo stesso valore di perdita di carico concentrata nella valvola.

Tabella 5-18 caratteristiche geometriche delle condotte della rete

lati	nodo iniziale	nodo finale	lunghezza [m]	diametro [mm]	note	scabrezza [mm]
1	47	1	150	100		1
2	1	2	92	100		1
3	2	3	275	100		1
4	3	4	370	100		1
5	4	5	22	100		1
6	4	6	175	100		1
7	7	8	100	80		1
8	8	9	34	80		1
9	9	10	15	80		1

10	2	10	130	60		1
11	1	11	300	100		1
12	8	11	176	80		1
13	10	12	115	80		1
14	3	12	85	100		1
15	7	39	150	80		1
16	6	38	52	100		1
17	37	15	250	100		1
18	13	41	125	80		1
19	15	16	325	100		1
20	6	17	250	80		1
21	7	17	20	80		1
22	15	18	130	100		1
23	18	19	350	80		1
24	19	20	190	60		1
25	20	21	35	60		1
26	14	36	500	60		1
27	20	22	450	60		1
28	22	23	100	60		1
29	22	24	200	60		1
30	19	24	46	60		1
31	24	25	70	60		1
32	18	26	140	60		1
33	19	27	400	60		1
34	34	42	100	100		1
35	34	16	150	100		1
36	46	44	600	100		1
37	27	28	550	60		1
38	28	29	391	60		1
39	29	30	525	60		1
40	35	31	300	60		1
41	31	32	60	60		1
42	31	33	200	50		1
43	30	35	287	12	Valve	1
44	36	21	1	0	Valve	1
45	45	37	1	0	Valve	1
46	38	14	1810	20	Valve	1
47	39	13	123	20	Valve	1
48	40	16	125	80		1
49	40	41	1	0	Valve	1
50	43	11	155	100		1
51	43	42	8	20	Valve	1
52	44	5	1	0	Valve	1
53	14	45	1	100		1
54	46	48	750	100		1

Tabella 5-19 caratteristiche idrauliche dei nodi della rete

nodo	Q [l/s]	z nodi [m]	Hmin [m]	Hmax [m]	nodo	Q [l/s]	z nodi [m]	Hmin [m]	Hmax [m]
1	0.36	534.00	534.00	559.00	24	0.17	408.00	408.00	433.00
2	0.26	533.00	533.00	558.00	25	0.14	422.00	422.00	447.00
3	0.29	507.00	507.00	532.00	26	0.05	416.00	416.00	441.00
4	0.24	485.00	485.00	510.00	27	0.07	367.00	367.00	392.00
5	0.17	486.00	486.00	511.00	28	0	322.00	322.00	347.00
6	0.47	478.50	478.50	503.50	29	0	286.00	286.00	311.00
7	0.12	487.00	487.00	512.00	30	0.01	222.00	222.00	247.00
8	0.25	488.50	488.50	513.50	31	0	168.00	168.00	193.00
9	0.13	494.00	494.00	519.00	32	0.02	161.00	161.00	186.00
10	0.26	499.00	499.00	524.00	33	0.15	184.00	184.00	209.00
11	0.2	487.50	487.50	512.50	34	0.21	465.00	465.00	490.00
12	0.08	497.00	497.00	522.00	35	0	222.00	222.00	247.00
13	0.15	476.50	476.50	501.50	36	0	428.00	428.00	453.00
14	0.15	468.00	468.00	493.00	37	0	468.00	468.00	493.00
15	0.1	430.00	430.00	455.00	38	0	468.00	468.00	493.00
16	0.11	443.50	443.50	468.50	39	0	476.50	476.50	501.50
17	0.06	486.50	486.50	511.50	40	0	457.50	457.50	482.50
18	0.46	425.50	425.50	450.50	41	0.4	457.50	457.50	482.50
19	0.39	409.50	409.50	434.50	42	0	476.00	476.00	501.00
20	0	428.00	428.00	453.00	43	0	476.00	476.00	501.00
21	0.09	428.00	428.00	453.00	44	0	486.00	486.00	511.00
22	0.02	418.00	418.00	443.00	45	0	468.00	468.00	493.00
23	0.17	407.00	407.00	432.00	46	0.33	504.70	504.70	529.70

Tabella 5-20 caratteristiche topologiche e piezometriche dei serbatoi della rete

serbatoi		
Ns	Hpiez [m s.l.m.]	Hter [m s.l.m.]
47	554	554
48	630	630

### 5.2.2 Verifica della rete di San Mango d'Aquino in condizioni DDA (Demand Driven Analysis) e PDA (Pressure Driven Analysis)

Si è scelto di effettuare le verifiche della rete in condizioni DDA e PDA, per valutare le differenze tra i due approcci. La particolarità della rete, dovuta alla presenza di due serbatoi e di organi di regolazione, ha consentito di verificare l'affidabilità del modello in condizioni particolarmente critiche in termini di convergenza numerica. Il modello ha restituito risultati incoraggianti, in quanto con la verifica in DDA si sono ottenuti risultati analoghi a quelli ottenuti applicando altri



modelli di verifica tradizionale; inoltre, il confronto tra la verifica PDA e quella DDA, in termini di carichi ai nodi, restituisce i risultati attesi, ossia, la presenza di elevati carichi piezometrici fa pensare a irriskorie differenze in termini di pressioni ai nodi e quindi di portate erogate, essendo il carico disponibile al generico nodo, sufficiente a permettere l'erogazione di tutta la portata richiesta. Il modello INetPDA, interno ad UNINET, ha restituito i risultati di Tabella 5-21 e Tabella 5-22, calcolando lo scarto percentuale tra carichi calcolati da verifica PDA e carichi calcolati con verifica DDA.

**Tabella 5-21 Carichi ai nodi della rete di San Mango da verifiche PDA e DDA**

nodo	Huninet PDA[m]	Huninet DDA [m]	scarto percentuale	nodo	Huninet PDA[m]	Huninet DDA [m]	scarto percentuale
1	552.49	552.42	0.01%	24	482.85	481.09	0.36%
2	552.26	552.17	0.02%	25	482.84	481.08	0.36%
3	551.95	551.86	0.02%	26	483.47	481.71	0.36%
4	551.83	551.73	0.02%	27	482.75	480.99	0.36%
5	551.83	551.73	0.02%	28	482.65	480.89	0.36%
6	551.8	551.71	0.02%	29	482.58	480.81	0.37%
7	551.81	551.71	0.02%	30	482.48	480.71	0.37%
8	551.87	551.77	0.02%	31	226.52	224.76	0.78%
9	551.89	551.8	0.02%	32	226.52	224.76	0.78%
10	551.91	551.81	0.02%	33	226.45	224.69	0.78%
11	551.88	551.78	0.02%	34	484.16	482.4	0.36%
12	551.94	551.85	0.02%	35	226.57	224.81	0.78%
13	491.1	482.41	1.77%	36	474.21	474.11	0.02%
14	474.21	474.11	0.02%	37	483.6	481.84	0.36%
15	483.6	481.84	0.36%	38	551.8	551.71	0.02%
16	483.97	482.21	0.36%	39	551.76	551.65	0.02%
17	551.81	551.71	0.02%	40	483.97	482.21	0.36%
18	483.47	481.71	0.36%	41	491.07	482.38	1.77%
19	482.89	481.13	0.36%	42	484.31	482.55	0.36%
20	482.86	481.1	0.36%	43	551.64	551.54	0.02%
21	482.86	481.09	0.37%	44	629.97	629.97	0.00%
22	482.84	481.07	0.37%	45	474.21	474.11	0.02%
23	482.82	481.06	0.36%	46	629.97	629.97	0.00%

**Tabella 5-22 Scarti percentuali tra verifica PDA e DDA**

scarto max	scarto min	scarto medio
1.77%	0.00%	0.30%

Anche in questo caso si è di fronte ad una rete che manifesta, in maniera sia pur minima, comportamenti tali da verificare portate erogate inferiori a quelle in arrivo ai serbatoi.

### 5.2.3 Individuazione dei nodi sensibili della rete

Una volta effettuata la verifica della rete e dopo aver valutato se il comportamento della stessa fosse di tipo DDA o PDA, si è proceduto con l'individuazione dei nodi sensibili, definiti come i nodi in cui è preferibile effettuare le misure di pressione.

Il calcolo è stato effettuato implementando un codice originale in Matlab. I risultati sono riportati nelle seguenti Figura 5.12 e Figura 5.13, che rappresentano le schermate del codice implementato in Matlab, considerando rispettivamente un incremento e poi un decremento della scabrezza del 10%. I risultati ottenuti in termini di nodi sensibili sono riportati in Tabella 5-23.

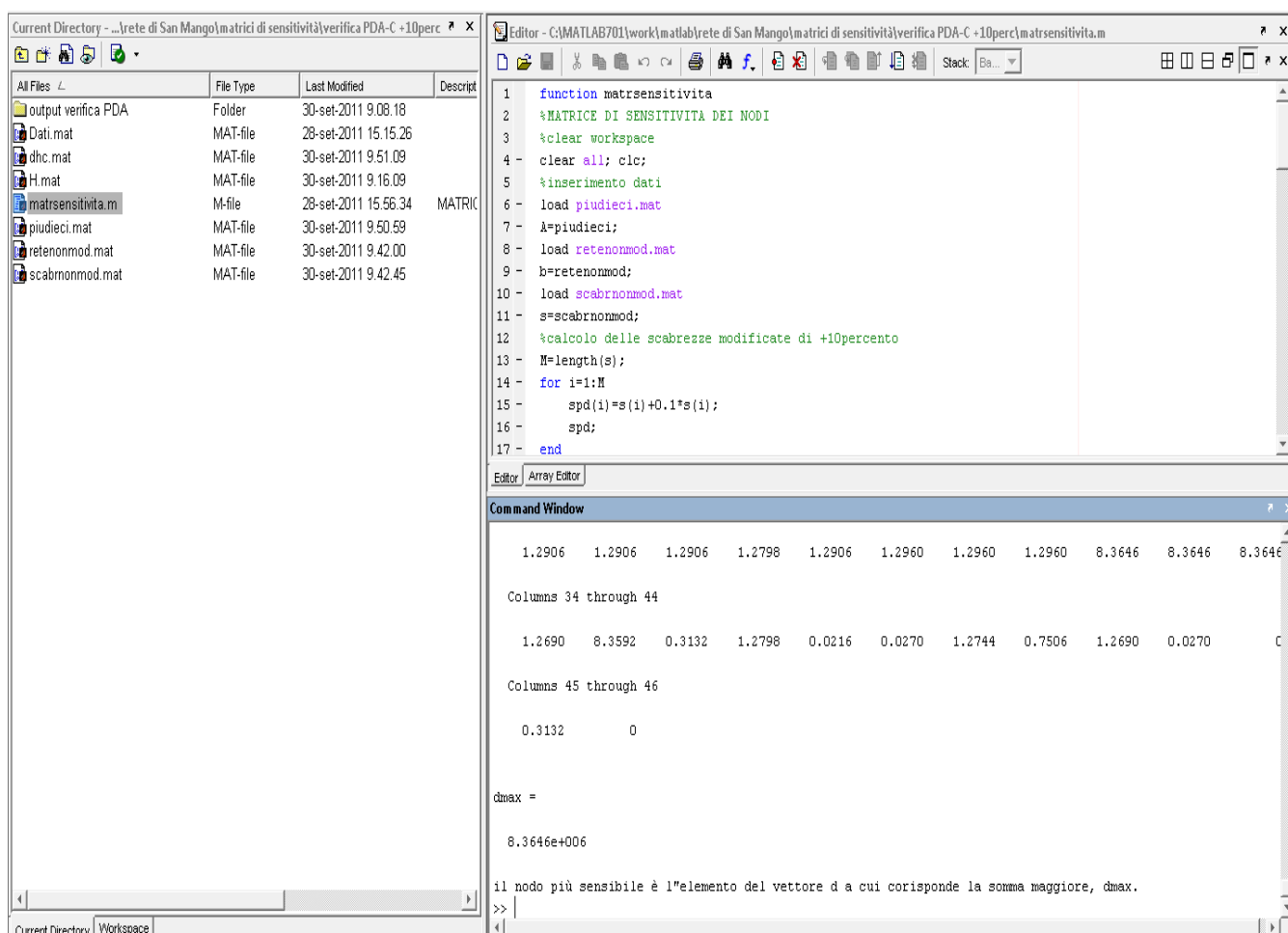


Figura 5.12 schermata Matlab del codice delle matrici di sensitività – scabrezza incrementata del 10%

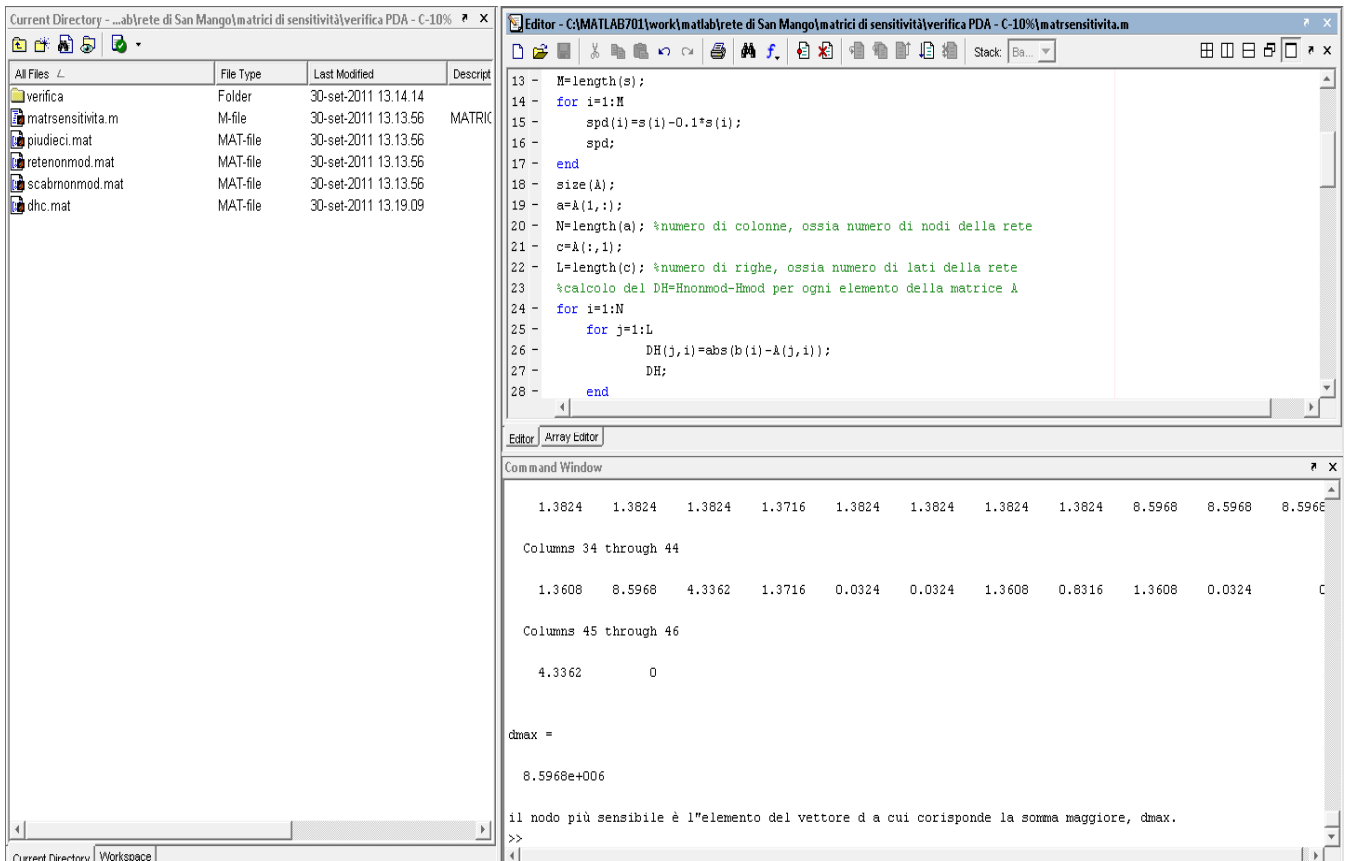


Figura 5.13 schermata Matlab del codice delle matrici di sensitività – scabrezza decrementata del 10%

Tabella 5-23 nodi sensibili della rete

classi di scabrezza	scabrezza base [mm ]	scabrezza modificata	nodì sensibili
1	1	$\varepsilon' = \varepsilon + 10\% \varepsilon$	31, 32, 33
		$\varepsilon' = \varepsilon - 10\% \varepsilon$	31, 32, 33

I nodi maggiormente sensibili sono quelli ubicati in posizione estrema della rete, come evidenziato in Figura 5.14.

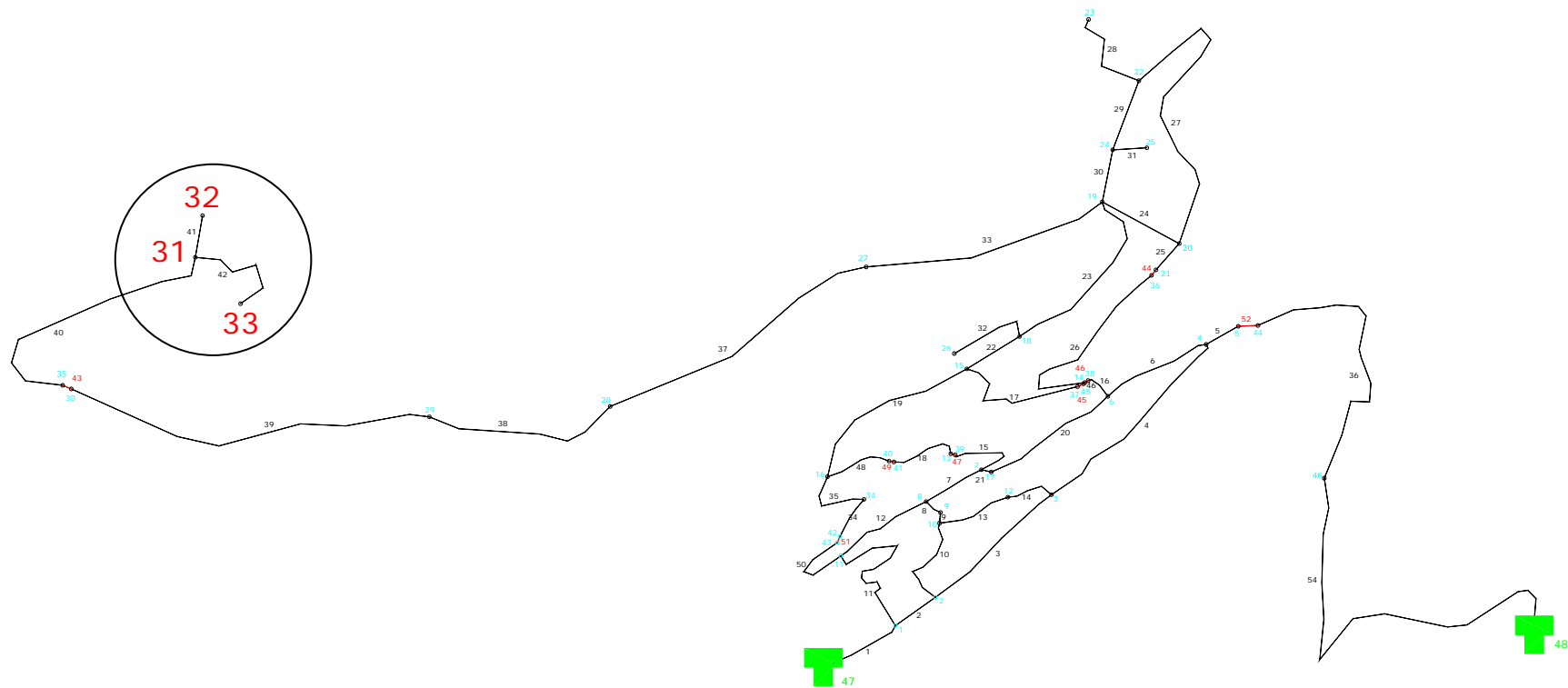


Figura 5.14 Ubicazione dei nodi sensibili della rete

#### 5.2.4 Calibrazione teorica della rete

Una volta terminata la verifica della rete, si è passati a testare il modello di calibrazione SCEM-UA, interno ad UNINET, per la prima volta su una rete reale.

Lo schema della rete è quello in precedenza descritto, nel quale si ribadisce sono installate otto valvole riduttrici di pressione ubicate nella parte bassa e opportunamente schematizzate in fase di definizione della rete in UNINET.

La fase di calibrazione ha inizio con la scelta arbitraria dei lati e/o dei nodi in cui si ipotizza di conoscere la misura di portata e/o di pressione. Nella fattispecie, i valori di portata e/o di pressione sono stati ricavati dalla verifica idraulica. Si è appurato, quindi, che il modello restituisse valori calibrati della scabrezza prossimi a quelli ipotizzati nella verifica. I risultati, ottenuti in termini di scabrezza calibrata ipotizzando di conoscere misure nei lati della rete, sono espressi in Tabella 5-24, Tabella 5-25 e Figura 5.15, nella quale sono messi a confronto i valori di scabrezza reale e calibrata e viene inoltre riportato l'andamento degli scarti per l'intera rete.

Tabella 5-24 valori calibrati di scabrezza, ipotizzando note misure di portata nei lati della rete

lato di misura	q calcolato [l/s]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
18	0.4	1	1.0246
5	0.17	1	1.5441
15	0.51461	1	1.2478
37	0.18	1	0.69581
31	0.14	1	1.9772
4	0.98334	1	0.93758
33	0.25	1	0.81428
38	0.18	1	0.77398
42	0.15	1	1.192
3	1.8361	1	0.97705
39	0.18	1	0.62057
40	0.17	1	0.76794
28	0.17	1	1.5353
23	1.23	1	no convergenza
14	0.56271	1	0.85308
12	-0.17205	1	1.2262
24	0.17529	1	1.0966
19	1.84	1	1.2948
20	-0.046662	1	1.2816
43	0.17	1	0.69084
46	0.15	1	0.32824
47	0.51461	1	1.2342

Tabella 5-25 valori dello scarto relativo tra grandezza ipotizzata e grandezza calibrata

lato di misura	q calcolato [l/s]	num. lati	scarto relativo	$\Sigma$ scarto
18	0.4	54	0.0246	1.33
5	0.17		0.5441	29.38
15	0.51461		0.2478	13.38
37	0.18		0.30419	16.43
31	0.14		0.9772	52.77
4	0.98334		0.06242	3.37
33	0.25		0.18572	10.03
38	0.18		0.22602	12.21
42	0.15		0.192	10.37
3	1.8361		0.02295	1.24
39	0.18		0.37943	20.49
40	0.17		0.23206	12.53
28	0.17		0.5353	28.91
23	1.23		no convergenza	no convergenza
14	0.56271		0.14692	7.93
12	-0.17205		0.2262	12.21
24	0.17529		0.0966	5.22
19	1.84		0.2948	15.92
20	-0.046662		0.2816	15.21
43	0.17		0.30916	16.69
46	0.15		0.67176	36.28
47	0.51461		0.192	10.37

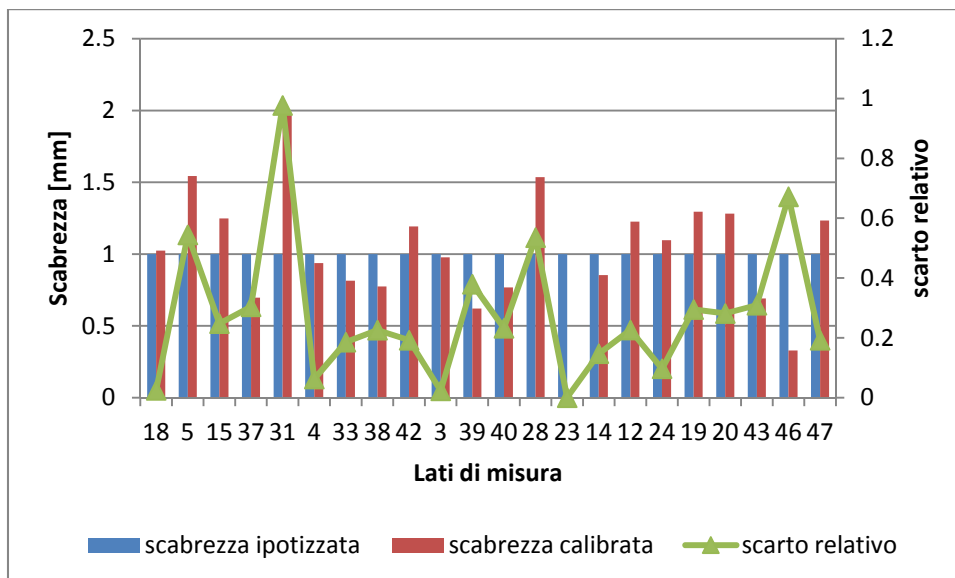


Figura 5.15 grafico di confronto tra scabrezza ipotizzata e calibrata

Analogamente, si sono determinati i valori di scabrezza calibrata, calcolati ipotizzando di conoscere misure di pressione ai nodi della rete. I risultati sono riportati in Tabella 5-26, Tabella 5-27 e in Figura 5.16, che mostra il confronto tra scabrezza ipotizzata e calibrata.

Tabella 5-26 valori calibrati di scabrezza, ipotizzando note le misure ai nodi della rete

nodo di misura	H calcolato [m]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
4	551.83	1	1.0413
14	474.21	1	no convergenza
28	482.65	1	1.0837
33	226.45	1	1.1396
8	551.87	1	1.1078
32	226.52	1	1.1123
30	482.48	1	1.1016
31	226.52	1	1.1123
34	484.16	1	1.0383
20	482.86	1	1.1031
16	483.97	1	1.0797
38	551.8	1	1.1069
40	483.97	1	1.0947
42	484.31	1	1.0947
19	482.89	1	1.0779
11	551.88	1	1.0817

Tabella 5-27 valori dello scarto relativo tra grandezza ipotizzata e grandezza calibrata

nodo di misura	H calcolato [m]	num. lati	scarto relativo	$\sum$ scarto
4	551.83	54	0.0413	2.2302
14	474.21		no convergenza	no convergenza
28	482.65		0.0837	4.5198
33	226.45		0.1396	7.5384
8	551.87		0.1078	5.8212
32	226.52		0.1123	6.0642
30	482.48		0.1016	5.4864
31	226.52		0.1123	6.0642
34	484.16		0.0383	2.0682
20	482.86		0.1031	5.5674
16	483.97		0.0797	4.3038
38	551.8		0.1069	5.7726
40	483.97		0.0947	5.1138
42	484.31		0.0947	5.1138
19	482.89		0.0779	4.2066
11	551.88		0.0817	4.4118

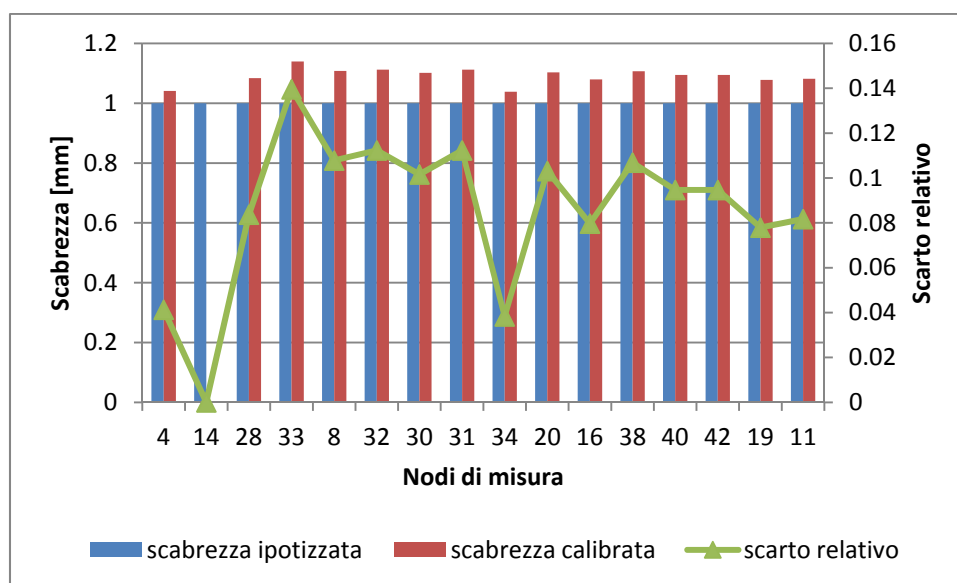


Figura 5.16 grafico di confronto tra scabrezza ipotizzata e calibrata

Come evidente dai risultati, l'utilizzo del modello ha consentito di ottenere risultati soddisfacenti, poiché la scabrezza calibrata è risultata prossima a quella ipotizzata. Gli errori massimi che si possono commettere, infatti, forniscono comunque valori di scabrezza sufficientemente attendibili (Tabella 5-28). Inoltre, come già ottenuto dalla calibrazione di reti di letteratura, (riportato nel capitolo 4 al par. 1 e in Veltri et al., 2012a), anche da questa analisi, risulta preferibile effettuare calibrazioni di reti utilizzando misure di pressione ai nodi, piuttosto che di portata ai lati. Ciò è evidente analizzando quanto riportato in Tabella 5-28, dove lo scarto medio tra scabrezza ipotizzata e calibrata ipotizzando di conoscere misure ai lati della rete, è tre volte superiore allo scarto medio ottenuto ipotizzando di conoscere misure ai nodi.

Tabella 5-28 confronto tra scarti minimo, medio e massimo

	Scarti		
	minimo	medio	massimo
<b>Lati</b>	0.02	0.29	0.98
<b>Nodi</b>	0.04	0.09	0.14

### 5.3 Modellazione e calibrazione con dati di campo della rete di Amantea

#### 5.3.1 Descrizione della rete

La rete oggetto di studio rappresenta una parte della rete del comune di Amantea, poiché serve solo tre contrade su un totale di nove. Il territorio comunale di Amantea, infatti, può pensarsi suddiviso nelle seguenti zone (Tabella 5-29 e Figura 5.17).



Tabella 5-29 Suddivisione in zone del Comune di Amantea

Zona	Denominazione	Popolazione
A	Centro Storico	700 abitanti
B	Marina Nord	3.400 abitanti
C	Marina Sud	2.000 abitanti
D	S. Maria	800 abitanti
E	Coreca – Marinella	400 abitanti
F	Campora Nord	600 abitanti
G	Campora Centro	2.000 abitanti
H	Campora Sud	1.300 abitanti
I	Acquicella	1.961 abitanti
	Totale	13.261 abitanti

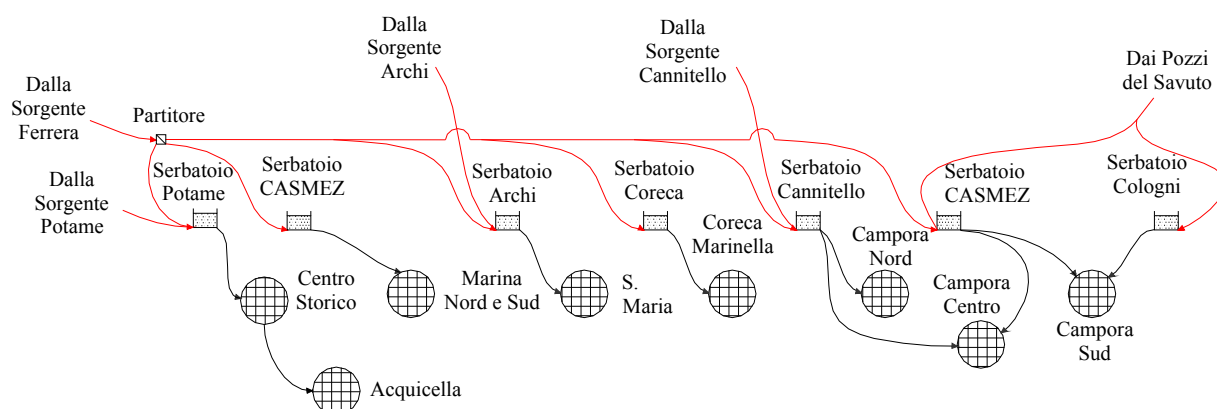


Figura 5.17 schema funzionale della rete

Il caso analizzato in questo lavoro di tesi riguarda le zone di Marina nord, Marina sud e un tratto intermedio fra le due, servite dal serbatoio dell'ex-CASMEZ di capacità pari a 800 m<sup>3</sup>, ubicato a quota 70 m s.l.m..

La rete si sviluppa per gran parte in una zona pianeggiante (Figura 5.18) a quota leggermente superiore al livello del medio mare. Le condotte sono state posate contemporaneamente allo sviluppo urbanistico della città. La gran parte della rete è quindi costituita da tubi in ghisa, dell'età di circa trenta anni, mentre qualche ramificazione secondaria è stata posta in opera in anni più recenti e con materiali diversi. Come mostrato in Figura 5.19, complessivamente si contano:

- 55 rami di condotta;
- 39 nodi;
- 1 serbatoio.



Figura 5.18 Abitato di Amantea

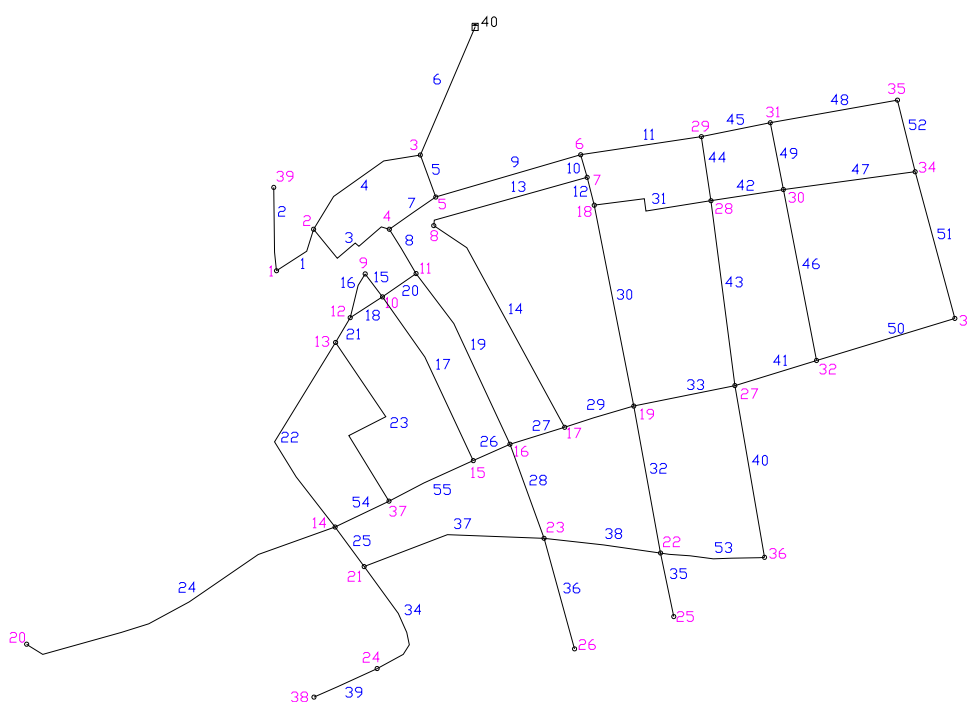


Figura 5.19 schema idrico della rete di interesse

La lunghezza complessiva della rete è di circa 7200 m, di cui il 2.5% in acciaio e la restante parte in ghisa. Per quanto riguarda la distribuzione dei diametri, circa il 18% ha DN pari a 80 mm, il 37% DN 100 mm, il 15% DN 125 mm, il 9% DN 150 mm e infine il 20% ha DN 200 mm. La dotazione idrica media stimata è pari a 300 l/ab/d.

La stima della popolazione che insiste su questo tratto di acquedotto risulta di difficile quantificazione, essendo il centro urbano caratterizzato sia dalla presenza di numerose attività

commerciali, ricreative, scuole e edifici pubblici, sia da un certo numero di abitanti non residenti, ma domiciliati nelle numerose abitazioni sfitte presenti. Al fabbisogno necessario per gli abitanti residenti, quindi, bisogna aggiungere la risorsa necessaria per alimentare l'ulteriore aliquota di popolazione.

Per ovviare a questo deficit di conoscenza, difficile da colmare anche consultando gli uffici comunali, si è scelto di considerare due diverse distribuzioni di popolazione:

- 1) Si considerano i soli abitanti residenti nell'area di interesse, per un totale di 3400 abitanti;
- 2) In dipendenza del periodo di analisi preso come riferimento, si considera un numero di abitanti pari a 10000 unità concentrati nell'area di interesse.

### 5.3.1.1 Calcolo della portata media giornaliera

La portata transitante in rete è stata stimata considerando gli abitanti presenti nella sottoarea considerata e distribuendo uniformemente la portata sui nodi della rete.

La portata erogata al singolo nodo si è ipotizzata pari a  $Q_{nodi} = Q/N$ , dove N è il numero di nodi della rete.

Sotto queste ipotesi, la portata transitante nella rete è pari a 67.55 l/s distribuita per come riportato nella seguente Tabella 5-30:

Tabella 5-30 distribuzione degli abitanti per ogni sottozona servita

Denominazione zona	d [l/ab/d]	P	$Q_{tot}$ [l/s]	N	$Q_{nodo}$ [l/s]
Marina Nord	300	3400	26,56	23	1,15
Zona intermedia	300	2086	16,30	6	2,71
Marina Sud	300	2000	15,63	10	1,56

Nelle successive Tabella 5-31 e Tabella 5-32 sono riportate le caratteristiche geometriche dei tratti e idrauliche dei nodi, mentre in Tabella 5-33 sono riportate le caratteristiche altimetriche e piezometriche del serbatoio di alimentazione.

Tabella 5-31: caratteristiche delle condotte della rete

lat	start	end	L	Diametro	scabrezza	lat	start	end	L	Diametro	scabrezza
1	1	2	40	80	0.8	29	17	19	75	200	0.8
2	1	39	90	80	0.8	30	18	19	195	150	0.8
3	2	4	130	80	0.8	31	18	28	120	150	0.8
4	2	3	190	100	0.8	32	19	22	150	100	0.8
5	3	5	50	200	0.8	33	19	27	95	200	0.8
6	40	3	180	200	0.8	34	21	24	110	100	0.8
7	4	5	50	200	0.8	35	22	25	80	100	0.8
8	4	11	45	125	0.8	36	23	26	105	100	0.8

9	5	6	170	200	0.8	37	23	21	220	125	0.8
10	6	7	25	150	0.8	38	23	22	130	125	0.8
11	6	29	115	200	0.8	39	24	38	100	80	0.8
12	7	18	35	150	0.8	40	27	36	180	80	0.8
13	8	7	180	100	0.8	41	27	32	90	200	0.8
14	8	17	220	100	0.8	42	28	30	75	150	0.8
15	9	10	45	200	0.8	43	28	27	160	80	0.8
16	9	12	50	100	0.8	44	29	28	60	100	0.8
17	10	15	195	200	0.8	45	29	31	65	200	0.8
18	10	12	55	150	0.8	46	30	32	155	200	0.8
19	11	16	200	125	0.8	47	30	34	130	150	0.8
20	11	10	55	150	0.8	48	31	35	130	100	0.8
21	12	13	40	100	0.8	49	31	30	60	200	0.8
22	13	14	240	80	0.8	50	32	33	135	100	0.8
23	13	37	205	100	0.8	51	33	34	150	100	0.8
24	14	20	250	100	0.8	52	34	35	65	100	0.8
25	14	21	80	100	0.8	53	36	22	110	100	0.8
26	15	16	50	200	0.8	54	37	14	50	125	0.8
27	16	17	75	200	0.8	55	37	15	100	125	0.8
28	16	23	100	100	0.8						

Tabella 5-32: caratteristiche dei nodi della rete

nodo	Q [l/s]	nodo	Q [l/s]
1	1.1549	21	1.1549
2	1.1549	22	2.7174
3	1.1549	23	1.1549
4	1.1549	24	1.1549
5	1.1549	25	2.7174
6	2.7174	26	1.1549
7	2.7174	27	1.5625
8	1.1549	28	1.5625
9	1.1549	29	1.5625
10	1.1549	30	1.5625
11	1.1549	31	1.5625
12	1.1549	32	1.5625
13	1.1549	33	1.5625
14	1.1549	34	1.5625
15	1.1549	35	1.5625
16	1.1549	36	1.5625
17	1.1549	37	1.1549
18	2.7174	38	1.1549
19	2.7174	39	1.1549
20	1.1549		

Tabella 5-33: caratteristiche del serbatoio

numero serbatoio	quota piezometrica [m]	quota terreno [m]
40	70	65

### 5.3.2 Verifica in condizioni DDA (Demand Driven Analysis)

Utilizzando il modello di simulazione reti INetPDA, interno ad UNINET, è stata condotta la verifica della rete che ha evidenziato un comportamento di tipo DDA (Demand Driven Analysis).

Dalla verifica sono stati ottenuti i valori calcolati di portate in condotta e di pressioni ai nodi, ma, ai fini della presente ricerca, si riportano in Tabella 5-34, Tabella 5-35 e Tabella 5-36 i risultati relativi esclusivamente ai carichi ai nodi, in quanto costituiscono dati di input di seguito necessari per la calibrazione teorica della rete. I carichi riportati nelle seguenti tabelle sono stati calcolati facendo riferimento ad un'unica classe di scabrezza per l'intera rete con valori ipotizzati di 0.8 mm, 1 mm e 1.5 mm per ciascuna elaborazione.

Tabella 5-34 Carichi ai nodi calcolati da INetPDA con scabrezza ipotizzata di 0.8 mm

nodo	H [m]	nodo	H [m]	nodo	H [m]
1	64.16	14	62.26	27	62.56
2	64.37	15	62.55	28	62.67
3	65.44	16	62.55	29	62.76
4	64.27	17	62.55	30	62.65
5	64.4	18	62.7	31	62.69
6	62.99	19	62.55	32	62.58
7	62.81	20	62.15	33	62.56
8	62.6	21	62.01	34	62.61
9	62.61	22	61.98	35	62.61
10	62.61	23	62.01	36	61.98
11	62.92	24	61.83	37	62.36
12	62.59	25	61.8	38	61.69
13	62.46	26	61.97	39	64.03

Tabella 5-35 Carichi ai nodi calcolati da INetPDA con scabrezza ipotizzata di 1 mm

nodo	H [m]	nodo	H [m]	nodo	H [m]
1	63.77	14	61.75	27	62.07
2	63.99	15	62.06	28	62.18
3	65.14	16	62.06	29	62.28
4	63.89	17	62.06	30	62.16
5	64.03	18	62.21	31	62.20
6	62.53	19	62.06	32	62.09
7	62.34	20	61.63	33	62.07
8	62.11	21	61.48	34	62.12
9	62.11	22	61.45	35	62.12
10	62.12	23	61.48	36	61.45
11	62.44	24	61.29	37	61.85
12	62.09	25	61.25	38	61.14
13	61.96	26	61.43	39	63.63

Tabella 5-36 Carichi ai nodi calcolati da INetPDA con scabrezza ipotizzata di 1.5 mm

nodo	H [m]	nodo	H [m]	nodo	H [m]
1	62.94	14	60.66	27	61.02
2	63.2	15	61.01	28	61.15
3	64.5	16	61.01	29	61.27
4	63.08	17	61.01	30	61.13
5	63.24	18	61.18	31	61.18
6	61.54	19	61.01	32	61.04
7	61.32	20	60.53	33	61.03
8	61.07	21	60.36	34	61.08
9	61.07	22	60.31	35	61.08
10	61.07	23	60.35	36	60.31
11	61.44	24	60.13	37	60.78
12	61.05	25	60.09	38	59.97
13	60.89	26	60.3	39	62.79

### 5.3.3 Calibrazione teorica della rete

Una volta definite le caratteristiche geometriche e idrauliche della rete, è interessante indagare la capacità del modello UNINET di risolvere efficacemente il problema della calibrazione delle scabrezze in rete, note misure di portata e/o di pressione. Il primo approccio è stato di natura teorica: ottenuti i valori calcolati dei carichi ai nodi della rete dalla verifica Demand Driven Analysis, ai fini della valutazione della soluzione del problema di calibrazione, sono stati considerati i carichi corrispondenti a determinati nodi. I nodi sono stati scelti in modo da essere rappresentativi ciascuno delle varie sottozone in cui è stata empiricamente suddivisa la rete. In particolare i nodi scelti sono riportati in Tabella 5-37.

Tabella 5-37 Nodi scelti per la calibrazione teorica

<b>NODO</b>	16	30	19	6	18	11	4	14	33	34	38
-------------	----	----	----	---	----	----	---	----	----	----	----

Avendo assunto le caratteristiche e la topologia della rete, nell'ipotesi di un'unica classe di scabrezza, e, assunta nota ad ogni simulazione, una sola misura di carico ai nodi, è stata condotta questa prima fase di calibrazione teorica con il modello UNINET. Questa ha fornito i risultati riportati nella Tabella 5-38 e Tabella 5-39. Si porta in evidenza il fatto che nel nodo numero 34 il modello non riporta risultati, non essendosi verificata la convergenza del modello; ciò evidenzia che effettuare misure in quel nodo non fornirebbe informazioni attendibili sulla soluzione del problema.

Tabella 5-38 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata

nodo di misura	H calcolato [m]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
16	62.55	0.8	0.670
30	62.64	0.8	0.726
19	62.55	0.8	0.005
6	62.99	0.8	0.746
18	62.69	0.8	0.734
11	62.91	0.8	0.005
4	64.26	0.8	0.005
14	62.25	0.8	0.739
33	62.56	0.8	0.545
34	62.61	0.8	no convergenza
38	61.69	0.8	0.728

Tabella 5-39 scarti relativi tra scabrezza reale di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata

nodo di misura	H calcolato [m]	num. lati	scarto relativo	$\Sigma$ scarto
16	62.55	55	0.163	8.945
30	62.64		0.092	5.055
19	62.55		0.994	54.656
6	62.99		0.068	3.746
18	62.69		0.083	4.553
11	62.91		0.994	54.656
4	64.26		0.994	54.656
14	62.25		0.077	4.223
33	62.56		0.318	17.510
34	62.61		no convergenza	
38	61.69		0.090	4.974

I risultati mostrano tre differenti possibili soluzioni:

1. Corretta.
2. Scorretta.
3. Condizione di non convergenza.

La soluzione scorretta riporta valori di scabrezza calibrata che hanno due ordini di grandezza di differenza rispetto alla scabrezza ipotizzata, presentando uno scarto di circa il 100% (nodi numero 19, 11 e 4). La soluzione corretta, invece, presenta un ordine di grandezza pari a quello della scabrezza ipotizzata, con uno scarto massimo circa del 32% (nodo numero 33).

Questo risultato evidenzia la sensibilità del modello alla ubicazione plano-altimetrica del punto di misura, quindi non è possibile stabilire, con il modello UNINET, un criterio di immediato utilizzo

per poter individuare i nodi più sensibili della rete. Il processo di calibrazione deve quindi essere condotto ipotizzando diversi scenari di misura.

Perciò, al fine di testare la variazione della soluzione al problema, al variare dei valori dei parametri incogniti, dopo questa prima fase di calibrazione della scabrezza della rete, per la quale si è ipotizzato un valore di 0.8 mm, sono state condotte altre due condizioni di calibrazione; ossia, dai risultati ottenuti dalla precedente simulazione e quindi eliminando i casi di non convergenza della soluzione, nonché i casi di scarti eccessivi tra grandezza ipotizzata e quella calcolata, sono state effettuate altre due fasi di calibrazione ipotizzando un'unica classe di scabrezza, con valori rispettivamente di 1mm e 1.5 mm. I nodi utilizzati per le due successive fasi di calibrazione sono riportati in Tabella 5-40 e in Figura 5.20, mentre i risultati in Tabella 5-41, Tabella 5-42, Tabella 5-43 e Tabella 5-44 .

**Tabella 5-40 Nodi scelti per le calibrazioni delle scabrezze di 1 mm e 1.5 mm**

<b>NODO</b>	16	30	6	18	14	33	34	38
-------------	----	----	---	----	----	----	----	----

**Tabella 5-41 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 1 mm e scabrezza calcolata**

<b>nodo di misura</b>	<b>H calcolato [m]</b>	<b>scabrezza ipotizzata [mm]</b>	<b>scabrezza calibrata [mm]</b>
6	62.52	1	1.107
18	62.21	1	1.089
30	62.16	1	1.139
16	62.05	1	1.081
14	61.74	1	1.080
33	62.07	1	1.078
34	62.12	1	1.081
38	61.14	1	1.100

**Tabella 5-42 scarti relativi tra scabrezza reale di valore 1 mm e scabrezza calcolata**

<b>nodo di misura</b>	<b>H calcolato [m]</b>	<b>num. lati</b>	<b>scarto relativo</b>	<b><math>\sum</math> scarto</b>
6	62.52	55	0.107	5.880
18	62.21		0.089	4.901
30	62.16		0.139	7.645
16	62.05		0.081	4.472
14	61.74		0.080	4.384
33	62.07		0.078	4.312
34	62.12		0.081	4.428
38	61.14		0.100	5.483



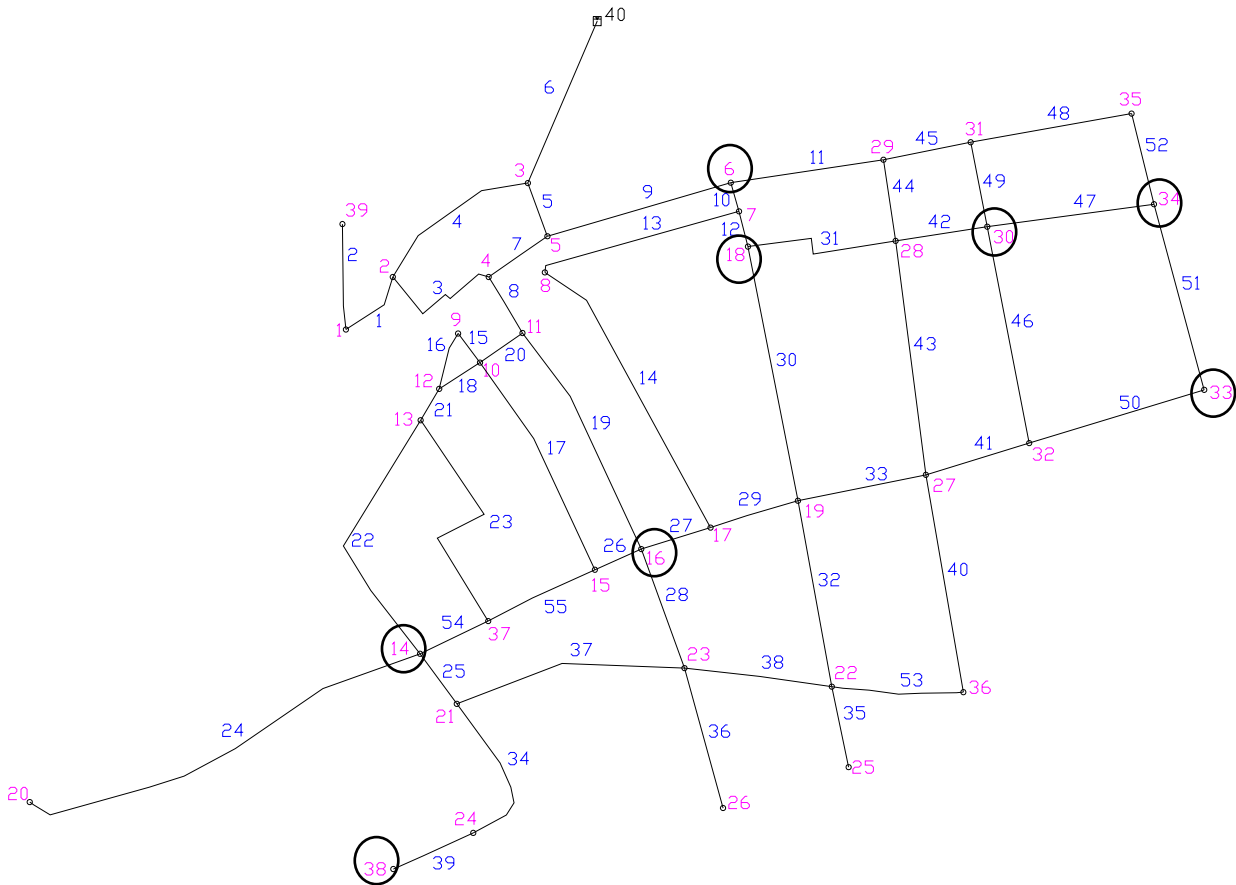


Figura 5.20 Planimetria della rete

Tabella 5-43 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 1.5 mm e scabrezza calcolata

nodo di misura	H calcolato [m]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
6	61.53	1.5	1.551
18	61.18	1.5	1.593
30	61.12	1.5	1.587
16	61.00	1.5	1.596
14	60.65	1.5	1.571
33	61.02	1.5	1.597
34	61.08	1.5	1.579
38	59.96	1.5	1.639

Tabella 5-44 scarti relativi tra scabrezza reale di valore 1.5 mm e scabrezza calcolata

nodo di misura	H calcolato [m]	num. lati	scarto relativo	$\Sigma$ scarto
6	61.53	55	0.034	1.866
18	61.18		0.062	3.414
30	61.12		0.058	3.179
16	61.00		0.064	3.527
14	60.65		0.047	2.585
33	61.02		0.064	3.542
34	61.08		0.053	2.897
38	59.96		0.092	5.078

In tal modo, dall'analisi teorica si deducono i nodi più sensibili in base allo scarto medio relativo tra grandezza reale e grandezza calcolata e in base alla scabrezza calcolata da UNINET. Tali nodi sono riportati in Tabella 5-45:

**Tabella 5-45 scarti e scabrezze calibrate delle tre calibrazioni teoriche**

εipotizzata = 0.8 mm			εipotizzata = 1 mm			εipotizzata = 1.5 mm		
nodo	scarto	εcalcolata [mm]	nodo	scarto	εcalcolata [mm]	nodo	scarto	εcalcolata [mm]
6	0.068	0.746	33	0.078	1.078	6	0.034	1.551
14	0.077	0.739	14	0.08	1.08	14	0.047	1.571
18	0.083	0.734	16	0.081	1.081	34	0.053	1.579
38	0.09	0.728	34	0.081	1.081	30	0.058	1.587
30	0.092	0.726	18	0.089	1.089	18	0.062	1.593
16	0.163	0.67	38	0.1	1.1	16	0.064	1.596
33	0.318	0.545	6	0.107	1.107	33	0.064	1.597
			30	0.139	1.139	38	0.092	1.639

In conclusione, il modello UNINET rappresenta un potente strumento di calibrazione di reti idriche, capace di individuare la scabrezza con un ragionevole margine di errore. Non consente però, in modo semplice dal punto di vista computazionale, di individuare precisamente il punto di misura maggiormente sensibile all'interno della rete. È necessario perciò affiancare un metodo meno oneroso dal punto di vista computazionale, quale il metodo delle matrici di sensitività.

### 5.3.4 Gerarchia dei nodi sensibili con le matrici di sensitività

In accordo con quanto effettuato per le reti teoriche, sono state calcolate le matrici di sensitività dei carichi ai nodi rispetto alla variazione della scabrezza. La verifica della rete è stata condotta in DDA e la scabrezza è stata fatta variare aumentandone e diminuendone il valore del 10%.

Nella Tabella 5-46, Tabella 5-47, Tabella 5-48, Tabella 5-49, Tabella 5-50 e Tabella 5-51 sono riportate le gerarchie dei nodi, dai più sensibili ai meno sensibili, rispettivamente per scabrezza supposta pari a 0.8 mm, 1 mm, 1.5 mm e sono evidenziati i nodi che sono scaturiti più sensibili dalla calibrazione in UNINET.

**Tabella 5-46 gerarchia dei nodi sensibili della rete con scabrezza di 0.8 mm**

Scabrezza ipotizzata = 0.8 mm					
Scabrezza modificata = 0.8 + 0.8*10%					
nodo	somma righe	nodi	somma righe	nodi	somma righe
38	156750	12	140250	18	138187
25	154687	15	140250	28	138187
24	154000	16	140250	31	137500
26	151937	19	140250	7	136125
22	151250	27	140250	29	136125

36	151250	32	140250	11	134062
21	150562	33	140250	6	132687
23	150562	8	140250	39	112750
20	147812	9	139562	1	110687
14	145750	10	139562	4	107937
37	144375	35	139562	2	107250
13	142312	34	138875	5	105875
17	140937	30	138875	3	86625

Tabella 5-47 gerarchia dei nodi sensibili della rete con scabrezza di 0.8 mm

Scabrezza ipotizzata = 0.8 mm					
Scabrezza modificata = $0.8 - 0.8 \cdot 10\%$					
nodo	somma righe	nodi	somma righe	nodi	somma righe
38	165000	9	147812	31	145750
25	162937	10	147812	30	145750
24	162250	17	147812	18	145062
22	159500	27	147812	29	144375
23	159500	33	147812	7	143000
26	159500	12	147812	11	141625
36	159500	15	147812	6	139562
21	158812	16	147812	39	119625
20	155375	8	147125	1	116875
14	154000	35	147125	4	114125
37	151937	32	147125	2	112062
13	150562	34	147125	5	112062
19	148500	28	146437	3	90750

Tabella 5-48 gerarchia dei nodi sensibili della rete con scabrezza di 1 mm

Scabrezza ipotizzata = 1 mm					
Scabrezza modificata = $1 + 1 \cdot 10\%$					
nodo	somma righe	nodi	somma righe	nodi	somma righe
38	140250	16	125950	28	123750
25	138600	12	125400	30	123750
24	138050	17	125400	31	123200
22	135850	27	125400	29	122100
26	135850	33	125400	7	121550
23	135300	19	125400	11	119900
36	135300	32	124850	6	118250
21	135300	8	124850	39	101200
20	132000	9	124850	1	99000
14	130350	10	124850	4	96800
37	128700	34	124850	2	95150
13	127050	35	124850	5	94600
15	125950	18	123750	3	77000

Tabella 5-49 gerarchia dei nodi sensibili della rete con scabrezza di 1 mm

Scabrezza ipotizzata = 1 mm					
Scabrezza modificata = $1 - 1*10\%$					
nodo	somma righe	nodi	somma righe	nodi	somma righe
38	147400	19	132000	28	129800
25	145750	9	131450	31	129800
24	144650	8	131450	18	129250
26	142450	10	131450	29	128150
36	142450	12	131450	7	127050
22	141900	15	131450	11	125950
23	141900	16	131450	6	124300
21	141350	27	131450	39	106700
20	138600	32	131450	1	104500
14	137500	33	131450	4	101200
37	135300	30	130350	2	100100
13	134200	34	130350	5	99550
17	132000	35	130350	3	80850

Tabella 5-50 gerarchia dei nodi sensibili della rete con scabrezza di 1.5 mm

Scabrezza ipotizzata = 1.5 mm					
Scabrezza modificata = $1.5 + 1.5*10\%$					
nodi	somma righe	nodi	somma righe	nodi	somma righe
38	114766	17	102300	30	100833
25	113666	27	102300	18	100100
24	112933	9	101933	31	100100
22	110733	33	101933	7	99000
26	110733	8	101933	29	99000
36	110733	12	101933	11	97900
21	110366	15	101933	6	96066
23	110366	16	101933	39	82500
20	107800	32	101933	1	80666
14	106700	10	101566	4	78466
37	105233	35	101200	2	77366
13	103766	34	101200	5	76633
19	102300	28	100833	3	62333

Tabella 5-51 gerarchia dei nodi sensibili della rete con scabrezza di 1.5 mm

Scabrezza ipotizzata = 1.5 mm					
Scabrezza modificata = $1.5 - 1.5*10\%$					
nodi	somma righe	nodi	somma righe	nodi	somma righe
38	120633	16	107433	18	105600
25	118800	17	107433	28	105600
24	118433	19	107433	31	105600
22	116233	12	107066	29	104500

26	116233	27	107066	7	103766
36	116233	32	107066	11	102300
21	115866	33	107066	6	101200
23	115866	8	106700	39	86900
20	113300	10	106700	1	85066
14	111833	34	106700	4	82500
37	110366	9	106700	2	81400
13	109266	35	106700	5	80666
15	107433	30	106333	3	65633

Dall'analisi di sensitività della rete, emerge che il nodo più sensibile è il nodo numero 38, indicato in Figura 5.21.

Con questo metodo è possibile prevedere i nodi più sensibili, in cui posizionare gli strumenti di misura. In tal modo si può procedere alla progettazione di una vera e propria campagna di misura, necessaria all'acquisizione dei dati di campo utili ai fini della calibrazione della rete, applicando il modello UNINET.

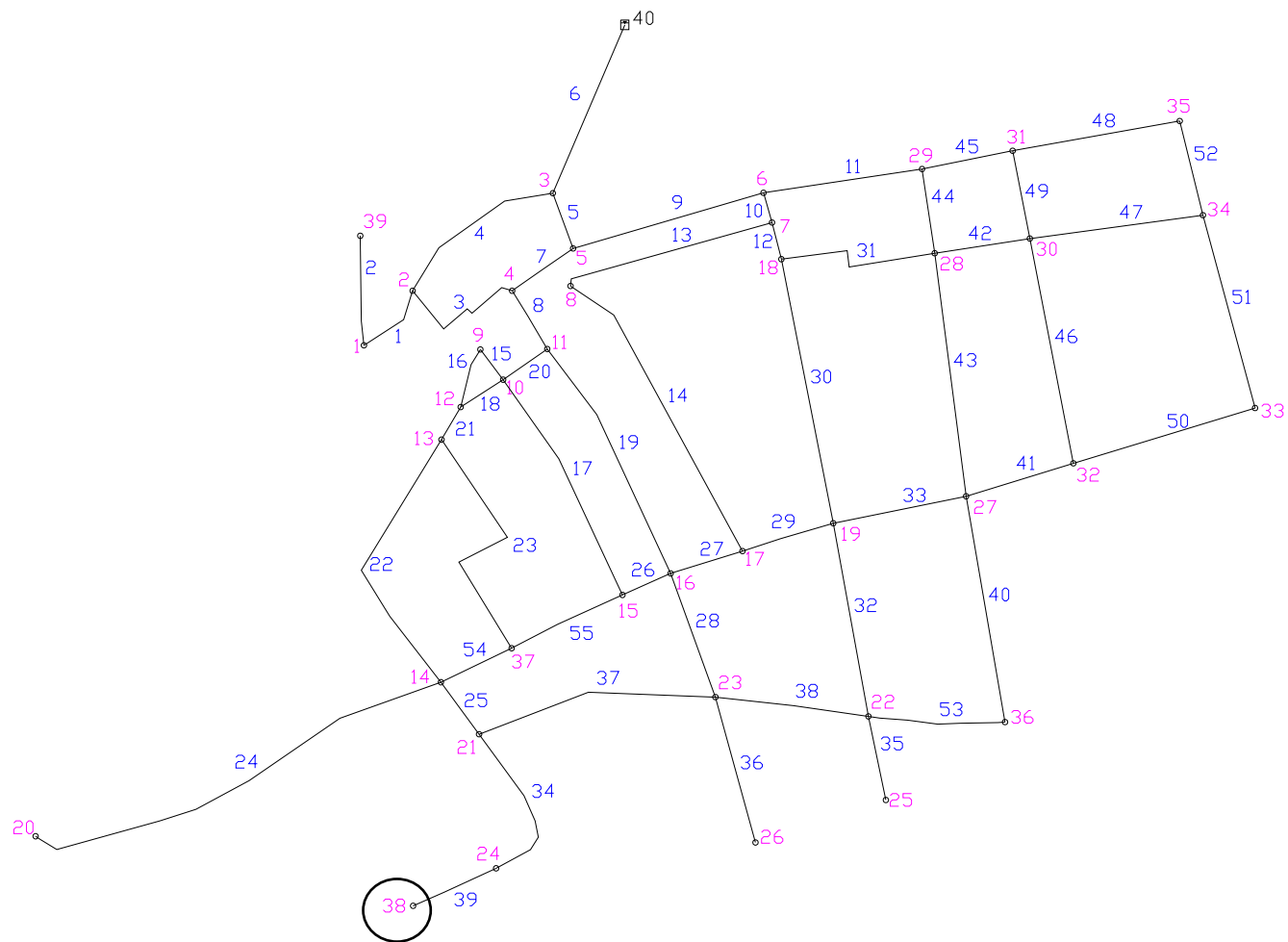


Figura 5.21 Ubicazione del nodo più sensibile della rete

### 5.3.5 Descrizione della campagna di misura

La campagna di misura qui descritta e in seguito utilizzata, è stata eseguita dal 21/12/2000 al 3/8/2001.

Per effettuare in situ le misure necessarie alla calibrazione della rete si è proceduto alla progettazione e quindi all'acquisto e successiva installazione di un'idonea strumentazione sulla rete.

La progettazione è stata suddivisa in due fasi portate avanti contemporaneamente:

- Scelta della strumentazione da installare.
- Individuazione dei punti di misura.

Il progetto della rete di monitoraggio ha previsto l'installazione di strumenti per misurare il livello idrico nel serbatoio cosiddetto CASMEZ (capacità 800 m<sup>3</sup>) e la portata in uscita dallo stesso. Inoltre è stata prevista la misura in continuo della portata in alcune condotte e della pressione in alcuni punti della rete.

I criteri su cui si è basata la scelta dei misuratori sono stati i seguenti:

- Limitazione delle perdite di carico dovute all'installazione, per cui sono stati scartati i misuratori di portata a strozzamento.
- Funzionamento degli strumenti senza ricorrere ad allacciamento alla rete elettrica, dando la preferenza ad apparecchi alimentati mediante batteria interna.
- Possibilità di registrare i dati in formato numerico per un periodo di almeno qualche settimana.

In base ai criteri precedenti sono stati installati:

- 1 contatore a mulinello di Woltmann, tipo assiale sensibilizzato con lettura diretta a rulli numeratori (Figura 5.22) e predisposto e corredato di emettitore di impulsi elettronico, all'uscita del serbatoio, su una condotta in ghisa del DN 200.



Figura 5.22 contatore a mulinello corredato di emettitore di impulsi installato al serbatoio Casmez

- 3 contatori a turbina a getto unico in Classe C, predisposti e corredati di emettitori di impulsi elettronici (Figura 5.23), posizionati su tre condotte della rete del DN 100.

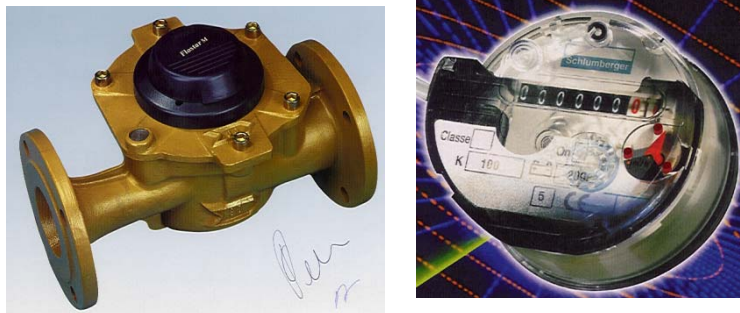


Figura 5.23 Contatore a turbina corredato di emettitore di impulsi installato lungo le condotte

- 4 data logger (Figura 5.24) idonei per la memorizzazione del segnale analogico della portata inviato dall'emettitore di impulsi e per la registrazione della pressione rilevata da un trasduttore installato all'interno dello stesso strumento. Detti strumenti possono essere connessi a un PC per il trasferimento dei dati e la programmazione dei parametri e comprendono un software.



Figura 5.24 Data Logger

- Strumenti di misura di portata e pressione del tipo SAICOP (Figura 5.25), in corrispondenza degli idranti e da tenere in esercizio solo durante prove con durata limitata, che consentono di acquisire, all'atto della effettuazione di una prova, la misura della pressione e della portata in corrispondenza dei nodi dei erogazione.





Figura 5.25 misuratore SAICOP MP6

Tale tipo di scelta ha consentito la contemporanea misura del livello nel serbatoio in quanto all'uscita dallo stesso, trascurando le perdite di carico concentrate, la misura di pressione coincide a meno del peso specifico dell'acqua con quella del tirante idrico.

Il sistema di registrazione è stato predisposto in maniera che gli emettitori ai contatori lungo la rete inviassero un segnale ogni 25 litri. Il data logger memorizza i dati ricevuti in intervalli di 5 minuti. L'emettitore al contatore presso il serbatoio invia un segnale ogni 100 litri e il data logger memorizza i dati ricevuti in intervalli di 10 minuti.

Ne consegue che l'autonomia di registrazione è diversa per i due siti: al serbatoio è stato possibile effettuare la fase di scarico dei risultati ogni 30 giorni, mentre lungo le condotte ogni 15 giorni.

La campagna ha previsto la registrazione della misura di livello e di portata in uscita dal serbatoio e della pressione e della portata in prefissati punti dei lati della rete sottoposti a monitoraggio (Figura 5.26). È evidente che il numero ridotto di punti sottoposto a monitoraggio è stato imposto dall'ammontare dei finanziamenti disponibili.

Inoltre si è proceduto alla misura contemporanea della pressione e, indirettamente, della portata per periodi limitati di tempo, in tre nodi provvisti di idranti.

Al serbatoio le misure sono state effettuate a intervalli di 10 minuti, mentre lungo le condotte a intervalli di 5 minuti. È stato perciò possibile rilevare l'andamento temporale delle grandezze.

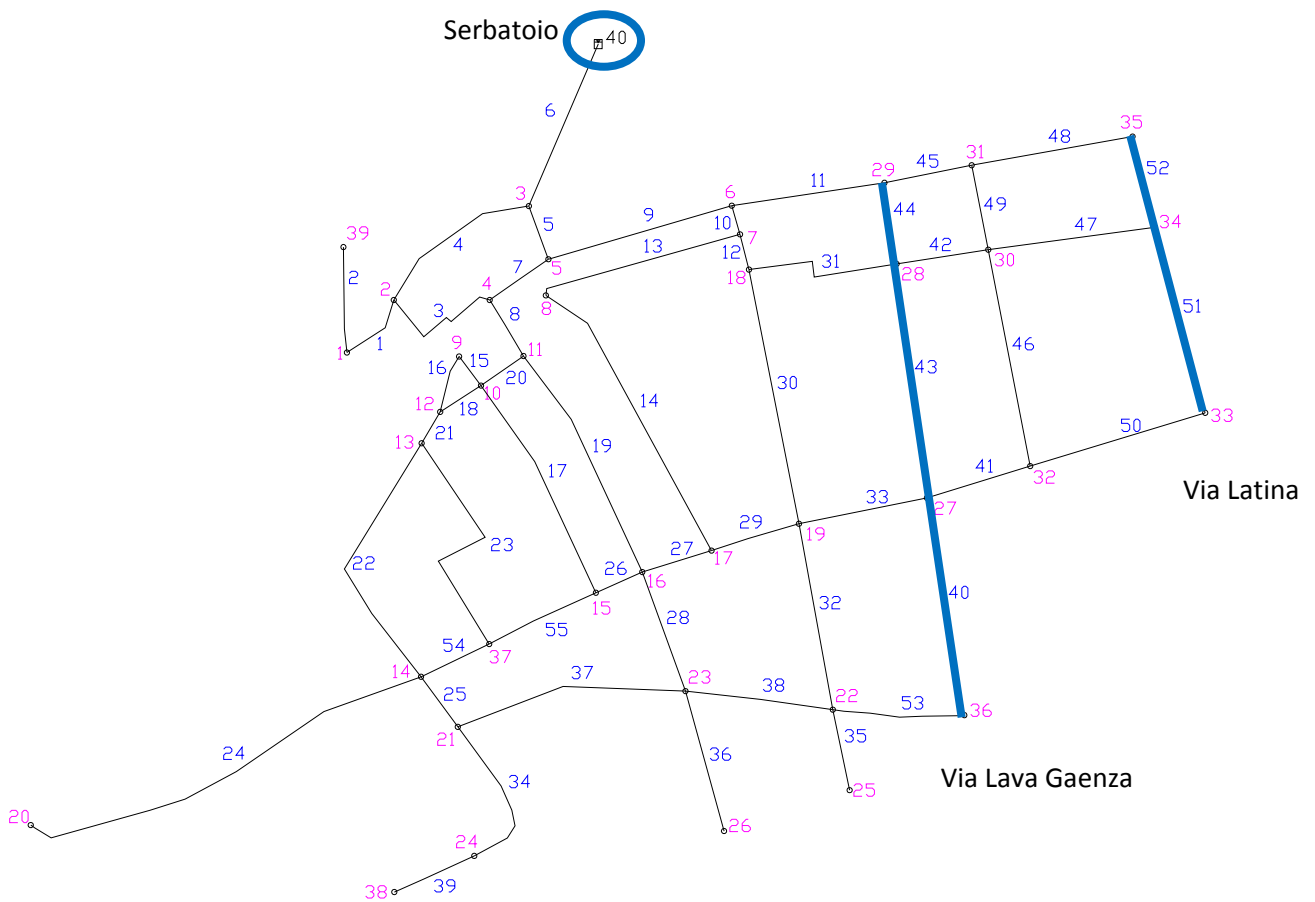


Figura 5.26 Individuazione delle zone di misura utilizzate

Per quanto riguarda via Latina sono a disposizione due serie di misure di portata per due distinti intervalli di tempo:

- Il primo (1) dal 15 novembre al 1 dicembre 2000.
- Il secondo (2) dal 2 dicembre al 20 dicembre 2000.

Si è inoltre considerato l'intero periodo per valutare se vi fossero state differenze tra il primo e il secondo intervallo di tempo.

I valori di portata e pressione minima media e massima rilevati da ciascuno strumento sono riportati nella Tabella 5-52.

Tabella 5-52 portate e pressioni registrate

Via Latina			
	Periodo 1	Periodo 2	Intero periodo
Portata Minima (l/s)	0,083	0,083	0,083
Portata Massima (l/s)	0,5	0,5	0,5
Portata Media (l/s)	0,286	0,272	0,279
Pressione minima (m)		43,5	43,5
Pressione massima (m)		53,5	53,5
Pressione media (m)		49,93	49,93

Via Lava Gaenza	
Portata Minima (l/s)	0,592
Portata Massima (l/s)	2,167
Portata Media (l/s)	1,209
Pressione minima (m)	50,00
Pressione massima (m)	66,50
Pressione media (m)	60,78

Serbatoio ex CASMEZ	
Portata Minima (l/s)	13,67
Portata Massima (l/s)	59,83
Portata Media (l/s)	29,64
Pressione minima (m)	2,50
Pressione massima (m)	5,50
Pressione media (m)	4,99

L'esame delle registrazioni mostra, per le portate andamenti simili nei diversi giorni. In ciascuna ora e per ciascuna stazione di misura si possono individuare i valori medi e quelli massimi e minimi registrati, come è riportato in Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29.

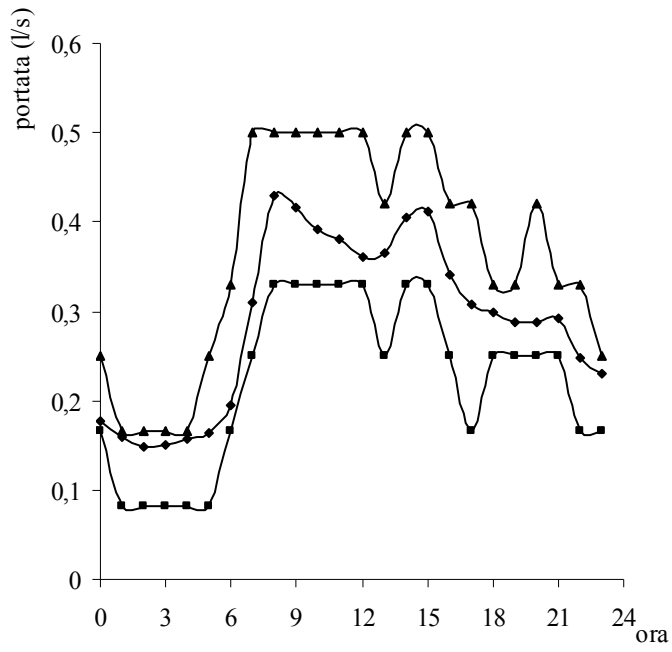


Figura 5.27 andamento orario delle portate minime, medie e massime registrate in via Latina

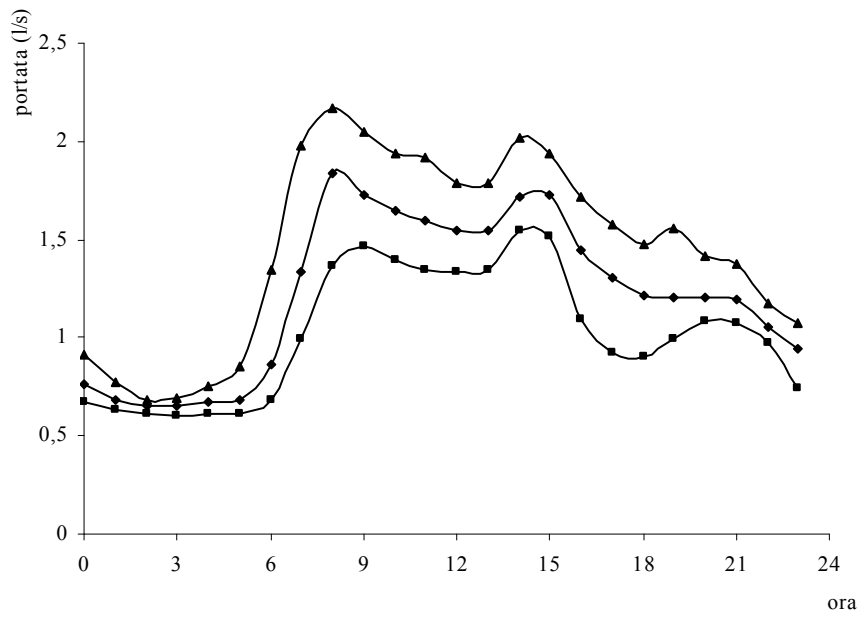


Figura 5.28 andamento orario delle portate minime, medie e massime registrate in via Lava Gaenza

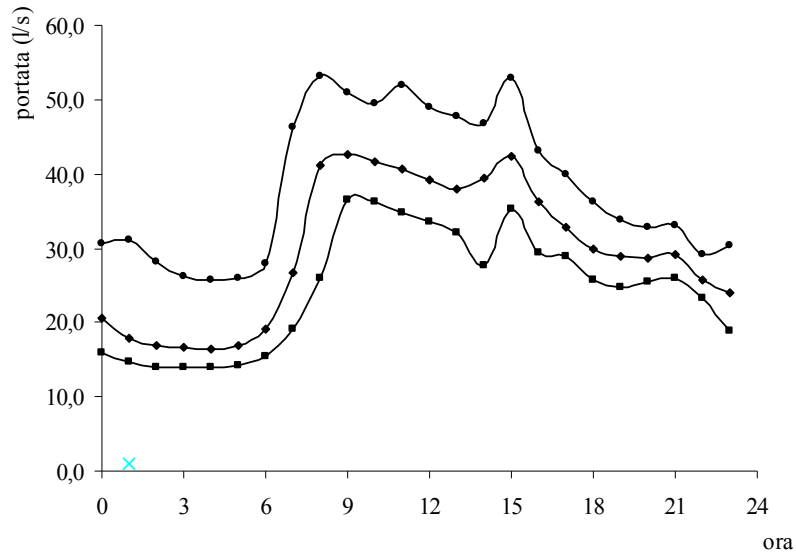


Figura 5.29 andamento orario delle portate minime, medie e massime registrate al serbatoio

Per le pressioni registrate in corrispondenza dei punti di misura si possono trarre analoghe conclusioni; in Figura 5.30, Figura 5.31 e Figura 5.32 si riportano i corrispondenti andamenti caratteristici.

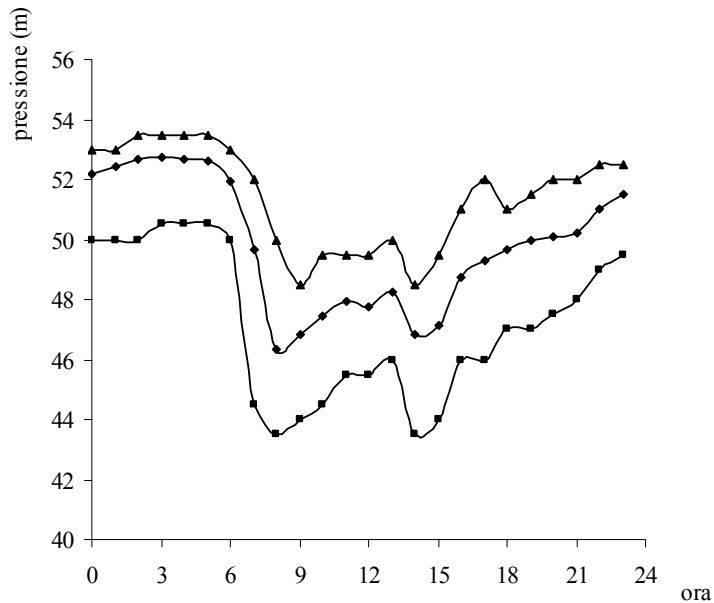


Figura 5.30 andamento orario delle pressioni minime, medie e massime registrate in via Latina

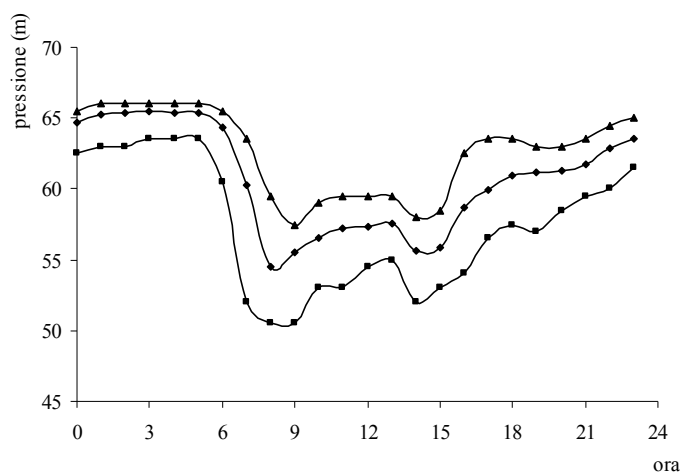


Figura 5.31 andamento orario delle pressioni minime, medie e massime registrate in via Lava Gaenza

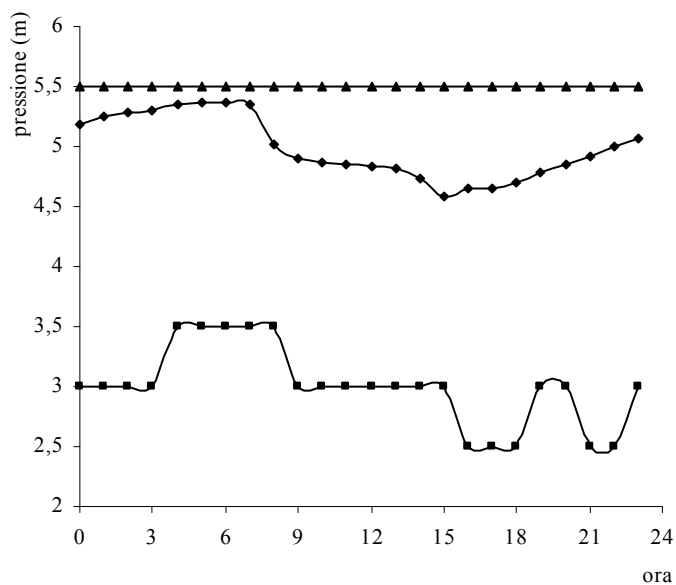


Figura 5.32 andamento orario delle pressioni minime, medie e massime registrate al serbatoio

Dalle figure emerge chiaramente, oltre alla corrispondenza fra i valori più elevati di pressione nelle ore di minor consumo, l'ampiezza della fascia fra i valori minimi e quelli massimi sia di portata sia di pressioni.

Inoltre l'analisi degli andamenti orari delle portate e delle pressioni fornisce interessanti indicazioni in merito alle modalità di prelievo e quindi alle caratteristiche delle utenze:

- I massimi di erogazione in corrispondenza della mattina e delle prime ore del pomeriggio;
- Per via Latina non si notano differenze apprezzabili né riguardo ai valori minimi, medi e massimi di portata per diversi periodi, né riguardo all'andamento orario delle portate e delle pressioni;
- Esiste una componente non trascurabile di acqua che viene prelevata anche durante le ore notturne che, non essendo giustificata dalla presenza di attività lavorative corrispondenti, potrebbe essere indice di perdite in rete, o di riempimento di cisterne e autoclavi private;
- C'è analogia di comportamento tra quanto registrato all'uscita del serbatoio e quanto rilevato nei punti di misura in rete.

### **5.3.6 Calibrazione della rete disponendo di misure reali**

Lo scopo dell'applicazione della metodologia di calibrazione con dati reali è stato quello di verificare la variabilità del valore calibrato della scabrezza sia considerando più misure in rete ad una fissata ora, sia considerando un unico punto di misura sottoposto a misura in più ore del giorno. La campagna di misure è stata eseguita dal 21/12/2000 al 03/08/2001 (Veltri P., Fiorini Morosini A., 2001).

Nel caso in esame sono stati considerati i dati misurati alle 00:00, 6:00, 12:00, 18:00, per un giorno tipo della settimana lavorativa (mercoledì). Sono state effettuate le calibrazioni note cinque misure (Figura 5.33):

- Una misura di pressione e una di portata in via Lava Gaenza.
- Una misura di pressione e una di portata in via Latina.
- Una misura di portata nel lato serbatoio, necessaria per comprendere la portata immessa in rete.

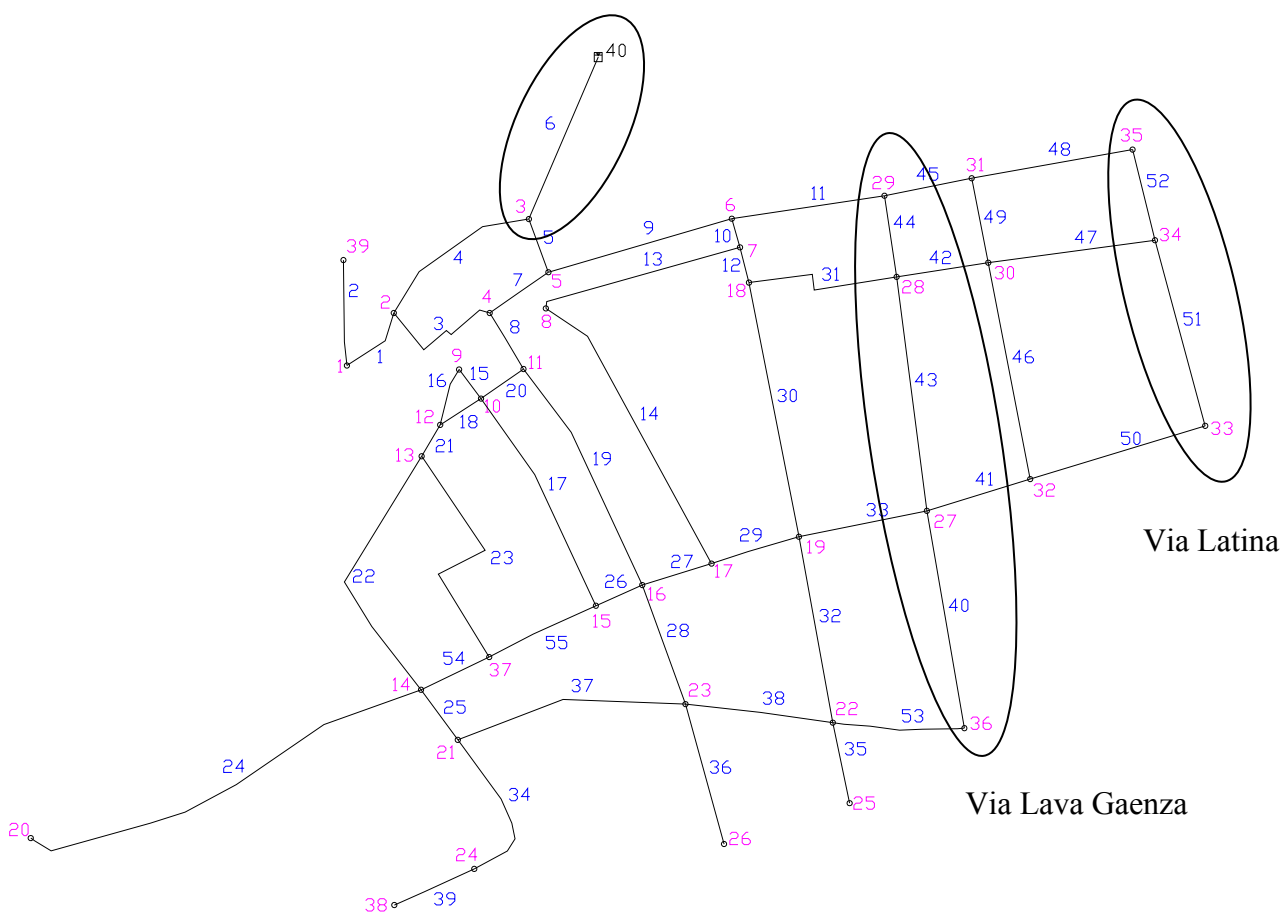


Figura 5.33 Individuazione dei punti di misura sulla rete

Per i primi due casi sono direttamente disponibili i dati misurati, mentre per il terzo caso, non disponendo delle misure del giorno in questione, è stata effettuata una media delle misure di portata di tutti i mercoledì della serie.

Le simulazioni sono state effettuate considerando pressioni e portate misurate nei nodi e lati riportati in Tabella 5-53 ed esaminando i diversi scenari di misure disponibili come meglio sintetizzato in Tabella 5-54.

Tabella 5-53 nodi e lati della rete oggetto della campagna di misura

<b>NODO</b>	28	34	
<b>LATO</b>	6	44	52

Tabella 5-54 scenari di misura

nodo di misura	Lato di misura	H [m]	q [l/s]
28, 34	6, 44, 52	63, 50	20.095, 0.074, 0.167
28, 34	-	63, 50	-
34	-	50	-
28	-	63	-
-	6	-	20.095



-	44	-	0.074
-	52	-	0.167
28	6, 44	63	20.095, 0.074
-	6, 44	-	20.095, 0.074

È stata condotta la calibrazione con il modello UNINET, che ha fornito i risultati riportati nella Tabella 5-55 e nella Tabella 5-56 alle ore 00:00.

**Tabella 5-55 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 00:00**

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 00:00					
nodo di misura	Lato di misura	H [m]	q [l/s]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
28, 34	6, 44, 52	63, 50	20.095, 0.074, 0.167	0.8	0.005
28, 34	-	63, 50	-	0.8	0.026
34	-	50	-	0.8	no convergenza
28	-	63	-	0.8	0.614
-	6	-	20.095	0.8	0.505
-	44	-	0.074	0.8	0.995
-	52	-	0.167	0.8	0.005
28	6, 44	63	20.095, 0.074	0.8	0.005
-	6, 44	-	20.095, 0.074	0.8	0.995

**Tabella 5-56 scarti relativi tra scabrezza reale di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 00:00**

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 00:00						
nodo di misura	lato di misura	H [m]	q [l/s]	num. lati	scarto relativo	∑ scarto
28, 34	6, 44, 52	63, 50	20.095, 0.074, 0.167	55	0.994	54.656
28, 34	-	63, 50	-		0.967	53.211
34	-	50	-		no convergenza	
28	-	63	-		0.232	12.775
-	6	-	20.095		0.369	20.300
-	44	-	0.074		0.244	13.406
-	52	-	0.167		0.994	54.656
28	6, 44	63	20.095, 0.074		0.994	54.656
-	6, 44	-	20.095, 0.074		0.244	13.406

Dalle elaborazioni effettuate utilizzando i dati misurati alle ore 00:00, si deduce che i risultati migliori, in termini di scabrezza calibrata, si ottengono misurando: il carico nel nodo 28, la portata nel lato 6, la portata nel lato 44 e le portate nei lati 6 e 44, come evidenziato in grigio nella Tabella

5-55 e nella Tabella 5-56. Da questi risultati si è proceduto a calibrare la rete ai rimanenti orari, ossia alle ore 6:00, 12:00 e 18:00. I risultati sono riportati in Tabella 5-57, Tabella 5-58, Tabella 5-59, Tabella 5-60, Tabella 5-61, Tabella 5-62.

Tabella 5-57 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 6:00

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 6:00					
nodo di misura	Lato di misura	H [m]	q [l/s]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
28	-	63.5	-	0.8	0.502
-	6	-	19.238	0.8	0.505
-	44	-	0.078	0.8	0.995
-	6, 44	-	19.238, 0.078	0.8	0.995

Tabella 5-58 scarti relativi tra scabrezza reale di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 6:00

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 6:00						
nodo di misura	lato di misura	H [m]	q [l/s]	num. lati	scarto relativo	$\Sigma$ scarto
28	-	63.5	-	55	0.373	20.488
-	6	-	19.238		0.369	20.281
-	44	-	0.078		0.244	13.406
-	6, 44	-	19.238, 0.078		0.244	13.406

Tabella 5-59 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 12:00

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 12:00					
nodo di misura	Lato di misura	H [m]	q [l/s]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
28	-	57.5	-	0.8	no convergenza
-	6	-	30.071	0.8	0.503
-	44	-	0.136	0.8	0.995
-	6, 44	-	30.071, 0.136	0.8	no convergenza

Tabella 5-60 scarti relativi tra scabrezza reale di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 12:00

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 12:00						
nodo di misura	lato di misura	H [m]	q [l/s]	num. lati	scarto relativo	$\Sigma$ scarto
28	-	57.5	-	55	no convergenza	
-	6	-	30.071		0.371	20.41875
-	44	-	0.136		0.244	13.40625
-	6, 44	-	30.071, 0.136		no convergenza	

Tabella 5-61 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 18:00

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 18:00					
nodo di misura	Lato di misura	H [m]	q [l/s]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
28	-	57.5	-	0.8	no convergenza
-	6	-	29.238	0.8	0.503
-	44	-	0.114	0.8	0.995
-	6, 44	-	29.238, 0.114	0.8	0.995

Tabella 5-62 scarti relativi tra grandezza reale di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 18:00

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 6:00						
nodo di misura	lato di misura	H [m]	q [l/s]	num. lati	scarto relativo	$\Sigma$ scarto
28	-	57.5	-	55	no convergenza	
-	6	-	29.238		0.371	20.41875
-	44	-	0.114		0.244	13.40625
-	6, 44	-	29.238, 0.114		0.244	13.40625

In sintesi i risultati ottenuti dalle calibrazioni eseguite sono riportati nella Tabella 5-63 e in Figura 5.34, Figura 5.35, Figura 5.36 e Figura 5.37.

Tabella 5-63 scenario di misura unico ad orari diversi

misura nodo 28		misura lato 6		misura lato 44		misure lati 6 e 44	
orari	Scabrezze calcolate [mm]	orari	scabrezze calcolate [mm]	orari	Scabrezze calcolate [mm]	orari	scabrezze calcolate [mm]
0	0.614	0	0.505	0	0.995	0	0.995
6	0.502	6	0.505	6	0.995	6	0.995
12	-	12	0.503	12	0.995	12	-
18	-	18	0.503	18	0.995	18	0.995

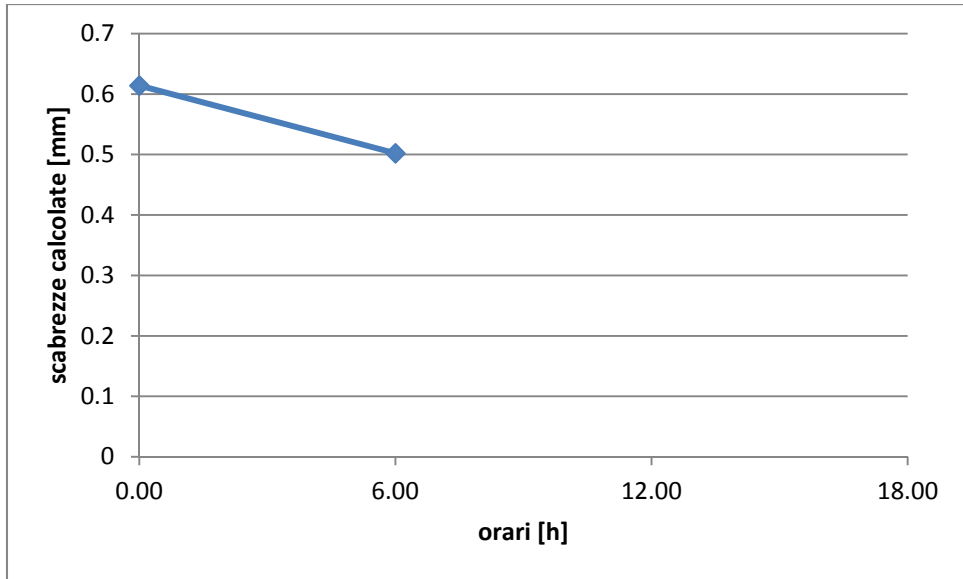


Figura 5.34 calibrazione ottenuta disponendo della misura (reale) nel nodo 28

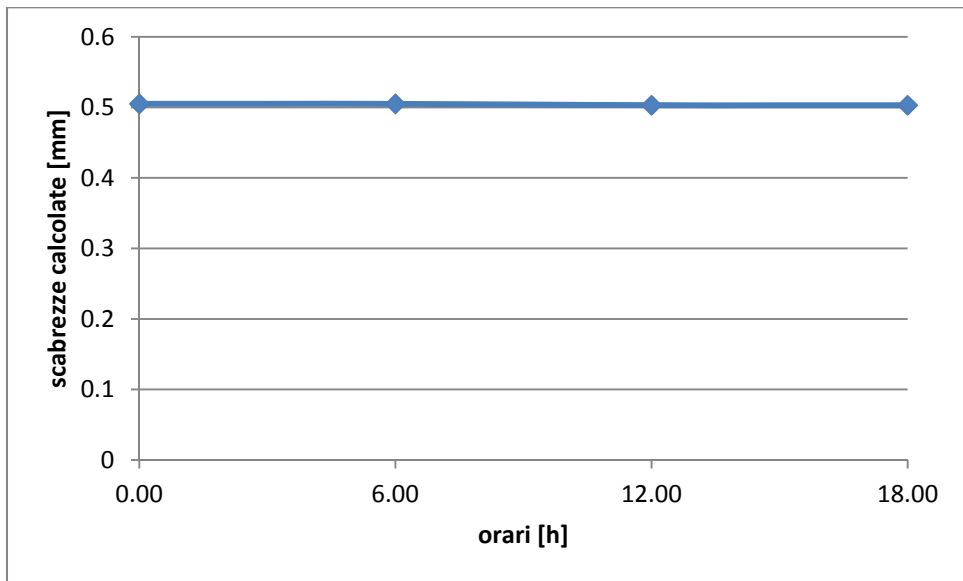


Figura 5.35 calibrazione ottenuta disponendo della misura (reale) nel lato 6

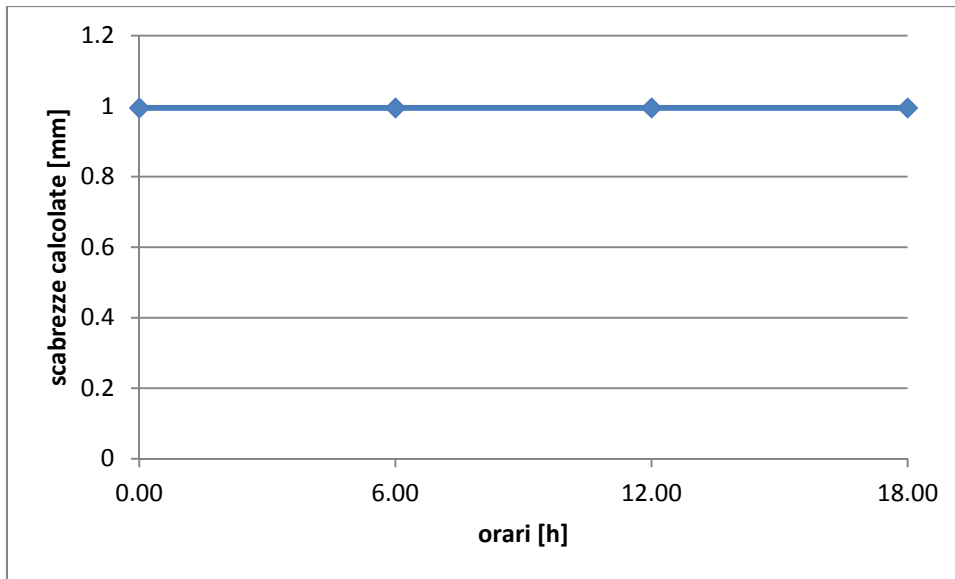


Figura 5.36 calibrazione ottenuta disponendo della misura (reale) nel lato 44

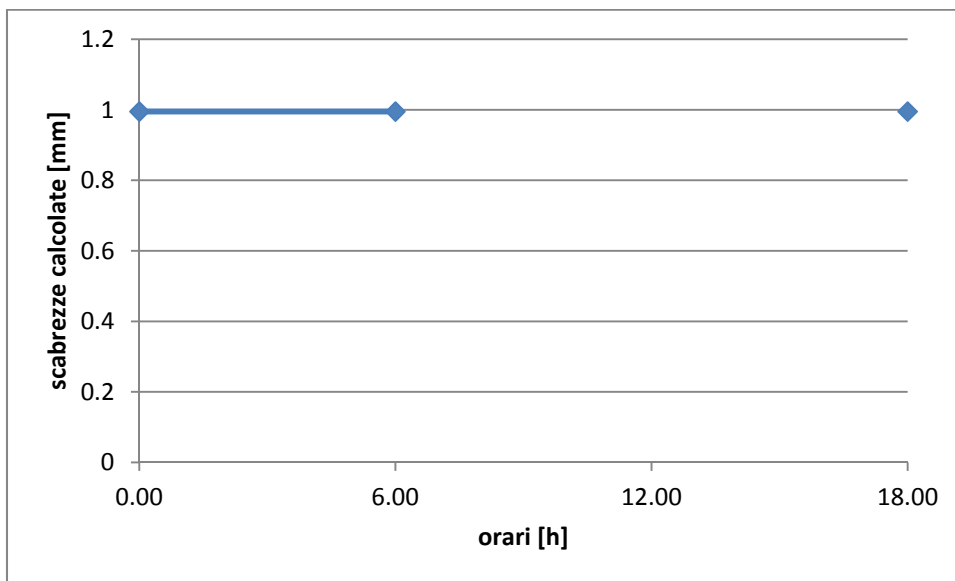


Figura 5.37 calibrazione ottenuta disponendo delle misure (reali) nei lati 6 e 44

Nella Tabella 5-64 e in Figura 5.38, Figura 5.39, Figura 5.40, Figura 5.41 è riportato l'andamento delle scabrezze calibrate al variare delle misure disponibili in rete ai seguenti prefissati orari:

- Ore 00:00
- Ore 6:00
- Ore 12:00
- Ore 18:00

Tabella 5-64 scenario di misura diversi ad un orario fissato

ore 00:00		ore 6:00		ore 12:00		ore 18:00	
lati e nodi	scabrezze calcolate [mm]	lati e nodi	scabrezze calcolate [mm]	lati e nodi	scabrezze calcolate [mm]	lati e nodi	scabrezze calcolate [mm]
nodo 28	0.614	nodo 28	0.502	nodo 28	-	nodo 28	-
lato6	0.505	lato6	0.505	lato6	0.503	lato6	0.503
lato 44	0.995	lato 44	0.995	lato 44	0.995	lato 44	0.995
lati 6 e 44	0.995	lati 6 e 44	0.995	lati 6 e 44	-	lati 6 e 44	0.995

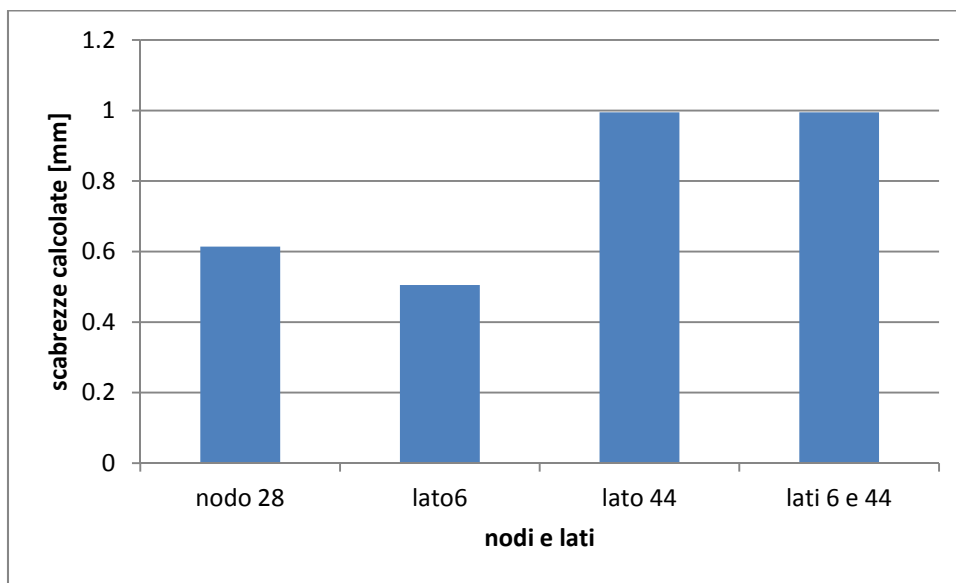


Figura 5.38 Andamento della scabrezza calibrata al variare delle misure disponibili in rete alle ore 00:00

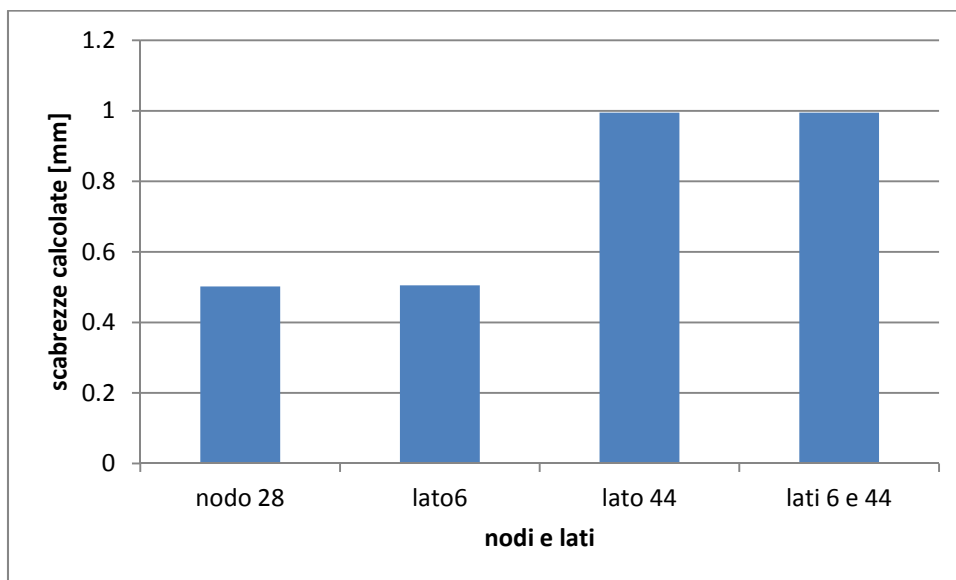


Figura 5.39 Andamento della scabrezza calibrata al variare delle misure disponibili in rete alle ore 6:00

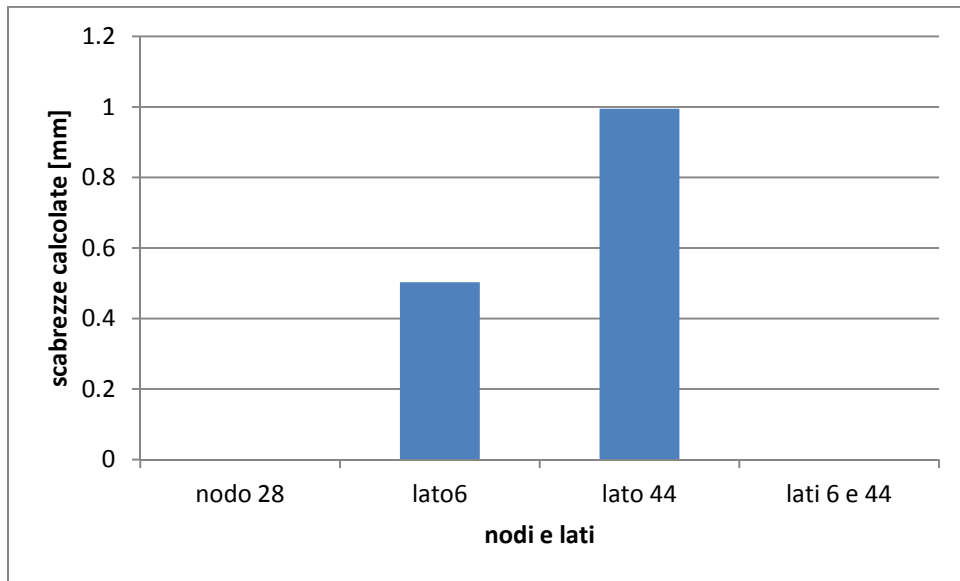


Figura 5.40 Andamento della scabrezza calibrata al variare delle misure disponibili in rete alle ore 12:00

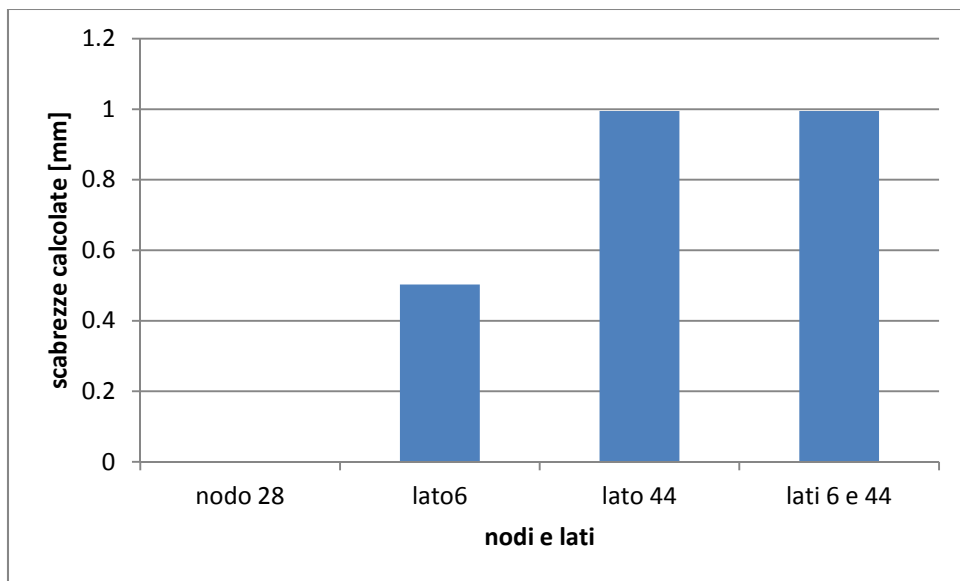


Figura 5.41 Andamento della scabrezza calibrata al variare delle misure disponibili in rete alle ore 18:00

I risultati delle simulazioni mostrano come il modello risponda in modo appropriato all'obiettivo di ottenere valori credibili di scabrezza calibrata. Le misure disponibili, purtroppo, non sono state progettate ai fini di questa ricerca, per cui non sono state effettuate secondo i criteri della sensitività. Queste simulazioni, inoltre, non tengono conto delle eventuali perdite in rete, per cui è stata studiata una distribuzione di coefficienti di punta, analizzata nel successivo paragrafo.

### 5.3.7 Calibrazione della rete, disponendo di misure reali, con una nuova distribuzione della portata erogata ai nodi

In questo caso di studio si è avanzata l'ipotesi di inserire nel modello una nuova erogazione ai nodi, calcolata tenendo conto della possibile diversa distribuzione della popolazione all'interno della rete.

In questa modellazione si è considerata una popolazione di 10000 unità, somma dei residenti, dei fluttuanti e dell'alta concentrazione di attività commerciali e istituzionali, che caratterizzano l'area di studio. In queste condizioni la portata media è pari a 34.7 l/s.

La rete è stata calibrata assumendo un'unica classe di scabrezza e, avendo note le misure di Tabella 5-65, sono state considerate le misure alle ore 00:00, 6:00, 12:00 e 18:00, a cui, tramite i coefficienti di punta di Tabella 5-66, sintetizzati in Tabella 5-67, corrispondono le distribuzioni di portate erogate ai nodi della rete di Tabella 5-68.

Tabella 5-65 nodi e lati della rete oggetto della campagna di misura

<b>NODO</b>	28	34	
<b>LATO</b>	6	44	52

L'andamento dei coefficienti di punta orari è stato calcolato ipotizzando una popolazione di circa 10000 unità e considerando le portate medie orarie (q oraria) del mese preso in considerazione.

Tabella 5-66 andamento dei coefficienti di punta orari

ora	q oraria [l/s]	k	ora	q oraria [l/s]	k
0	21.87	0.73	12	39.40	1.32
1	18.88	0.63	13	38.02	1.27
2	17.77	0.60	14	39.70	1.33
3	17.29	0.58	15	42.05	1.41
4	17.13	0.57	16	36.25	1.21
5	17.43	0.58	17	32.36	1.08
6	19.37	0.65	18	29.63	0.99
7	25.89	0.87	19	28.69	0.96
8	41.14	1.38	20	28.99	0.97
9	42.17	1.41	21	29.75	1.00
10	41.56	1.39	22	26.07	0.87
11	40.41	1.35	23	24.89	0.83



Tabella 5-67 coefficienti di punta utilizzati per determinare le nuove portate erogate

<b>Coefficienti di punta orari</b>			
<b>00:00</b>	<b>6:00</b>	<b>12:00</b>	<b>18:00</b>
0.73	0.65	1.32	0.99

Tabella 5-68 distribuzioni di portate erogate ai nodi della rete

<b>Nodi</b>	<b>Portate erogate</b>	<b>Portate erogate</b>	<b>Portate erogate</b>	<b>Portate erogate</b>
1	0.41	0.36	0.74	0.55
2	1.13	1.01	2.05	1.53
3	1.88	1.68	3.41	2.55
4	0.71	0.63	1.28	0.96
5	0.85	0.75	1.53	1.15
6	0.97	0.86	1.76	1.32
7	0.75	0.67	1.36	1.02
8	1.26	1.12	2.27	1.70
9	0.30	0.27	0.54	0.41
10	1.10	0.98	1.98	1.49
11	0.94	0.84	1.70	1.28
12	0.45	0.40	0.82	0.61
13	1.52	1.35	2.75	2.06
14	1.94	1.73	3.51	2.63
15	1.08	0.96	1.95	1.47
16	1.33	1.18	2.40	1.80
17	1.16	1.03	2.10	1.57
18	1.10	0.98	1.98	1.49
19	1.61	1.44	2.92	2.19
20	0.78	0.70	1.41	1.06
21	1.28	1.14	2.32	1.74
22	1.47	1.31	2.67	2.00
23	1.74	1.55	3.14	2.36
24	0.66	0.59	1.19	0.89
25	0.25	0.22	0.45	0.34
26	0.33	0.29	0.59	0.45
27	1.64	1.46	2.97	2.23
28	1.30	1.16	2.35	1.76
29	0.75	0.67	1.36	1.02
30	1.31	1.17	2.38	1.78
31	0.80	0.71	1.44	1.08
32	1.19	1.06	2.15	1.61
33	0.89	0.79	1.61	1.21
34	1.08	0.96	1.95	1.47
35	0.61	0.55	1.11	0.83
36	0.91	0.81	1.65	1.24
37	1.11	0.99	2.01	1.50
38	0.31	0.28	0.57	0.43
39	0.28	0.25	0.51	0.39

I valori dei coefficienti di punta riportati in Tabella 5-67 sono stati ricavati a partire dalle misure reali di portata in uscita dal serbatoio (ex CASMEZ), calcolando gli scostamenti rispetto al valor medio di portata. L'andamento orario del pattern utilizzato è riportato in Figura 5.42.

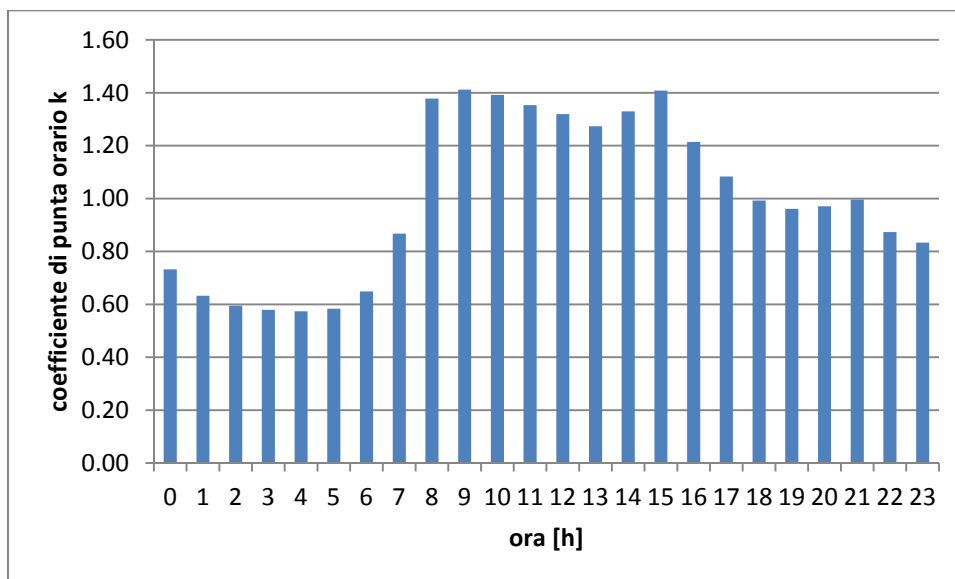


Figura 5.42 Andamento dei coefficienti di punta orari

I risultati delle calibrazioni effettuate, in termini di scabrezza calcolata e di scarto relativo, valutati ai diversi orari, sono riportati in Tabella 5-69, Tabella 5-70, Tabella 5-71, Tabella 5-72, Tabella 5-73, Tabella 5-74, Tabella 5-75 e Tabella 5-76.

Tabella 5-69 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 00:00

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 00:00					
nodo di misura	Lato di misura	H [m]	q [l/s]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
28	-	63	-	0.8	0.005
-	6	-	20.095	0.8	0.496
-	44	-	0.074	0.8	0.993
-	6, 44	-	20.095, 0.074	0.8	0.995

Tabella 5-70 Scarti relativi tra scabrezza reale di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 00:00

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 00:00						
nodo di misura	lato di misura	H [m]	q [l/s]	num. lati	scarto relativo	$\Sigma$ scarto
28	-	63	-	55	0.994	54.66
-	6	-	20.095		0.38	20.9
-	44	-	0.074		0.241	13.27
-	6, 44	-	20.095, 0.074		0.244	13.41

Tabella 5-71 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 6:00

<b>Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 6:00</b>					
nodo di misura	Lato di misura	H [m]	q [l/s]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
28	-	63.5	-	0.8	0.005
-	6	-	19.238	0.8	0.485
-	44	-	0.078	0.8	0.993
-	6, 44	-	19.238, 0.078	0.8	0.995

Tabella 5-72 Scarti relativi tra scabrezza reale di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 6:00

<b>Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 6:00</b>						
nodo di misura	lato di misura	H [m]	q [l/s]	num. lati	scarto relativo	$\Sigma$ scarto
28	-	63.5	-	55	0.994	54.66
-	6	-	19.238		0.394	21.66
-	44	-	0.078		0.241	13.27
-	6, 44	-	19.238, 0.078		0.244	13.41

Tabella 5-73 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 12:00

<b>Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 12:00</b>					
nodo di misura	Lato di misura	H [m]	q [l/s]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
28	-	57.5	-	0.8	0.005
-	6	-	30.071	0.8	0.489
-	44	-	0.136	0.8	0.795
-	6, 44	-	30.071, 0.136	0.8	0.809

Tabella 5-74 Scarti relativi tra scabrezza reale di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 12:00

<b>Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 12:00</b>						
nodo di misura	lato di misura	H [m]	q [l/s]	num. lati	scarto relativo	$\Sigma$ scarto
28	-	57.5	-	55	0.99375	54.65625
-	6	-	30.071		0.38875	21.38125
-	44	-	1.136		0.00625	0.34375
-	6, 44	-	30.071, 0.136		0.01125	0.61875

Tabella 5-75 Confronto tra scabrezza ipotizzata di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 18:00

<b>Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 18:00</b>					
nodo di misura	Lato di misura	H [m]	q [l/s]	scabrezza ipotizzata [mm]	scabrezza calibrata [mm]
28	-	57.5	-	0.8	0.005

-	6	-	29.238	0.8	0.488
-	44	-	0.114	0.8	0.985
-	6, 44	-	29.238, 0.114	0.8	0.982

Tabella 5-76 Scarti relativi tra scabrezza reale di valore 0.8 mm e scabrezza calcolata con dati misurati alle ore 18:00

Calibrazione effettuata disponendo dei dati misurati alle ore 18:00						
nodo di misura	lato di misura	H [m]	q [l/s]	num. lati	scarto relativo	∑ scarto
28	-	57.5	-	55	0.99375	54.65625
-	6	-	29.238		0.39	21.45
-	44	-	0.114		0.23125	12.71875
-	6, 44	-	29.238, 0.114		0.2275	12.5125

Dalle calibrazioni effettuate, i lati migliori, ossia i lati che permettono di ottenere scarti minori tra scabrezza calibrata e scabrezza misurata, risultano:

- Misura nel solo lato 44.
- Misura contemporanea nei lati 6 e 44.

Perciò, come riportato in Tabella 5-77 e Tabella 5-78 Figura 5.43 e Figura 5.44 si riportano i diagrammi, in cui viene mostrato il confronto dei risultati ottenuti, in termini di scabrezza calibrata, assumendo due diverse distribuzioni di erogazione ai nodi della rete. Per semplicità, nelle tabelle e figure sottostanti si definiscono rispettivamente con “scabrezza-erogazione 1” e “erogazione 1” i valori di scabrezza calibrati assumendo la distribuzione di erogazione ai nodi appena descritta nel presente paragrafo, mentre con “scabrezza-erogazione 2” e “erogazione 2” si intendono i valori di scabrezza calibrati assumendo la diversa distribuzione di erogazione, descritta nel paragrafo 1 del presente capitolo.

Tabella 5-77 confronto tra le scabrezze calibrate assumendo le due diverse distribuzioni di popolazione e misura nel lato 44

misura lato 44			
ora	k	Scabrezza-erogazione 1 [mm]	Scabrezza-erogazione 2 [mm]
0	0.73	0.993	0.995
6	0.65	0.993	0.995
12	1.32	0.795	0.995
18	0.99	0.985	0.995

Tabella 5-78 confronto tra le scabrezze calibrate assumendo le due diverse distribuzioni di popolazione e misure nei lati 6 e 44

misura lati 6 e 44			
ora	k	Scabrezza- erogazione 1 [mm]	Scabrezza- erogazione 2 [mm]
0	0.73	0.995	0.995
6	0.65	0.995	0.995
12	1.32	0.809	
18	0.99	0.982	0.995

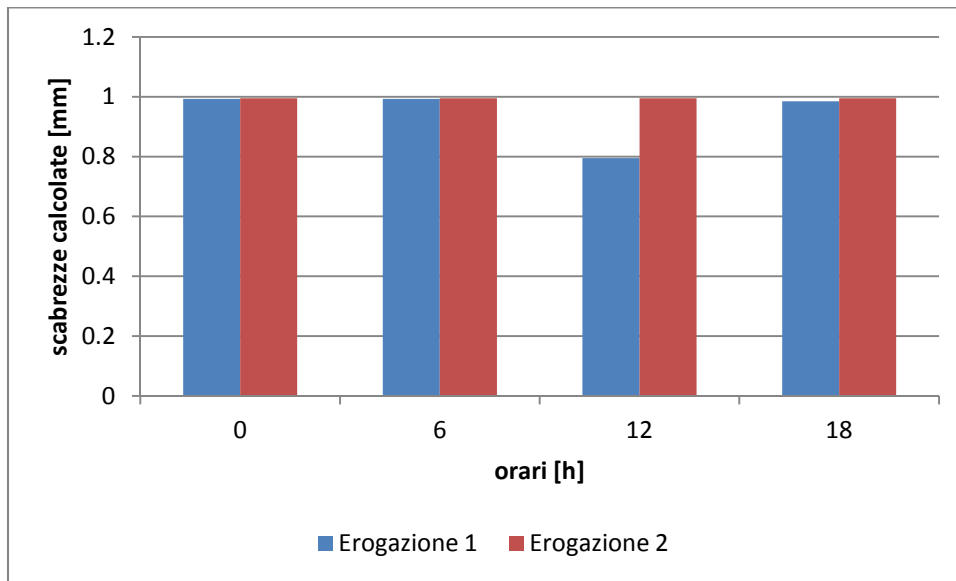


Figura 5.43 confronto tra le scabrezze calibrate assumendo le due diverse distribuzioni di popolazione e misura nel lato 44

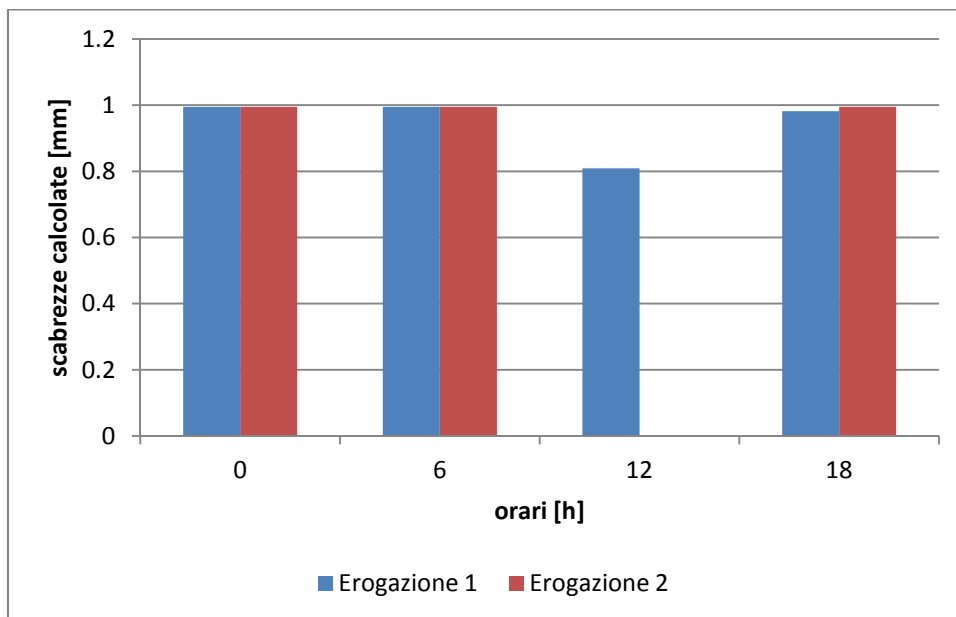


Figura 5.44 confronto tra le scabrezze calibrate assumendo le due diverse distribuzioni di popolazione e misure nei lati 6 e 44

Come mostrato dalle figure, la soluzione al problema di calibrazione sostanzialmente rimane invariata, inserendo nel modello UNINET due diverse distribuzioni di erogazione ai nodi della rete; questo, a conferma della stabilità numerica del modello.

### 5.3.8 Variazione della calibrazione al variare del range massimo in cui può ricadere la soluzione

Per testare che la soluzione della calibrazione non dipenda dalla distribuzione a priori, si è effettuata la calibrazione delle scabrezze della rete di Amantea disponendo delle misure reali di portata nelle condotte 6 e 44 alle ore 6:00, in condizioni medie.

I risultati ottenuti fin'ora, derivano dall'aver ipotizzato una distribuzione a priori sulla scabrezza compresa tra 0 e 1.

In questo paragrafo si vuol far variare il range massimo in cui può ricadere la soluzione del problema di calibrazione, ossia le scabrezze; la rete di Amantea analizzata presenta un solo valore di scabrezza e la variazione della soluzione è rappresentata in Figura 5.45.

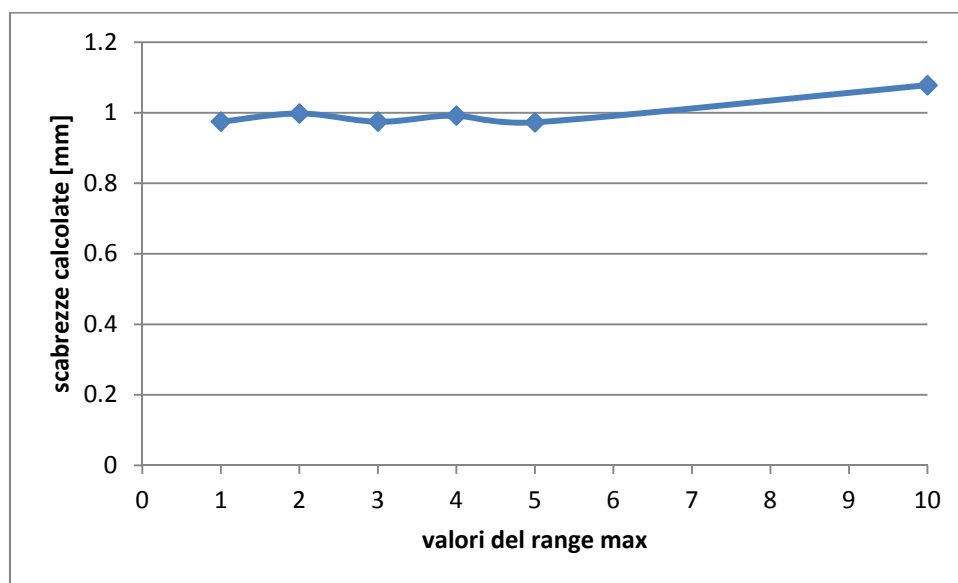


Figura 5.45 Variazione della soluzione del problema di calibrazione della rete di Amantea al variare dei valori del range massimo in cui ricade la soluzione

In Tabella 5-79 sono riportati i risultati, ossia i valori della scabrezza calibrata, ottenuti facendo riferimento ai seguenti valori di range massimo inseriti nel codice di calcolo:

- Range massimo pari a 1.
- Range massimo pari a 2.
- Range massimo pari a 3.
- Range massimo pari a 4.
- Range massimo paria 5.

- Range massimo pari a 10.

Tabella 5-79 valori della scabrezza calibrata e dei relativi scarti tra grandezza ipotizzata e quella calcolata da UNINET

<b>Valore del range massimo</b>	<b>scabrezza ipotizzata [mm]</b>	<b>scabrezza calibrata [mm]</b>	<b>scarto relativo</b>	<b><math>\Sigma</math> scarto</b>
1	0.8	0.975	0.219	12.031
2	0.8	0.998	0.247	13.58
3	0.8	0.975	0.219	12.034
4	0.8	0.992	0.24	13.177
5	0.8	0.973	0.216	11.868
10	0.8	1.078	0.348	19.133

I risultati dimostrano che la soluzione rimane stabile nell'intorno di 1 mm, al variare dei valori assunti dal range massimo in cui può ricadere la soluzione, ossia la scabrezza.

Questo fatto conferma l'affidabilità del modello anche rispetto a tale parametro.

## Conclusioni

Nella ricerca presentata in questa tesi sono riportati i risultati di una ricerca basata sulla modellazione di reti idriche teoriche e reali con l'utilizzo del modello di simulazione UNINET, sviluppato presso il Dipartimento di Difesa del Suolo "V.Marone" dell'Università della Calabria, non più di 3 anni fa.

Quanto affrontato in questa ricerca ha permesso di esplorare le potenzialità del codice di calcolo, elaborando originali metodologie di analisi che hanno permesso di ottenere importanti risultati in ordine a problemi di quotidiana pratica gestionale delle reti.

In primo luogo si è trattato il problema del miglioramento della soluzione del problema di calibrazione al crescere del numero di misuratori in rete. Si è proceduto con la modellazione di due reti classiche di letteratura pervenendo alla conclusione che al crescere delle misure in rete si ottengono calibrazioni migliori anche se tecnicamente è possibile ottenere buoni risultati con un limitato numero di misure. Si è dimostrato, inoltre, che i migliori risultati si hanno misurando pressioni ai nodi piuttosto che portate nei lati.

Un secondo importante risultato è stato trovato sul problema della scelta ottimale dei punti di misura ai fini della calibrazione. Sono stati, infatti, confrontate due metodologie: una basata sull'applicazione del modello UNINET per individuare i lati e i nodi più "sensibili", l'altra basata sull'applicazione del metodo delle "matrici di sensitività". Il confronto fra le due procedure di calcolo ha permesso di affermare che il metodo delle "matrici di sensitività" seppure più approssimato rispetto alla procedura che vede l'applicazione ripetuta di UNINET nei vari punti della rete, risulta un buon metodo per una rapida determinazione dei punti in cui posizionare gli strumenti di misura, non richiedendo un costo computazionale elevato, quale quello richiesto da UNINET.

Il terzo argomento esplorato, ha riguardato l'elaborazione di una metodologia per la ricerca delle perdite nelle reti idriche in pressione. L'argomento è di grande attualità ed è uno dei principali fronti in cui si è indirizzata la ricerca negli ultimi anni. La procedura non è stata verificata fino in fondo anche se i primi risultati ottenuti sono incoraggianti e costituiscono una importante piattaforma perché si possa continuare la ricerca in questo argomento.

La modellazione di reti con UNINET non si è fermata all'analisi di reti di letteratura ma si è spinta ad applicare questo modello, per la prima volta, su reti reali, per poter valutare la stabilità del modello stesso in relazione alle problematiche di pratico utilizzo. UNINET è composto da due sottomodelli: INetPDA, per la verifica Pressure Driven Analysis delle reti, e SCEM-UA, un



algoritmo di ottimizzazione utilizzato per la calibrazione delle reti. A tal fine sono state analizzate tre reti reali:

- 1) La rete di Marina di Santa Maria del Cedro (CS);
- 2) La rete di San Mango d'Aquino (CZ);
- 3) La rete di Amantea (CS).

Nel primo caso è stato eseguito un confronto fra modellazione PDA e la classica modellazione DDA (Demand Driven Analysis), possibile in UNINET. Il codice non ha evidenziato problemi nella verifica ed è stato, così, possibile mostrare la potenzialità della verifica PDA, rispetto alla DDA, nei casi di particolare stress della rete.

Nel secondo caso è stato fatto ancora un confronto fra modellazione PDA e DDA, non ottenendo gli stessi risultati della rete di Marina di Santa Maria del Cedro, ed è stata, inoltre, effettuata una calibrazione di tipo teorico, affiancata da un'analisi di sensitività della rete.

Infine è stata presa in esame la rete di Amantea, importante perché oggetto nel 2000 di una campagna di misure di campo, utile a validare la procedura di calibrazione implementata con UNINET. Sono state considerate due diverse tipologie di distribuzioni di portata ai nodi, una basata sulla ripartizione della portata media complessiva ai nodi, senza tener conto delle punte orarie e l'altra calcolata, tenendo conto della possibile diversa distribuzione della popolazione all'interno della rete e della variabilità dei coefficienti di punta orari. Da questa analisi si evince che la soluzione al problema di calibrazione sostanzialmente resta invariata, a conferma della stabilità del modello.

Infine, considerando sempre la rete idrica di Amantea, è stato valutato che la soluzione al problema di calibrazione non dipende dalla distribuzione a priori, assunta sul parametro incognito, in quanto la soluzione non varia in modo apprezzabile al variare del valore del range massimo in cui può ricadere la soluzione stessa.

## Bibliografia

- Ardenti P., Ciaponi C., Franchioli L., Papiri S., *Simulazione idraulica delle reti di distribuzione idrica in condizioni di pressione insufficiente in uno o più nodi*, Acqua e Città II Convegno Nazionale di Idraulica Urbana, Chia (CA), 25-28 settembre 2007.
- Bhave P.R., *Calibrating Water Distribution Network Models*, Journal of Environmental Engineering, vol. 114, n°1, 1988.
- Box G. E. P., Tiao G. C., *Bayesian inference in statistical analyses*, Addison-Wesley-Longman, Reading, Mass (1973).
- Brook S. P., Gelman A., *General Methods for Monitoring Convergence of Iterative Simulations*, Journal of Computational and Graphical Statistics, n. 7, 1997.
- Calomino F., Veltri P., Un procedimento di calcolo automatico per la verifica delle reti idrauliche in pressione a portate incognite in ingresso ed in uscita, Università della Calabria -Dipartimento di Difesa del Suolo, Memorie e Studi n. 31, 1980.
- Carpentier P., Coehn G., *State estimation and leak detection in water distribution networks*, Civil Engineering System, Vol. 8, 1991.
- Cheung P.B., Van Zyl J.E., Reis L.F.R., *Extension of EPANET for pressure driven demand modelling in water distribution system*, International Conference on Computing and Control in the Water Industry, Water Management for the 21st century, Exeter, UK, 5-7 sept. 2005.
- Cima E., Giulioli S., Verde D., Magini R., *Calibrazione del modello di una rete di distribuzione idrica con perdite elevate*, 31° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Perugia, 9-12 settembre 2008.
- Del Giudice G., Di Cristo C., *Nodal Sensitivity and Sensor Location in Hydraulic Network*, Proceedings of XXX IAHR Congress-Tessalonica, Theme B.263-270, 2003.
- Eggener C.L., Polkowski, L. *Network Models and the Impact of Modelling Assumptions*, Journal of A.W.W.A., vol. 68, n.4, 1976.
- Ermini R., Ingeduld P., *Analisi delle criticità e valutazione dei livelli di servizio di reti di distribuzione*, La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto, Perugia 2005

- Farmani, R., Walters, G.A. & Savic, D.A. *Trade-off between Total Cost and Reliability for Anytown Water Distribution Network*. Journal of Water Resource Planning and Management, Vol. 131 n. 3, 2005.
- Ferreri G. B., Gangitano L. *Efficacia del tipo e del numero di misuratori sulla calibrazione delle scabrezze di reti distributrici in pressione*, L'Acqua, Marzo 2001.
- Fujiwara O., Ganesharajah T., *Reliability assessment of water supply system with storage and distribution networks*, Water Resources Research, Vol. 29, N. 8, 1993.
- Fujiwara O., Li J., *Reliability analysis of water distribution networks in consideration of equità, redistribution and pressure dependent demand*, Water Resources Research, Vol. 34, N. 7, 1998.
- Gelman A., Rubin D. B., *Inference from iterative simulation using multiple sequence*, Statistical Science 7, 1994.
- Germanopoulos G., *A Technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models*, Civil Engineering Systems, settembre 1985.
- Giustolisi O., Savic D. A., Kapelan Z., *Un modello di simulazione idraulica delle reti di distribuzione per la gestione delle perdite*, Atti del convegno "Approvvigionamento e Distribuzione Idrica: Esperienza, Ricerca ed Innovazione", Ferrara, 28-29 giugno 2007.
- Giustolisi O., Berardi L., *Water distribution network calibration using enhanced GGA and topological analysis*, Journal of Hydroinformatics Vol 13 No 4 pp.621-641, 2011.
- Giustolisi, O., Walski, T.M., *A Demand Components in Water Distribution Network Analysis*, J. Water Resource Planning and Management, ASCE, 2011.
- Greco M., Del Giudice G., *New Approach to Water Distribution Network Calibration*, JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING / AUGUST 1999.
- Greco M., Di Cristo C., *Calibration for Hydraulic Network Simulation*, International Water Resources Engineering Conference, A.S.C.E., Seattle, 1999.
- Hastings W.K., *Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their application*, Biometrika, n. 57, 1970.

- Jowitt P. W., *Effect of Pipe Failures in Water Distribution Networks*, Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution System, 1995.
- Kapelan Z.S., Savic D.A., Walters G.A. *Optimal sampling design for calibration of transient networks model using multi-objective Gas*, Proceedings of PEDS2003 Conference, Valencia, Balkema, 2003.
- Kapelan Z. S., Savic D. A., Walters G. A., *Optimal Sampling Design Methodologies for Water Distribution Model Calibration*, JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING © ASCE / MARCH 2005.
- Kapelan Z. S., Savic D. A., Walters G. A., *Calibration of Water Distribution Hydraulic Models Using a Bayesian-Type Procedure*, JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING © ASCE / AUGUST 2007.
- Metropolis N., Rosenbluth A. W., Rosenbluth M. N., Teller A. H., *Equation of state calculation by fast computing machines*, Journal Chemistry Physics, n. 21, 1953.
- Nicolini M., Giacomello C., Dorigo L., Battiston M., *Calibrazione e Gestione della Pressione nelle Reti di Distribuzione Idrica: un Caso Applicativo*, 31° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche Perugia, 9-12 settembre 2008.
- Orlando F., *Simulazione delle reti idriche in pressione a fini gestionali*, Tesi dottorato di ricerca in ingegneria idraulica per l’Ambiente e il Territorio, Novembre, 2010.
- Ormsbee L. E., Wood D.J., *Explicit pipe network calibration*, Journal of Water Resource Planning and Management, ASCE, vol. 112, n. 2, 1983.
- Ormsbee, L. E. 1989. *Implicit network calibration*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 115(2).
- Pudar R.S., Liggett J.A., *Leaks in pipe networks*, J.Hydr.Engrg., ASCE, 118 (7), 1031-1046, 1992.
- Todini E., *A more realistic approach to the “Extended Period Simulation” of Water Distribution Networks*, Proc., 2003, Advances in Water Supply Management CCWI Conference, London 2003.

- Tucciarelli T., Criminisi A., Termini D., *Leak analysis in pipeline system by means of optimal valve regulation*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 125, N. 3, pp. 277-285, 1999.
- Veltri P., Maiolo M., Morosini F.A., *Una procedura per la calibrazione dei modelli di reti di distribuzione idrica*, XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche, Napoli, 20-22 settembre, 1994.
- Veltri P., Morosini F.A., Aloe F. *Su alcuni problemi di analisi di reti idriche urbane*, XXI Corso di Aggiornamento in Tecniche per la Difesa dall’Inquinamento, Guardia Piemontese Terme (CS), 21-24 giugno, 2000.
- Veltri P., Morosini F.A., *Analisi e Calibrazione di una rete idrica urbana*, Memorie e Studi. Dipartimento di Difesa del Suolo, Università della Calabria. N°332 – gennaio, 2001.
- Veltri P., Morosini F.A., *Analisi e calibrazione di una rete idrica urbana*, Ingegneria Ambientale. Anno XXXI, n°5, pag. 249-264, maggio 2002.
- Veltri P., Guerriero F., Morosini A., Cassalia A., *Problemi di calibrazione di una rete idrica reale*, Seminario su: La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto, Perugia 26 settembre 2003.
- Veltri P., Guerriero F., Fiorini Morosini A., Di Cristo C., *La calibrazione delle reti idriche*, I Seminario: La gestione e l'affidabilità dei sistemi acquedottistici, Accadue O, Ferrara, 2004.
- Veltri P., Fiorini Morosini A., *La distrettualizzazione delle reti idriche: il caso della città di Cosenza*, Atti del convegno “Approvvigionamento e Distribuzione Idrica: Esperienza, Ricerca ed Innovazione”, Ferrara, 28-29 giugno 2007.
- Veltri P., Fiorini Morosini A., Gigliotti M.C., Costanzo F., *Miglioramento della Soluzione del Problema della Calibrazione delle Reti Idriche al Crescere del Numero di Misuratori*, l’Acqua vol.4 pp.351-360, 2012(a).
- Veltri P., Fiorini Morosini A., Costanzo F., Gigliotti M.C., *Confronto fra Modelli per la Scelta Ottimale dei Punti di Misura in Reti Idriche ai Fini della Calibrazione*, Convegno Accadueo Ferrara 25 maggio 2012 (b).
- Vrugt J. A., Gupta H. V., Bouten W., Sorooshian S., *A shuffled complex evolution*

*metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters*, Water Resource Research Vol. 39 n.8, 2003.

- Wagner J.M., Shamir U., Marks D.H., *Water distribution reliability: simulation methods*. Journal of Water Resource Planning and Management. Vol 114 n. 3, 1988.
- Walski, T. M. 1983, *Technique for calibrating network models*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 109(4).
- Walski T. M., *Model calibration data: The Good, The Bad, and The Useless*; Journal of AWWA, vol. 92, 2000.

## *Ringraziamenti*

Il mio primo pensiero è rivolto al Professore Veltri e all' Ingegnere Morosini, per avermi accolta e seguita in questo mio percorso di Dottorato di Ricerca.

Ringrazio i miei genitori per avermi dato la possibilità e il sostegno necessario per realizzare questo mio desiderio.

Ringrazio Maradei per essermi stato vicino, sempre.

Ringrazio nonna Erminia, sempre.