

# POLITECNICO DI MILANO

SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE



LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

OTTIMIZZAZIONE DI RETE DI ACQUEDOTTO  
TRAMITE L'APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO  
"PARTICLE SWARM OPTIMIZATION"

RELATORE:

Prof. Stefano MALAVASI

CORRELATORE:

Ing. Giacomo FERRARESE

Giulia SCALETTI

matr.970927

A.A. 2021/22



# Sommario

Nella gestione degli acquedotti un aspetto che risulta di grande importanza è il controllo dei livelli di pressione in quanto strettamente legato alle perdite idriche. A questo fine sono spesso utilizzate valvole di regolazione di pressione (PRV), dei dispositivi idraulici che inducono perdite di carico localizzate. L'esigenza del controllo sempre più dinamico e distribuito delle reti ha messo in evidenza la necessità di sistemi di monitoraggio e controllo distribuiti, controllabili da remoto ed energeticamente indipendenti. Il GreenValve System (GVS) è un sistema IoT di regolazione e monitoraggio energeticamente indipendente perché in grado di recuperare parte dell'energia da dissipare per il controllo del fluido stesso. L'obiettivo di questa tesi è lo sviluppo di un algoritmo di ottimizzazione che mira a trovare il posizionamento più conveniente delle GreenValve all'interno di reti di distribuzione idrica allo scopo di regolare e uniformare le pressioni producendo sufficiente energia affinché la valvola si autosostenga. L'introduzione di valvole di regolazione oltre ad essere una soluzione a breve termine per la riduzione delle perdite di rete, migliora il servizio agli utenti e riduce le sollecitazioni all'infrastruttura allungandone la vita utile.

Viene quindi sviluppato un metodo basato sull'algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO) che implementa alcune strategie per aumentare l'affidabilità della soluzione trovata. Il metodo viene applicato alla minimizzazione delle perdite su una rete benchmark per poter confrontare i risultati con casi noti da letteratura. Successivamente il metodo viene applicato al posizionamento in rete di GreenValve volendo massimizzare l'uniformità delle pressioni, tenendo in considerazione la necessità di autosostentamento energetico della valvola.

Infatti i risultati ottenuti sulla rete benchmark dimostreranno che la massimizzazione dell'uniformità delle pressioni in combinazione con la limitazione del valore da esse assunto fornisce gli stessi risultati ottenuti minimizzando le perdite con il vantaggio di non richiedere la conoscenza della loro localizzazione. Data la rilevanza sul piano pratico di questo risultato le due funzioni obiettivo vengono applicate a una rete di dimensioni reali fornita nella "Battle of the Leakage Detection and Isolation Methods". Diverse configurazioni di perdite e l'applicazione ad una rete più complessa permettono di verificare il metodo su vari scenari aumentandone la consistenza.



# Abstract

In the management of water distribution networks, one main aspect is the control of pressure levels as it is closely linked to water leakages. For this purpose, pressure reduction valves (PRV) are often used since they induce localized pressure drops. The need for increasingly dynamic and distributed control of networks has highlighted the need for distributed, remotely controllable and energy-independent monitoring and control systems. The GreenValve System (GVS) is an energetically independent IoT system for the regulation and monitoring of network pressures that is able to recover part of the energy that is dissipated for the control of the fluid itself. The goal of this thesis is the development of an optimization algorithm that aims to find the most convenient positioning of the GreenValves within water distribution networks in order to regulate and standardize the pressures by producing enough energy so that the valve can sustain itself.

A method based on the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is then developed implementing some strategies to increase the reliability of the solution. The method is applied to the minimization of leakages on a benchmark network in order to be able to compare the results with known cases from the literature. Subsequently, the method is applied to the positioning of the GreenValve in the network with the aim of maximizing the uniformity of the pressures, taking into consideration the need to produce energy through the valve.

The results obtained on the benchmark network will demonstrate that the maximization of the uniformity of the pressures in combination with the limitation of the value assumed by them provides the same results obtained by minimizing the losses with the advantage of not requiring knowledge of their location. Given the practical relevance of this result, the two objective functions are applied to a real-size network provided in the "Battle of the Leakage Detection and Isolation Methods".



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stato dell'arte</b>	<b>3</b>
2.1	Ottimizzazione di un problema . . . . .	3
2.1.1	Algoritmi genetici . . . . .	4
2.1.2	Particle Swarm Optimization . . . . .	4
2.2	Minimizzazione delle perdite . . . . .	4
2.3	Recupero di energia in rete . . . . .	6
2.3.1	GreenValve . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Metodo</b>	<b>11</b>
3.1	Particle Swarm Optimization . . . . .	11
3.2	Confronto tra algoritmo PSO e algoritmi genetici . . . . .	13
3.3	Vantaggi e limiti dell'algoritmo PSO . . . . .	14
3.3.1	Gestione dei vincoli . . . . .	14
3.3.2	Nomenclatura . . . . .	15
3.3.3	Ricerca del setting . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Analisi della consistenza e validazione del metodo</b>	<b>17</b>
4.1	Rete benchmark . . . . .	17
4.1.1	Condizione di partenza . . . . .	19
4.2	Formulazione del problema . . . . .	20
4.2.1	Equazione di continuità . . . . .	20
4.2.2	Equazione del moto . . . . .	22
4.3	Funzione obiettivo . . . . .	22
4.4	Nomenclatura . . . . .	23
4.4.1	Topografia della rete . . . . .	23
4.4.2	Portata passante . . . . .	24
4.4.3	Correlazione tra i tubi . . . . .	25
4.4.4	Risultati . . . . .	27
4.5	Dettagli della simulazione . . . . .	29
4.5.1	Analisi di sensibilità dei parametri dell'algoritmo PSO . . . . .	30
4.6	Risultati per una valvola . . . . .	31
4.6.1	Analisi dei risultati . . . . .	32
4.7	Risultati per due valvole . . . . .	35
4.7.1	Analisi dei risultati . . . . .	36
4.8	Risultati di letteratura . . . . .	39
4.8.1	Araujo et al. . . . .	39
4.8.2	Nicolini e Zovatto . . . . .	41
4.8.3	Confronto tra i risultati di letteratura . . . . .	41
4.9	Conclusioni . . . . .	42

<b>5</b>	<b>Applicazione del metodo alla rete benchmark</b>	<b>43</b>
5.1	Coefficiente di uniformità delle pressioni . . . . .	43
5.1.1	Funzione obiettivo che tiene conto del livello delle pressioni . . . . .	44
5.2	Deviazione standard . . . . .	45
5.2.1	Funzione obiettivo che tiene conto del livello delle pressioni . . . . .	46
5.3	Risultati per una valvola . . . . .	46
5.3.1	Coefficiente di uniformità delle pressioni . . . . .	46
5.3.2	Deviazione standard delle pressioni . . . . .	51
5.4	Confronto dei risultati per 1 valvola . . . . .	54
5.4.1	Setting . . . . .	54
5.4.2	Potenza disponibile . . . . .	55
5.4.3	Coefficiente di uniformità . . . . .	56
5.4.4	Deviazione standard . . . . .	57
5.4.5	Perdite . . . . .	58
5.4.6	Conclusioni tratte dai risultati ottenuti con 1 valvola . . . . .	58
5.5	Risultati per due valvole . . . . .	60
5.5.1	Deviazione standard delle pressioni . . . . .	60
5.6	Confronto dei risultati per due valvole . . . . .	64
5.6.1	Setting . . . . .	64
5.6.2	Potenza . . . . .	65
5.6.3	Deviazione standard . . . . .	66
5.6.4	Perdite . . . . .	66
5.6.5	Conclusioni tratte dai risultati ottenuti con 2 valvole . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Applicazione del metodo alla rete L-Town</b>	<b>69</b>
6.1	Rete L-Town . . . . .	69
6.2	Modifiche apportate . . . . .	70
6.2.1	Curva di domanda . . . . .	70
6.2.2	Distribuzione delle perdite . . . . .	71
6.2.3	Condizione iniziale . . . . .	72
6.3	Funzione obiettivo . . . . .	72
6.4	Configurazione perdite LEAK1 . . . . .	74
6.4.1	Risultati . . . . .	74
6.4.2	Confronto risultati . . . . .	76
6.5	Configurazione perdite LEAK2 . . . . .	79
6.5.1	Risultati . . . . .	79
6.5.2	Confronto risultati . . . . .	80
6.6	Conclusioni . . . . .	82
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>85</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>89</b>
<b>A</b>	<b>Codice Matlab</b>	<b>91</b>
<b>B</b>	<b>Risultati completi</b>	<b>107</b>



# Elenco delle figure

2.1	GreenValve [1] . . . . .	9
3.1	Diagramma di flusso dell'algoritmo PSO [2] . . . . .	13
3.2	Variazione della funzione obiettivo con il setting a tubo fissato . . . . .	15
3.3	Variazione della funzione obiettivo con il tubo a setting fissato . . . . .	15
3.4	Diagramma di flusso del metodo . . . . .	16
4.1	Rete benchmark proposta da Jowitt e Xu [3] . . . . .	17
4.2	Andamento nel tempo del carico idraulico delle sorgenti [4] . . . . .	19
4.3	Andamento nel tempo del coefficiente moltiplicativo della domanda, $\alpha$ [4] . . . . .	19
4.4	Pressioni in rete senza valvole . . . . .	20
4.5	Portate in rete senza valvole . . . . .	20
4.6	Rete benchmark, nomenclatura <i>T1</i> . . . . .	23
4.7	Rete benchmark, nomenclatura <i>T2</i> . . . . .	24
4.8	Rete benchmark, nomenclatura <i>T3</i> . . . . .	24
4.9	Rete benchmark, nomenclatura <i>Qsort</i> . . . . .	25
4.10	Rete benchmark, nomenclatura <i>PCC</i> . . . . .	26
4.11	Risultato della simulazione con $c_1 = 0.1$ e $c_2 = 0.1$ . . . . .	30
4.12	Risultato della simulazione con $c_1 = 0.1$ e $c_2 = 0.2$ . . . . .	30
4.13	Risultato della simulazione con $c_1 = 0.2$ e $c_2 = 0.1$ . . . . .	30
4.14	Risultato della simulazione con $c_1 = 0.2$ e $c_2 = 0.2$ . . . . .	30
4.15	Setting impostato alla valvola installata sul tubo P_22 . . . . .	33
4.16	Andamento delle perdite distribuite nei tubi per diversi valori di domanda . . . . .	33
4.17	Pressioni in rete con una valvola installata sul tubo P_22 . . . . .	34
4.18	Andamento delle perdite durante la giornata prima (in rosso) e dopo (in blu) l'installazione della valvola sul tubo P_22 . . . . .	34
4.19	Portata attraverso il tubo P_22 con e senza la valvola installata . . . . .	34
4.20	Portate in rete con una valvola installata sul tubo P_22 . . . . .	35
4.21	Setting delle valvole installate sui tubi P_22 e P_18 . . . . .	36
4.22	Pressioni in rete con due valvole installate sui tubi P_18 e P_22 . . . . .	37
4.23	Andamento delle perdite senza valvole, con una valvola installata sul tubo P_22 e con due valvole installate sui tubi P_22 e P_18 . . . . .	37
4.24	Portate in rete con due valvole installate sui tubi P_18 e P_22 . . . . .	39
4.25	Risultato per l'apertura delle valvole ottenuto in Araujo et al. [4] . . . . .	40
5.1	Valori di pressione media in funzione del fattore di domanda . . . . .	48
5.2	Valori di deviazione standard in funzione del fattore di domanda . . . . .	48
5.3	Valori di pressione media in funzione del fattore di domanda . . . . .	49
5.4	Valori di deviazione standard in funzione del fattore di domanda . . . . .	49
5.5	Confronto di UC in funzione del fattore di domanda tra la condizione iniziale senza valvole e per le configurazioni trovate con <i>UC</i> e <i>UC + Pmax</i> . . . . .	50

5.6	Confronto della pressione media di rete in funzione del fattore di domanda tra la condizione iniziale senza valvole e per le configurazioni trovate con $UC$ e $UC + Pmax$ . . . . .	50
5.7	Confronto della deviazione standard in funzione del fattore di domanda tra la condizione iniziale senza valvole e per le configurazioni trovate con $UC$ e $UC + Pmax$ . . . . .	50
5.8	Valori di pressione media in funzione del fattore di domanda . . . . .	52
5.9	Valori di deviazione standard in funzione del fattore di domanda . . . . .	52
5.10	Valori di pressione media in funzione del fattore di domanda . . . . .	53
5.11	Valori di deviazione standard in funzione del fattore di domanda . . . . .	53
5.12	Andamento del setting orario della valvola installata sul tubo P_22 . . . . .	54
5.13	Andamento del setting orario della valvola installata sul tubo P_28 . . . . .	55
5.14	Andamento della potenza disponibile . . . . .	56
5.15	Andamento del coefficiente di uniformità ( $UC$ ) con 1 valvola installata nelle diverse configurazioni . . . . .	57
5.16	Andamento della deviazione standard delle pressioni con 1 valvola installata nelle diverse configurazioni . . . . .	57
5.17	Andamento delle perdite idriche con 1 valvola installata nelle diverse configurazioni . . . . .	58
5.18	Valori di deviazione standard in funzione del fattore di domanda . . . . .	61
5.19	Andamento dei setting con 2 valvole installate nelle diverse configurazioni . . . . .	65
5.20	Andamento della potenza disponibile per 2 valvole installate nelle diverse configurazioni . . . . .	66
5.21	Andamento della deviazione standard delle pressioni con 2 valvole installate nelle diverse configurazioni . . . . .	67
5.22	Andamento delle perdite idriche con 2 valvole installate nelle diverse configurazioni . . . . .	67
6.1	Rete L-Town fornita nella Battle of the Leakage Detection and Isolation Methods [5] . . . . .	69
6.2	Rappresentazione delle aree in cui può essere divisa la rete . . . . .	70
6.3	Curve di domanda giornaliere . . . . .	71
6.4	Distribuzione delle perdite nelle due configurazioni . . . . .	71
6.5	Andamento della perdita di rete per le 20 particelle durante le iterazioni . . . . .	73
6.6	Andamento della perdita di rete con valvole aperte durante le 24 ore . . . . .	74
6.7	Distribuzione delle pressioni con valvole aperte, per domanda minima e domanda massima . . . . .	74
6.8	Andamento del setting delle valvole durante le 24 ore . . . . .	76
6.9	Andamento della potenza disponibile per le valvole durante le 24 ore . . . . .	77
6.10	Andamento della perdita di rete durante le 24 ore . . . . .	78
6.11	Distribuzione delle pressioni con valvole settate secondo $DS + Pmax$ , per domanda minima e domanda massima . . . . .	78
6.12	Andamento della perdita di rete con valvole aperte durante le 24 ore . . . . .	79
6.13	Andamento del setting delle valvole durante le 24 ore . . . . .	81
6.14	Andamento della potenza disponibile per le valvole durante le 24 ore . . . . .	81
6.15	Andamento della perdita di rete durante le 24 ore . . . . .	82

# Elenco delle tabelle

2.1	Tabella riassuntiva dello stato dell'arte sulla minimizzazione delle perdite . . . . .	7
2.2	Tabella riassuntiva dello stato dell'arte sulla produzione di energia in rete . . . . .	8
4.1	Dati della rete di Jowitt e Xu . . . . .	18
4.2	Confronto dei nomi dei tubi nelle diverse nomenclature . . . . .	27
4.3	Risultati di posizionamento di una valvola per le nomenclature topografiche . . .	27
4.4	Risultati di posizionamento di una e due valvole per i diversi tipi di nomenclatura	28
4.5	Analisi di sensibilità rispetto ai coefficienti $c_1$ e $c_2$ . . . . .	30
4.6	Risultati per una valvola ottenuti con <i>minimizzazione</i> . . . . .	31
4.7	Risultati ottenuti ottimizzando il setting per le configurazioni trovate con <i>minimizzazione</i> per una valvola . . . . .	31
4.8	Risultati ottenuti ottimizzando il setting della valvola installata sul tubo P_22 .	32
4.9	Risultati per due valvole ottenuti con <i>minimizzazione</i> . . . . .	35
4.10	Risultati ottenuti ottimizzando il setting per le configurazioni ottenute con <i>minimizzazione</i> per due valvole . . . . .	35
4.11	Risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P_18 e P_22 . . . . .	36
4.12	Variazione della perdita media senza, con una valvola installata sul tubo P_22 e con due valvole installate sui tubi P_22 e P_18 . . . . .	38
4.13	Risultati ottenuti da Araujo et al. [4] . . . . .	40
4.14	Risultati ottenuti da Nicolini e Zovatto [6] . . . . .	41
4.15	Confronto dei risultati ottenuti con i risultati di letteratura . . . . .	42
5.1	Risultati complessivi ottenuti con funzione obiettivo $UC$ per una valvola . . . . .	46
5.2	Risultati ottenuti ottimizzando il setting per le configurazioni ottenute con $UC$ per una valvola . . . . .	47
5.3	Risultati con funzione obiettivo $UC$ per valvola installata su tubo P_28 . . . . .	47
5.4	Risultati complessivi ottenuti con funzione obiettivo $UC + Pmax$ per una valvola	48
5.5	Risultati ottenuti ottimizzando il setting della valvola installata su tubo P_22 .	48
5.6	Risultati complessivi ottenuti con funzione obiettivo $DS$ per una valvola . . . . .	51
5.7	Risultati ottenuti ottimizzando il setting per le configurazioni ottenute con $DS$ per una valvola . . . . .	51
5.8	Risultati ottenuti ottimizzando il setting della valvola installata su tubo P_22 .	52
5.9	Risultati con funzione obiettivo $DS + Pmax$ per una valvola . . . . .	52
5.10	Risultati ottenuti ottimizzando il setting della valvola installata su tubo P_22 .	53
5.11	Valori di variabilità spaziale e temporale delle pressioni con le diverse configurazioni	59
5.12	Risultati con funzione obiettivo $DS$ per due valvole . . . . .	60
5.13	Risultati ottenuti ottimizzando il setting per le configurazioni ottenute con $DS$ per due valvole . . . . .	60
5.14	Risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P_14 e P_17 . . . . .	62

5.15	Risultati con funzione obiettivo $DS + Pmax$ per due valvole . . . . .	62
5.16	Risultati ottenuti ottimizzando le configurazioni ottenute dall'algoritmo con funzione obiettivo $DS + Pmax$ . . . . .	63
5.17	Risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P_15 e P_22 . . . . .	63
5.18	Risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P_18 e P_22 . . . . .	64
6.1	Risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando <i>minimizzazione</i>	75
6.2	Risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando $DS + Pmax$	76
6.3	Risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando <i>minimizzazione</i>	79
6.4	Risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando $DS + Pmax$	80
7.1	Parametri di penalità utilizzati nelle diverse funzioni obiettivo . . . . .	86

# Capitolo 1

## Introduzione

L'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite ha tra gli obiettivi l'aumento dell'efficienza nel utilizzo dell'acqua in ogni settore, per affrontare la carenza idrica e ridurre il numero di persone che ne subisce le conseguenze [7]. A causa del cambiamento climatico anche in Italia negli ultimi anni si stanno affrontando problemi legati alla siccità. Per questa ragione in molti ambiti è aumentato l'interesse verso soluzioni che permettano il risparmio e il riutilizzo della risorsa idrica.

L'ISTAT ha riportato che nel 2020 il volume di acqua persa all'interno della rete di distribuzione idrica italiana era pari a 3.4 miliardi di  $m^3$  (il 42.2% di tutta l'acqua immessa in rete) [8]. Le perdite idriche oltre a rappresentare uno spreco di una risorsa che può risultare scarsa comportano anche dei costi: nonostante l'acqua venga persa e quindi non utilizzata dagli utenti deve comunque essere trattata e trasportata e ciò implica delle spese da parte dei gestori. Per cercare di ridurre questo problema, sono stati previsti investimenti per la riduzione delle perdite di acqua potabile nelle reti idriche all'interno del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza *ref.*

La formazione di perdite può essere favorita da diverse tipologie di cause legate alla rete stessa o all'ambiente circostante: giunti e saracinesche non perfettamente funzionanti, pressioni di rete eccessive, variazioni di temperatura, danni accidentali dovuti a scavi. La formazione di perdite lungo le tubazioni è favorita dalla mancanza di manutenzione, dalla vetustà dei materiali e dalla presenza di corrosione [].

Uno dei principali ostacoli alla riparazione delle perdite è la loro localizzazione. La maggior parte delle perdite non sono visibili a livello del terreno, di conseguenza le fuoriuscite di acqua possono durare molto tempo senza essere identificate. Durante il periodo necessario alla localizzazione e riparazione della perdita è possibile ridurre il volume di acqua persa tramite la gestione delle pressioni di rete. Infatti le perdite sono direttamente proporzionali alle pressioni e riuscire a regolare e ridurre le pressioni permette di limitare le perdite oltre a diminuire il rischio che se ne formino di nuove.

La gestione delle pressioni in rete avviene generalmente settorizzando la rete idrica per facilitarne la gestione e utilizzando valvole di regolazione per ridurre le pressioni. Le valvole che si inseriscono in rete sono dispositivi atti a dissipare parte dell'energia posseduta dalla corrente. L'energia che viene dissipata è solitamente persa ma da alcuni anni si è iniziata a valutare la possibilità di utilizzarla per produrre energia elettrica. Sostituendo le valvole con delle turbine o con delle pompe come turbine (Pump As Turbine, PAT) è possibile regolare le pressioni in rete producendo contemporaneamente energia elettrica.

Un'altra possibilità è quella di inserire una turbina all'interno di una valvola così che l'energia dissipata dalla valvola possa essere trasformata direttamente in energia elettrica dalla turbina; con questo scopo è stata brevettata la GreenValve. L'energia prodotta dalla valvola può essere

utilizzata per la gestione e l'alimentazione dei dispositivi di controllo e se in eccesso essere immessa in rete

La scelta dei tubi su cui installare le valvole richiede lo studio della rete per valutare i tubi adatti e su cui l'installazione di una valvola possa dare effetti benefici in termini di regolazione delle pressioni e delle perdite. Per fare ciò negli ultimi anni sono stati utilizzati algoritmi euristici, principalmente algoritmi genetici. Infatti il problema di localizzazione dei tubi rientra tra i problemi di ottimizzazione che sono facilmente risolvibili tramite algoritmi. Un limite di questi metodi è rappresentato dall'incertezza che si può avere sulla soluzione finale, infatti non essendo algoritmi deterministici si possono trovare soluzioni che non sono globalmente ottimali. Si possono però adottare metodi e accorgimenti che limitano il rischio di trovare soluzioni solo localmente ottimali.

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo lo sviluppo di un metodo per il posizionamento e il settaggio di valvole in una rete di acquedotto, avendo come obiettivo la regolazione delle pressioni. Il metodo è basato sull'algoritmo Particle Swarm Optimization e implementa alcuni accorgimenti per rendere più efficace l'ottimizzazione della rete.

L'algoritmo Particle Swarm Optimization è un metodo di ottimizzazione per funzioni non lineari e non differenziabili sviluppato da Kennedy e Eberhart per simulare comportamenti sociali. È assimilabile ad altri metodi di ottimizzazione evolutivi come gli algoritmi genetici e la programmazione evolutiva.

L'ottimizzazione è eseguita ricercando la combinazione di variabili decisionali che massimizza o minimizza una funzione obiettivo che rappresenta matematicamente il problema da risolvere. Nell'ambito dell'ottimizzazione delle reti di acquedotto, un limite dell'algoritmo PSO può essere dato dalla nomenclatura assegnata ai tubi della rete, in quanto l'andamento della funzione obiettivo rispetto alle variabili decisionali non è sempre uniforme. Per limitare questo problema si possono eseguire più simulazioni cambiando la nomenclatura ai tubi così da valutare quale di esse influenza meno la soluzione.

Una volta definito il tubo o i tubi su cui installare le valvole, si può applicare l'algoritmo alla sola ricerca del setting così da ottimizzare maggiormente la soluzione e verificare che quella trovata non sia un minimo o massimo locale.

Per valutare l'efficacia e l'affidabilità del metodo, esso viene utilizzato per installare una o due valvole su una rete benchmark avendo come obiettivo la minimizzazione delle perdite, andando poi a confrontare i risultati ottenuti con quelli disponibili in letteratura.

Verificata l'affidabilità del metodo esso viene utilizzato per andare a posizionare una o più GreenValve nella rete benchmark volendo massimizzare l'uniformità delle pressioni avendo come vincolo la necessità di produrre sufficiente energia affinché la valvola si autosostenga. Vengono confrontate quattro funzioni obiettivo: due basate su un parametro detto coefficiente di uniformità e due basate sulla deviazione standard delle pressioni.

Per valutare l'efficacia delle funzioni obiettivo che hanno dato i migliori risultati in termini di minimizzazione di perdite sulla rete benchmark esse vengono utilizzate per ottimizzare il setting di valvole già presenti in una rete di dimensioni maggiori.

# Capitolo 2

## Stato dell'arte

### 2.1 Ottimizzazione di un problema

Un problema di ottimizzazione può essere scritto nella forma:

$$\min FF(\mathbf{x}) \quad \text{soggetto a: } g_i(\mathbf{x}) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.1)$$

dove:

- il vettore  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  contiene le variabili di ottimizzazione del problema (variabili decisionali);
- la funzione  $FF(\mathbf{x})$  è la funzione obiettivo ("fitness function");
- le  $m$  disequazioni  $g_i(\mathbf{x}) \leq b_i$  sono i vincoli del problema.

L'ottimizzazione del problema 2.1 è effettuata scegliendo la miglior soluzione in un insieme di possibili soluzioni che rispettano i vincoli del problema. La soluzione del problema è un vettore  $\mathbf{x}^*$  a cui corrisponde il valore di funzione obiettivo minore [9].

Se ad esempio si considera come problema la minimizzazione di un costo che varia secondo la legge  $f(\mathbf{x}) = f(x, y) = x^2 + y^2$ , si vorrà trovare il vettore  $\mathbf{x}^* = (0, 0)$  che minimizza  $f(\mathbf{x})$ .

La funzione obiettivo è la rappresentazione matematica del problema che si vuole andare a risolvere. È quindi fondamentale che la scelta della funzione obiettivo e dei vincoli imposti tenga conto di tutti i fattori che nella realtà influiscono su problema.

Il problema 2.1 considera la minimizzazione della funzione obiettivo, ma in alcuni casi si vuole cercare la combinazione di variabili decisionali che massimizzi la FF. Un esempio è dato dalla massimizzazione di un profitto, come fatto in [10].

L'ottimizzazione di un problema può essere eseguita tramite un algoritmo che calcola con una certa precisione la soluzione. Dalla fine degli anni '40, un grande sforzo è stato dedicato allo sviluppo di algoritmi per la risoluzione di varie classi di problemi di ottimizzazione, l'analisi delle loro proprietà e lo sviluppo di buone implementazioni software. L'efficacia di questi algoritmi varia considerevolmente e dipende da fattori, come la forma delle funzioni obiettivo e dei vincoli, il numero delle variabili e dei vincoli [9]. Come sarà meglio esposto nel capitolo 3, in questo lavoro la funzione obiettivo varia con le due variabili decisionali (tubo su cui installare la valvola e setting) in modo molto diverso, per questa ragione risulta necessario utilizzare degli accorgimenti per aumentare l'efficacia della ricerca e facilitare la convergenza della soluzione.

## Programmazione lineare

La programmazione lineare è un settore della ricerca operativa che si occupa di ottimizzare problemi lineari, cioè aventi come modello una funzione obiettivo lineare, sottoposta a vincoli lineari [11]. Il problema può essere scritto come:

$$\min \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad \text{soggetto a: } a_i^T \mathbf{x}, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.2)$$

dove i vettori  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_m) \in \mathcal{R}^n$  e gli scalari  $b_1, \dots, b_m \in \mathcal{R}$  sono parametri del problema [9].

Jowitt e Xu [3] utilizzano questo approccio per risolvere il problema di minimizzazione delle perdite in una rete benchmark andando preventivamente a linearizzare le equazioni che descrivono il problema.

### 2.1.1 Algoritmi genetici

Gli algoritmi genetici (GA) sono algoritmi euristici di ricerca ispirati ai meccanismi di selezione naturale [12]. In essi viene inizialmente generata una popolazione di soluzioni in cui ogni individuo (cromosoma) è composto da più elementi: i geni (le variabili decisionali). Per ogni cromosoma viene calcolata la funzione obiettivo.

Per cercare la soluzione ottimale gli algoritmi genetici si avvalgono di tre operatori [13]:

- selezione: le soluzioni da incrociare vengono scelte in base al loro adattamento rispetto alla funzione obiettivo;
- crossover o incrocio: ricombinazione di due soluzioni per generarne di nuove (vengono scambiati alcuni geni dei cromosomi adatti alla selezione);
- mutazione: modificazione casuale delle soluzioni ottenute.

L'algoritmo converge quando la soluzione creata non differisce significativamente dalla soluzione precedente.

Nicolini e Zovatto [6] e Araujo et al. [4] utilizzano questo approccio per risolvere il problema di minimizzazione delle perdite in una rete benchmark.

### 2.1.2 Particle Swarm Optimization

L'algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO) è un metodo di ottimizzazione per funzioni non lineari e non differenziabili sviluppato da Kennedy e Eberhart per simulare comportamenti sociali [14].

Questo algoritmo è quello che verrà utilizzato in questa tesi, si rimanda quindi al capitolo 3 per una spiegazione più esaustiva.

## 2.2 Minimizzazione delle perdite

Negli ultimi decenni una delle principali problematiche che gli enti gestori dei servizi idrici hanno dovuto affrontare è quella delle perdite di rete. Esse possono raggiungere valori del 30-40% del volume di acqua immessa nel sistema [4]. Secondo l'ISTAT in Italia nel 2020 le perdite totali in distribuzione erano pari al 42.2% dell'acqua immessa in rete [8].

Secondo l'International Water Association (IWA) l'acqua che viene immessa in rete può rappresentare un consumo autorizzato o una perdita. I consumi autorizzati possono essere misurati o non misurati, fatturati o non fatturati; la perdita d'acqua può essere una perdita apparente



(dovuta a imprecisioni del contatore o a consumi non autorizzati come ad esempio allacci abusivi) o una perdita reale (dovuta a perdite, interruzioni su condutture e laterali o impianti di stoccaggio) [6].

Esistono molti fattori che compromettono l'efficienza dei sistemi acquedottistici e che possono comportarne la rottura; uno dei fattori che influisce maggiormente sulle perdite è la pressione di rete [15]. Le perdite aumentano significativamente per pressioni più elevate [16] quindi un modo per limitare le perdite è rappresentato dalla regolazione delle pressioni. È comunque necessario mantenere una pressione sufficiente per garantire il corretto approvvigionamento dell'acqua agli utenti [15].

Al fine di ridurre le perdite alcuni aspetti sono di particolare importanza: gestione delle condotte e della pressione, velocità e qualità delle riparazioni, controllo attivo delle perdite [6]. Tra queste la gestione della pressione è la tecnica riconosciuta con il miglior rapporto efficacia-costi tra quelle disponibili [17]. La gestione della pressione e delle perdite presenta numerosi potenziali vantaggi: riduzione dei costi di trattamento e investimento, risparmio energetico e miglioramento del servizio ai clienti. Va comunque tenuto in considerazione che la regolazione delle pressioni non può eliminare le perdite ma permette di limitarle durante il periodo necessario a intervenire per ripararle e riabilitare il tratto di rete. La gestione della pressione può essere realizzata in diversi modi, dalla settorizzazione della rete con valvole di intercettazione (ovvero la suddivisione di una rete in settori o distretti più piccoli con regimi di pressione diversi) all'installazione di valvole regolatrici di portata o riduttrici di pressione [6].

Il posizionamento delle valvole regolatrici in rete con obiettivo la minimizzazione delle perdite è un problema di ottimizzazione in cui la funzione obiettivo solitamente tiene conto del volume di acqua perso. Molti autori hanno applicato diversi tipi di algoritmi per risolvere il problema.

Nicolini e Zovatto utilizzano l'algoritmo genetico NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm [18]) per minimizzare contemporaneamente il numero di valvole da installare e il volume di perdita avendo come variabili decisionali il tubo su cui installare la valvola e il setting [6]. In [19] Reis et al. utilizzano un algoritmo genetico per trovare la posizione e il settaggio delle valvole in modo da massimizzare la diminuzione del volume di perdita. Araujo et al. utilizzano un algoritmo genetico in una metodologia a due passaggi: viene cercato inizialmente il numero e la posizione della valvole e successivamente il setting da impostare [4].

In [20] viene descritta una metodologia per la diminuzione delle perdite che combina un algoritmo genetico con la simulazione semplificata della rete. Gli autori utilizzano una funzione obiettivo che tiene conto dei costi dovuti al volume di acqua perso e all'installazione e manutenzione delle valvole.

In [15], Ali osserva che le reti di acquedotto non sono sistemi casuali ma funzionano seguendo delle precise leggi fisiche. Questa informazione può essere utilizzata per eliminare a priori alcune zone dello spazio di ricerca: dato che i tubi non hanno tutti la stessa influenza sul funzionamento della rete, alcuni di essi possono essere esclusi dalle possibili posizioni in cui installare le valvole. Una volta ristretto lo spazio di ricerca Ali utilizza un algoritmo genetico ottimizzato per trovare la localizzazione e il setting di un numero fissato di valvole.

L'obiettivo di Jowitt e Xu [3] è quello di andare a minimizzare le perdite in una rete in cui sono già presenti tre valvole. Utilizzano quindi la programmazione lineare per trovare i setting ottimali da impostare alle valvole. Dato che le equazioni che reggono un sistema idraulico non sono lineari, i due autori utilizzano una derivazione del metodo di teoria lineare di Isaacs e Mills [21] adattandolo al loro problema.

In [22] De Paola et al. utilizzano il "Harmony Search Approach" per posizionare e trovare il setting delle valvole. La funzione obiettivo utilizzata non tiene conto direttamente delle perdite

ma vuole andare a minimizzare le pressioni considerando come vincolo la pressione minima che va mantenuta per garantire il servizio agli utenti.

In tabella 2.1 sono riportati gli studi descritti in questa sezione.

## 2.3 Recupero di energia in rete

I sistemi di distribuzione idrica richiedono un forte consumo di energia elettrica [24]: dal trattamento dell'acqua, al suo pompaggio, alla gestione degli impianti. Il consumo globale di acqua è destinato ad aumentare da oggi al 2050 di circa il 20 – 30% [25]. L'aumento di domanda implicherà un aumento dei costi e dell'emissione di gas serra legati alla gestione della risorsa idrica [26]. Per questo motivo nel tempo si è cercato un modo per ricavare energia elettrica all'interno della rete di distribuzione.

Le valvole di regolazione utilizzate per ridurre la pressione lavorano dissipando parte dell'energia posseduta dalla corrente. L'energia che viene dissipata è generalmente persa, ma nel tempo sono state studiate delle soluzioni per recuperarla e utilizzarla per produrre energia elettrica.

In letteratura la produzione di energia elettrica, ottenuta sfruttando l'energia dissipata nella regolazione delle pressioni, avviene tramite l'utilizzo di turbine o di pompe come turbine (Pumps As Turbines, PAT). L'utilizzo di pompe come turbine è stato proposto per la prima volta da Thoma negli anni '30 del novecento [27]. In seguito molti autori hanno ipotizzato di usare questi sistemi al posto delle valvole di regolazione. La ragione per cui si preferiscono le PAT alle turbine è il costo minore, la semplicità di applicazione e la disponibilità di ricambi a costo di una lieve diminuzione dell'efficienza.

In Ebrahimi et al. [28] viene utilizzato l'algoritmo PSO per sostituire delle valvole di regolazione PRV (Pressure Reducing Valve) con delle PAT. La funzione obiettivo tiene conto sia dell'energia prodotta dalle PAT che della diminuzione delle pressioni e quindi delle perdite; tra i vincoli imposti dal problema si ha il fatto che la pressione ai nodi quando si installano le PAT deve risultare il più simile possibile a quella iniziale quando in rete erano installate le PRV.

Corcoran et al. [29] utilizzano due metodi matematici tradizionali: il Non-Linear Programming e il Mixed-Integer Non-Linear Programming, per poi verificare il risultato utilizzando un algoritmo genetico. La funzione obiettivo da massimizzare è data dall'energia generata dalle turbine. È fissato a priori il massimo numero di turbine installabili che rappresenta quindi un vincolo del problema.

Per considerare contemporaneamente la produzione di energia e la diminuzione delle perdite, Fecarotta e McNabola [10] massimizzano il "Net Present Value" che è dato dalla somma del guadagno che si ha producendo energia e del risparmio che si ha diminuendo le perdite a cui viene sottratto il costo di installazione delle turbine.

Cimorelli et al. [24] utilizzano il Powell direction set method (PDSM) per massimizzare l'energia prodotta dalle PAT e il volume di acqua risparmiato regolando le pressioni.

In tabella 2.2 sono riportati gli studi descritti in questa sezione. Non sempre l'energia dissipata dalle valvole di regolazione è sufficiente a giustificare economicamente l'inserimento di un dispositivo di recupero come una PAT o una turbina. Questo limite si può considerare intorno ai 5-10 kW [30] di energia dissipata disponibile per il recupero. In questi casi è comunque possibile effettuare un'operazione di efficientamento del punto di regolazione inserendo un dispositivo di regolazione innovativo, la GreenValve [1].

Reference	Metodo	Rete utilizzata
Nicolini, M.; Zovatto, L.  "Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Networks" [6]	Algoritmo genetico NSGA-II per posizionare e trovare il setting delle valvole  FF: minimizzazione del numero di valvole e del volume di perdita	Rete benchmark di Jowitt e Xu [3]
Reis, L. F. R.; Porto, R. M.; Chaudry, F. H. "Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithms" [19]	Algoritmo genetico per trovare tubo e setting  FF: minimizzazione del volume di perdita	Rete benchmark di Jowitt e Xu [3]
Araujo L.S.; Ramos H.; Coelho S.T.  "Pressure Control for Leakage Minimization in Water Distribution Systems Management" [4]	Metodologia a due passaggi con algoritmo genetico per posizionare e trovare il setting delle valvole  FF: minimizzazione del volume di perdita	Rete benchmark di Jowitt e Xu [3]
Covelli, C.; Cozzolino, L.; Cimatorrelli, L.; Della Morte, R.; Pianese, D.  "Optimal Location and Setting of PRVs in WDS for Leakage Minimization" [20]	Metodologia che combina un algoritmo genetico con la simulazione semplificata della rete per trovare numero, il tubo su cui installare e il setting delle valvole  FF: minimizzazione dei costi dovuti al volume di acqua perso e all'installazione e manutenzione delle valvole	Rete Creaco e Pezzinga [23]
Ali, M.E.  "Knowledge-Based Optimization Model for Control Valve Locations in Water Distribution Networks" [15]	Metodologia che combina il restringimento dello spazio di ricerca con un algoritmo genetico ottimizzato per posizionare e trovare il setting delle valvole  FF: minimizzazione del volume di perdita	Rete benchmark di Jowitt e Xu [3]
Jowitt, P. W.; Xu, C. "Optimal valve control in water distributions networks" [3]	Programmazione lineare per trovare setting delle valvole  FF: minimizzazione del volume di perdita	Rete benchmark di Jowitt e Xu [3]
De Paola, F.; Galdiero, E.; Giugni, M.  "Location and Setting of Valves in Water Distribution Networks Using a Harmony Search Approach" [22]	"Harmony Search Approach" per posizionare e trovare il setting delle valvole	Rete benchmark di Jowitt e Xu [3]

Tabella 2.1: Tabella riassuntiva dello stato dell'arte sulla minimizzazione delle perdite

Reference	Metodo	Rete utilizzata
Ebrahimi S.; Riasi A.; Kandi A. "Selection optimization of variable speed pump as turbine (PAT) for energy recovery and pressure management" [28]	Algoritmo PSO per sostituire le PRV con delle PAT FF: massimizzazione dell'energia prodotta dalle PAT e mantenimento delle pressioni di rete	Rete Ebrahimi et al. [28]
Corcoran L.; McNabola A.; Coughlan, P. "Optimization of Water Distribution Networks for Combined Hydropower Energy Recovery and Leakage Reduction" [29]	Non-Linear Programming e Mixed-Integer Non-Linear Programming FF: massimizzazione dell'energia prodotta	Rete a 5 nodi [29] Rete benchmark Jowitt e Xu [3]
Fecarotta, O.; McNabola, A. "Optimal Location of Pump as Turbines (PATs) in Water Distribution Networks to Recover Energy and Reduce Leakage" [10]	Basic Open-source Nonlinear Mixed Integer programming FF: massimizzazione del "Net Present Value"	Rete benchmark Jowitt e Xu [3]
Cimorelli, L.; D'Aniello, A.; Cozzolino, L.; Pianese D. "Leakage reduction in WDNs through optimal setting of PATs with a derivative-free optimizer" [24]	Powell direction set method FF: massimizzazione dell'energia prodotta dalle PAT e del volume di acqua risparmiato	Rete benchmark Jowitt e Xu [3]

Tabella 2.2: Tabella riassuntiva dello stato dell'arte sulla produzione di energia in rete

### 2.3.1 GreenValve

La GreenValve è una valvola di regolazione che consente il recupero di parte dell'energia del fluido che scorre al suo interno [1] (fig.2.1). La valvola è accoppiata con una turbina utilizzata per produrre energia elettrica dall'energia meccanica della corrente.

La valvola è una valvola a sfera dotata di un otturatore che ruota attorno ad un asse di rotazione tra una posizione che consente il passaggio indisturbato del fluido e una che lo impedisce.

La turbina è una turbina ad asse verticale. Il rotore della turbina è configurato per ruotare continuamente sotto l'azione del fluido attorno a un asse coincidente con l'asse di rotazione dell'otturatore della valvola ed è collegato tramite un albero ad un generatore elettrico che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica [1].

La scelta di una turbina ad asse verticale, nonostante sia caratterizzata da efficienze teoriche minori di quelle ad asse orizzontale, è dovuta ai vantaggi che questa ha rispetto a quelle ad asse orizzontale: l'introduzione del rotore non richiede modifiche sostanziali nella struttura o nel principio di funzionamento della valvola a sfera, è di facile costruzione e di dimensioni compatte [1], la spinta meccanica può essere trasferita direttamente tramite un albero, lavorano indipendentemente dalla direzione del flusso [31].

Il funzionamento della Green Valve è strettamente legato all'apertura della valvola. Quando la valvola è totalmente aperta il flusso non è deviato e la turbina è omogeneamente colpita

dall'acqua. Se la valvola è chiusa per più di  $50^\circ$  la corrente è deviata e colpisce le pale della turbina in modo concentrato e non uniforme [31]. Ciò garantisce il miglior rendimento della valvola ad aperture intermedie.

L'installazione della GreenValve non necessita di variazioni nell'operatività della rete e ha come vantaggio la produzione di energia [31]. La produzione di energia da parte della valvole permette la sua installazione anche in zone remote dove non è presente la rete elettrica. Infatti in questo caso per alimentare i sistemi di controllo risulterebbe necessario utilizzare batterie che però presentano il limite della durata nel tempo. Sfruttando l'energia della corrente idrica la turbina collegata alla valvola produce sufficiente energia per alimentare i sistemi di controllo a distanza e in caso venga prodotta più energia di quella necessaria quella in eccesso può essere venduta.



Figura 2.1: GreenValve [1]



# Capitolo 3

## Metodo

In questo capitolo viene descritto il metodo utilizzato nei capitoli successivi per ottimizzare le reti di acquedotto. Questo metodo è incentrato sull'algoritmo Particle Swarm Optimization. Dati i limiti che hanno gli algoritmi euristici nel trovare la soluzione ottimale del problema (sezione 3.3), sono state considerate varie accortezze per aumentare l'affidabilità del metodo.

### 3.1 Particle Swarm Optimization

L'algoritmo Particle Swarm Optimization è un metodo di ottimizzazione per funzioni non lineari e non differenziabili sviluppato da Kennedy e Eberhart per simulare comportamenti sociali [14].

L'origine è legata a studi di vita artificiale e teorie sul comportamento di stormi di uccelli, banchi di pesci e sciami di insetti. È assimilabile ad altri metodi di ottimizzazione evolutivi come gli algoritmi genetici e la programmazione evolutiva.

Riguardo alla ricerca di cibo da parte di banchi di pesci il sociobiologo Wilson ha affermato che un individuo può beneficiare dalle scoperte ed esperienze fatte dagli altri membri del banco. Quando la ricerca avviene dove il cibo è distribuito in diverse aree, questo comportamento di mutuo aiuto è più vantaggioso della competizione [32]. Questa considerazione rappresenta una delle ipotesi fondamentali su cui si basa l'algoritmo PSO: i membri del gruppo possono imparare sia dalla loro stessa esperienza che da quella degli altri individui. Durante l'esplorazione dello spazio di ricerca, gli individui hanno accesso a due informazioni: la loro miglior posizione e la miglior posizione assunta globalmente dal gruppo. Queste informazioni vengono quindi utilizzate per indirizzare la ricerca [33].

L'obiettivo iniziale di Kennedy ed Eberhart era quello di simulare “la coreografia aggraziata ma imprevedibile di uno stormo di uccelli” [14].

La prima simulazione si basava su due principi cardine: “nearest-neighbor velocity matching” (la velocità dell'individuo considerato deve essere il più simile possibile a quella dell'individuo più prossimo) e “craziness” (follia: una componente casuale del processo). A ogni individuo (da qui in poi “particella”) sono state assegnate una posizione e una velocità iniziali. Durante le iterazioni a ogni particella veniva assegnata la velocità della particella più vicina. Così facendo si creava una sincronia nel movimento delle particelle che tendevano globalmente verso un'unica direzione. Dato che nella realtà gli stormi non seguono un'unica direzione ma essa viene cambiata continuamente, per dare alla simulazione quell'aspetto di variabilità è stato aggiunto all'algoritmo l'elemento casuale.

Riferendosi agli studi di Heppner e Grenander [34] in cui uno stormo cerca un campo dove atterrare, Kennedy e Eberhart hanno aggiunto alla simulazione un nuovo elemento: il “cornfield vector” (vettore del campo di mais) che rappresenta un punto nello spazio di ricerca che l'insieme

di particelle deve raggiungere (obiettivo). L'aggiunta di questo elemento forza il movimento delle particelle che voleranno e si scambieranno informazioni per localizzare l'obiettivo. Ciò comporta che la componente casuale data dalla "craziness" non risulta più necessaria in quanto le particelle cambieranno autonomamente traiettoria fino a trovare quella corretta.

All'inizio della simulazione le particelle si trovano in una posizione casuale e a ogni iterazione cambiano direzione secondo la legge:

$$X_{it} = X_{it-1} + V_{it} \quad (3.1)$$

dove:

- $X_{it}$  e  $X_{it-1}$  sono i vettori contenenti le posizioni delle particelle all'iterazione  $it$  e  $it - 1$ , rispettivamente;
- $V_{it}$  sono i vettori contenenti le velocità delle particelle all'iterazione  $it$ .

La velocità  $V_{it}$  è calcolata come:

$$V_{it} = V_{it-1} + r_1 \cdot c_1 \cdot (pbest - X_{it}) + r_2 \cdot c_2 \cdot (gbest - X_{it}) \quad (3.2)$$

- 
- $V_{it-1}$  è il vettore contenente le velocità delle particelle all'iterazione  $it - 1$ ;
- $r_1, r_2$  sono due numeri casuali tra 0 e 1;
- $pbest$  è il vettore contenente le migliori posizioni assunte dalle particelle nelle iterazioni precedenti;
- $gbest$  è la migliore posizione assunta globalmente dallo stormo;
- $c_1, c_2$  sono i pesi di  $pbest$  e  $gbest$ .

La velocità  $V_{it}$  è il termine che rappresenta la direzione seguita dalle particelle. Non va intesa come una velocità fisica per cui al suo aumentare diminuisce il tempo di arrivo in un punto prestabilito, ma come la variazione della traiettoria rispetto al punto  $X_{it-1}$ .

Le variabili  $pbest$  e  $gbest$  sono entrambe necessarie alla convergenza della simulazione:  $pbest$  rappresenta la memoria personale della particella creata in base all'esperienza fatta ("cognition part");  $gbest$  rappresenta la conoscenza collettiva che ogni particella cerca di seguire ("social part"). La velocità associata a  $pbest$  è stata chiamata da Kennedy e Eberhart "simple nostalgia" perché tende ad attirare la particella verso il miglior punto che essa ha occupato nelle iterazioni precedenti [14].

Nei casi in cui  $c_1$  risulta molto maggiore di  $c_2$  le particelle tendono a vagare autonomamente senza apprendere l'una dall'altra. Viceversa, lo stormo tende globalmente a un punto che però potrebbe non essere quello ottimale.

L'algoritmo è stato sviluppato inizialmente per problemi bidimensionali ed è stato poi esteso a problemi a  $n$  dimensioni con ottimi risultati.

Volendo applicare questo algoritmo all'ottimizzazione di un problema, il punto cercato dallo stormo può essere il massimo (o il minimo) della funzione obiettivo che rappresenta il problema. A ogni iterazione viene valutata la FF per tutte le particelle e se questa risulta maggiore (o minore) della FF legata a  $pbest$  o  $gbest$  questi vengono sostituiti; questo comporta che l'obiettivo che le particelle cercheranno di raggiungere può cambiare ad ogni iterazione.

Il diagramma di flusso dell'algoritmo PSO è illustrato in fig.3.1 [2].



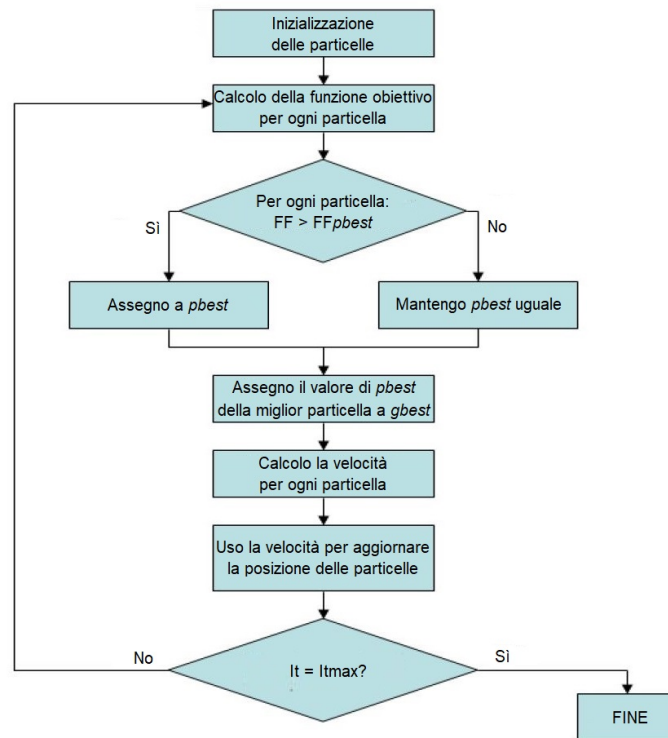


Figura 3.1: Diagramma di flusso dell’algoritmo PSO [2]

In [35] Shi e Eberhart hanno studiato l’equazione 3.2 e osservato che se venissero eliminate le velocità legate a  $p_{best}$  e  $g_{best}$  le particelle viaggerebbero con velocità costante fino a raggiungere il limite dello spazio di ricerca: il massimo della funzione obiettivo verrebbe trovato solo se si trovasse su una di quelle traiettorie. Escludendo invece il primo termine, la velocità sarebbe determinata solo dalle posizioni ottimali delle particelle che quindi tenderebbero a muoversi in una piccola area dello spazio di ricerca: la soluzione verrebbe trovata solo se si trovasse vicino a una delle posizioni iniziali.

Per trovare un equilibrio tra l’aspetto globale del primo termine e quello locale del secondo e del terzo, Shi e Eberhart propongono di inserire un coefficiente di inerzia,  $\omega$ :

$$V_{it} = \omega \cdot V_{it-1} + r_1 \cdot c_1 \cdot (p_{best} - X_{it}) + r_2 \cdot c_2 \cdot (g_{best} - X_{it}) \quad (3.3)$$

Questa definizione di velocità è quella che verrà utilizzata in questo lavoro.

Il coefficiente di inerzia è utilizzato per controllare l’impatto dell’esperienza delle particelle sulla loro velocità: con un valore elevato di coefficiente di inerzia viene facilitata l’esplorazione globale dello spazio di ricerca (“exploration”), mentre con un valore basso è facilitata la ricerca locale più dettagliata (“exploitation”). Può quindi convenire utilizzare valori di inerzia maggiori durante le prime iterazioni così da esplorare tutto lo spazio di ricerca e valori di inerzia minori durante le ultime iterazioni così da affinare la ricerca nell’area circoscritta dalle particelle [36].

## 3.2 Confronto tra algoritmo PSO e algoritmi genetici

In [37], Eberhart e Shi confrontano alcune caratteristiche dell’algoritmo PSO con quelle degli algoritmi genetici.

I cromosomi sono analoghi alle particelle nell’algoritmo PSO: rappresentano una possibile soluzione del problema. L’algoritmo PSO non lavora secondo degli operatori come i GA ma ci

sono comunque delle analogie tra i due metodi.

La selezione permette la riproduzione del cromosoma con il maggiore valore di FF che quindi passerà alla generazione successiva intatto (nessuno dei suoi geni viene cambiato). L'algoritmo PSO non utilizza la selezione ma tutte le particelle permangono iterazione dopo iterazione. L'algoritmo PSO è l'unico algoritmo evolutivo che non implementa la selezione.

Nei GA, alcuni cromosomi scelti casualmente scambiano tra di loro alcuni dei loro geni. Nell'algoritmo PSO il crossover è rappresentato dall'aleatorietà dei coefficienti  $r_1$  e  $r_2$  per cui si moltiplicano la seconda e la terza componente della velocità; infatti in questo caso non avvengono scambi tra le particelle ma le loro velocità (e quindi le loro traiettorie) sono influenzate le une dalle altre.

Teoricamente negli algoritmi genetici le particelle possono raggiungere tutti i punti dello spazio di ricerca. Questo avviene però con poca probabilità soprattutto alla fine della simulazione quando la soluzione converge e il valore della funzione obiettivo è in media molto alto; la mutazione di un gene creerebbe un cromosoma con un valore di FF minore che non sopravviverebbe alla selezione. Quindi anche se i GA sono in teoria ergodici (possono raggiungere qualsiasi punto del sistema), nella pratica questo non è vero. Nel caso dell'algoritmo PSO, se la velocità iniziale delle particelle è molto elevata queste possono raggiungere punti molto distanti nel dominio di ricerca. Inoltre, nonostante in un'iterazione una particella non possa raggiungere un qualsiasi punto del dominio, in più iterazioni ciò può accadere.

### 3.3 Vantaggi e limiti dell'algoritmo PSO

I vantaggi dell'algoritmo PSO rispetto agli algoritmi genetici sono [38]:

- la più facile implementazione e il minor numero di parametri da calibrare;
- la maggior memoria delle particelle del PSO rispetto a quella degli individui dei GA;
- nel PSO le particelle vengono mantenute da un'iterazione a quella successiva e si spostano sulla base della memoria personale e collettiva; nei GA gli individui meno adatti alla soluzione vengono eliminati e ciò può portare la ricerca attorno a un insieme di pochi individui rischiando di far convergere la soluzione prematuramente in un minimo o massimo locale.

Se i parametri dell'algoritmo PSO sono adeguatamente calibrati il rischio di convergere in un minimo o massimo locale è ridotto. Data la natura euristica dell'algoritmo, questa possibilità esiste comunque e per questa ragione ogni simulazione viene eseguita più volte con condizioni di partenza diverse per poter poi confrontare i risultati e valutare quale sia effettivamente il risultato ottimale.

#### 3.3.1 Gestione dei vincoli

Sia gli algoritmi genetici che l'algoritmo PSO non gestiscono direttamente i vincoli del problema che devono quindi essere inseriti all'interno della funzione obiettivo. Essa sarà quindi composta dal parametro che si vuole massimizzare o minimizzare a cui vanno sommati o sottratti, in base al caso, i coefficienti di penalità.

Come spiegato in [39] i coefficienti di penalità sono studiati ad hoc per ogni problema e in genere hanno una forma per cui se il vincolo che rappresentano è rispettato assumono valore nullo altrimenti assumono un valore proporzionale all'importanza della violazione. Il risultato

viene poi moltiplicato per un fattore di accrescimento (parametro di penalità) che assume ordini di grandezza che dipendono dall'importanza del vincolo stesso e dell'ordine di grandezza del parametro principale.

Se ad esempio una condizione non può essere assolutamente violata e il parametro principale ha un ordine di grandezza delle migliaia il fattore moltiplicativo può essere pari a  $10^{10}$  così da escludere le soluzioni che non rispettano il vincolo. Se si considera un vincolo che penalizza alcune soluzioni senza però escluderle completamente si può utilizzare un fattore moltiplicativo dello stesso ordine di grandezza del parametro.

### 3.3.2 Nomenclatura

Nel problema che si vuole affrontare di posizionamento e settaggio di una valvola, un limite dell'algoritmo PSO è dato dalla nomenclatura assegnata ai tubi della rete, in quanto l'andamento della funzione obiettivo rispetto alle due variabili decisionali (tubo e setting) è molto diverso. Fissato il tubo su cui installare la valvola, la FF varia in funzione del setting come in fig.3.2. Viceversa, in fig.3.3 è rappresentato l'andamento di FF al variare del tubo, fissato il setting.

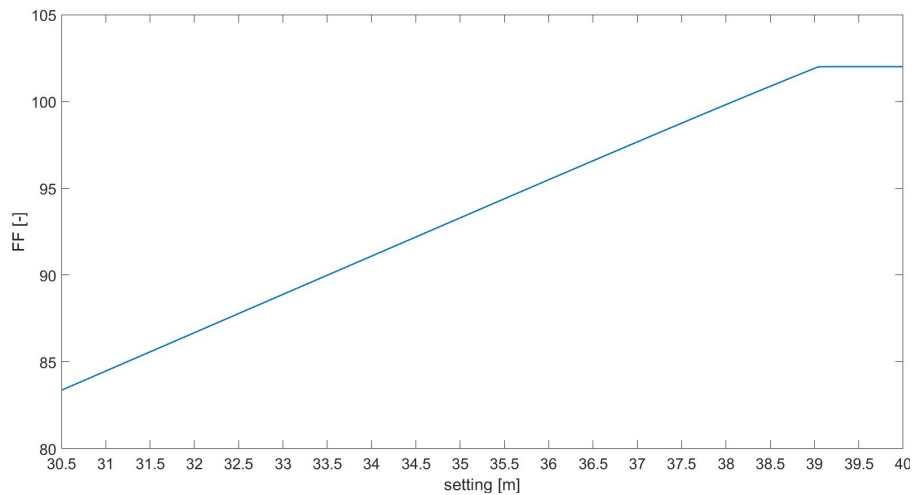


Figura 3.2: Variazione della funzione obiettivo con il setting a tubo fissato

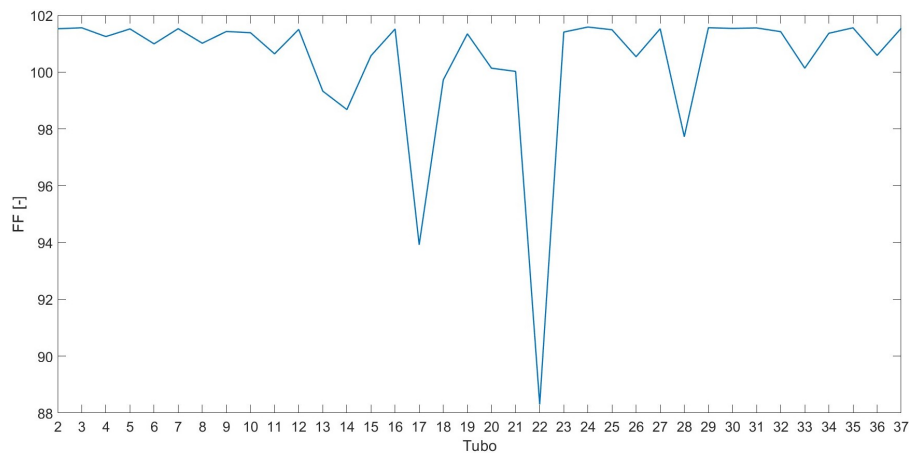


Figura 3.3: Variazione della funzione obiettivo con il tubo a setting fissato

Come si può osservare dalle figure 3.2 e 3.3 la FF varia monotonamente con il setting, mentre l'andamento con il tubo è irregolare. Questo implica che quando si calcola la nuova posizione

della particella secondo l'eq. 3.1 si può ottenere un valore di FF molto diverso anche se la posizione della particella è cambiata di poco e ciò può diminuire l'efficienza dell'algoritmo. Per limitare questo problema si possono eseguire simulazioni cambiando la nomenclatura ai tubi così da valutare quale nomenclatura influenza meno la soluzione. Inoltre conoscendo il comportamento della rete si conoscono i tubi più influenti, che sono quelli su cui più verosimilmente la valvola dovrà essere posizionata. Si possono anche ordinare i tubi in modo che quelli più influenti si trovino al centro della lista di tubi selezionabili così che siano più facilmente raggiungibili dall'algoritmo.

### 3.3.3 Ricerca del setting

L'algoritmo PSO ricerca contemporaneamente il tubo su cui installare la valvola e il setting da impostare.

Nel caso si voglia installare una singola valvola le variabili da ottimizzare sono due e solitamente l'algoritmo riesce a trovare la soluzione ottimale con sufficiente precisione. Quando si vogliono installare due valvole, le variabili decisionali diventano quattro e non sempre l'algoritmo riesce a trovare la soluzione corretta. Per questa ragione per avere la certezza che si sia trovata la soluzione migliore, una volta definito il tubo o i tubi su cui conviene installare le valvole, si può applicare l'algoritmo alla sola ricerca del setting così da dimezzare le variabili decisionali e facilitare la convergenza della soluzione. Questa operazione non permette comunque di verificare il corretto posizionamento delle valvole.

La ricerca del setting ottimale può partire da valori casuali, generati dall'algoritmo, oppure dai valori di setting trovati durante la prima fase di ricerca. Nel primo caso le particelle si muoveranno in tutto lo spazio di ricerca; nel secondo caso la ricerca sarà concentrata in una zona più ristretta, ciò può portare a un risultato migliore, ma se il setting da cui si parte è vicino a un minimo locale si rischia di non riuscire a raggiungere il minimo assoluto.

In figura 3.4 è rappresentato il diagramma di flusso che si segue nota la funzione obiettivo.

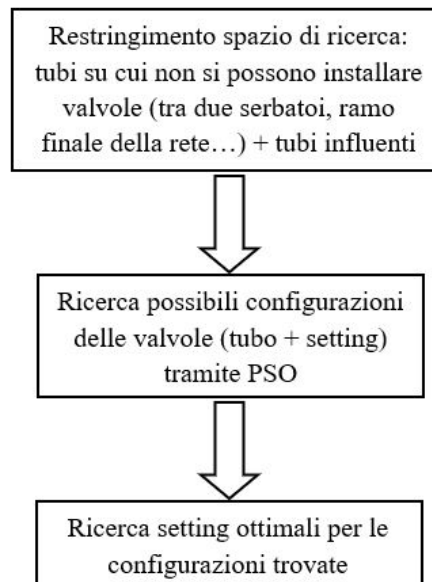


Figura 3.4: Diagramma di flusso del metodo

# Capitolo 4

## Analisi della consistenza e validazione del metodo

Per verificare la robustezza del metodo descritto nel capitolo 3, esso viene applicato alla minimizzazione delle perdite su una rete benchmark [3] così da poter confrontare i risultati con casi noti da letteratura ([4] e [6]).

### 4.1 Rete benchmark

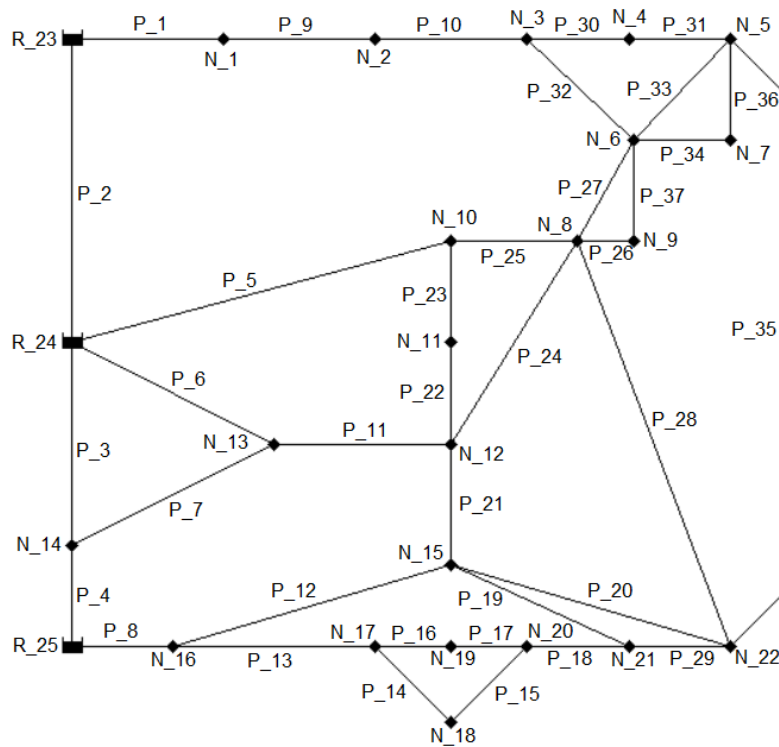


Figura 4.1: Rete benchmark proposta da Jowitt e Xu [3]

La rete benchmark (fig. 4.1) è formata da 22 nodi e 3 sorgenti collegati tra loro da 37 tubi. Le sorgenti sono modellate come riserve infinite di acqua caratterizzate da una quota che può variare nel tempo. In tabella 4.1 sono riassunte le caratteristiche dei tubi (lunghezza, diametro, coefficiente di Hazen-Williams), dei nodi (quota, domanda di base, coefficiente di perdita) e

delle sorgenti (quota base) utilizzate in [4].

ID tubo	L[m]	D[mm]	Coeff. H-W [-]	ID node	Z[m]	Domanda base [ $\frac{L}{s}$ ]	$K_f$ [ $\frac{L}{s \cdot m^{1/2}}$ ]
P_1	606	457	110	N_1	18	5	0.012055
P_2	454	457	110	N_2	18	10	0.033656
P_3	2782	229	105	N_3	14	0	0.032088
P_4	304	381	135	N_4	12	5	0.005562
P_5	3382	305	100	N_5	14	30	0.018383
P_6	1767	475	110	N_6	15	10	0.019238
P_7	1014	381	135	N_7	14.5	0	0.0053
P_8	1097	381	6	N_8	14	20	0.018853
P_9	1930	457	110	N_9	14	0	0.003532
P_10	5150	305	10	N_10	15	5	0.019837
P_11	762	457	110	N_11	12	10	0.00627
P_12	914	229	125	N_12	15	0	0.02441
P_13	822	305	140	N_13	23	0	0.016842
P_14	411	152	100	N_14	20	5	0.01949
P_15	701	229	110	N_15	8	20	0.028884
P_16	1072	229	135	N_16	10	0	0.013467
P_17	864	152	90	N_17	7	0	0.010957
P_18	711	152	90	N_18	8	5	0.005286
P_19	832	152	90	N_19	10	5	0.009203
P_20	2334	229	100	N_20	7	0	0.010819
P_21	1996	229	95	N_21	10	0	0.020118
P_22	777	229	90	N_22	15	20	0.034997
P_23	542	229	90				
P_24	1600	457	110				
P_25	249	305	105	ID sorgente	z [m]		
P_26	443	229	90	R_23	54.66		
P_27	743	381	110	R_24	54.6		
P_28	931	229	125	R_25	54.5		
P_29	2689	152	100				
P_30	326	152	100				
P_31	844	229	110				
P_32	1274	152	100				
P_33	1115	229	90				
P_34	615	381	110				
P_35	1408	152	100				
P_36	500	381	110				
P_37	300	299	90				

Tabella 4.1: Dati della rete di Jowitt e Xu

Il carico idraulico delle sorgenti non è costante ma varia durante la giornata. Per meglio confrontare i risultati con quelli di Araujo [4] è stata utilizzata la stessa variazione di quota delle sorgenti (fig. 4.2) e la stessa curva di domanda (fig. 4.3).

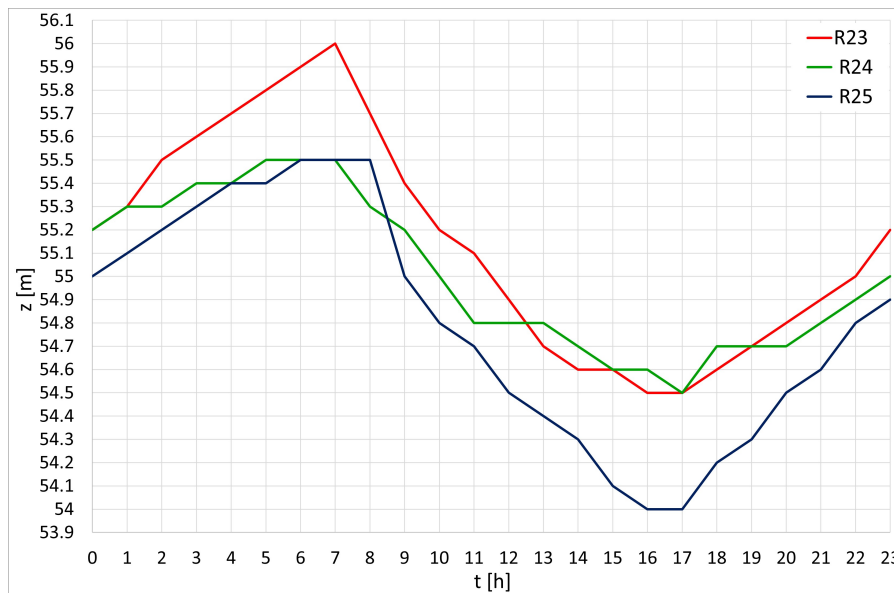


Figura 4.2: Andamento nel tempo del carico idraulico delle sorgenti [4]

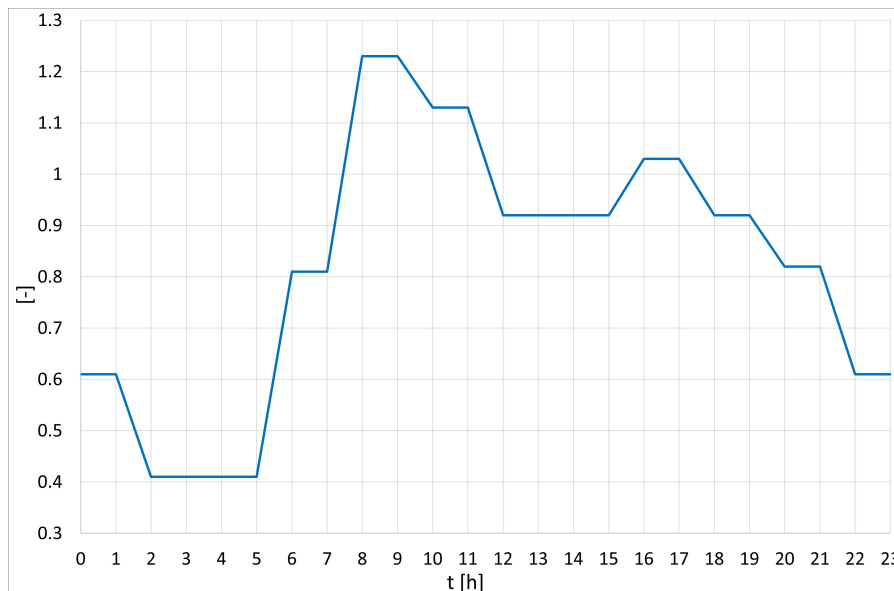


Figura 4.3: Andamento nel tempo del coefficiente moltiplicativo della domanda,  $\alpha$  [4]

#### 4.1.1 Condizione di partenza

Nelle figure 4.4 e 4.5 sono rappresentate le condizioni di pressione e portata per domanda minima e massima quando non ci sono valvole installate in rete.

Inizialmente le pressioni risultano abbastanza elevate (media giornaliera di 38.5 metri) con pressioni maggiori quando la domanda è minima (fig. 4.4). I nodi a pressioni maggiore sono quelli nella parte bassa della rete dove le quote risultano minori.

La sorgente R\_23 serve i nodi N\_1, N\_2 e fornisce parte della richiesta di N\_3, oltre a scambiare portata con la sorgente R\_24. Il resto della rete è fornito dalle sorgenti R\_24 e R\_25. R\_25 fornisce più di metà della domanda dei nodi N\_16, N\_17, N\_18 ed N\_19, mentre i restanti nodi sono forniti principalmente da R\_24 tramite i tubi centrali della rete (in rosso in figura 4.5).

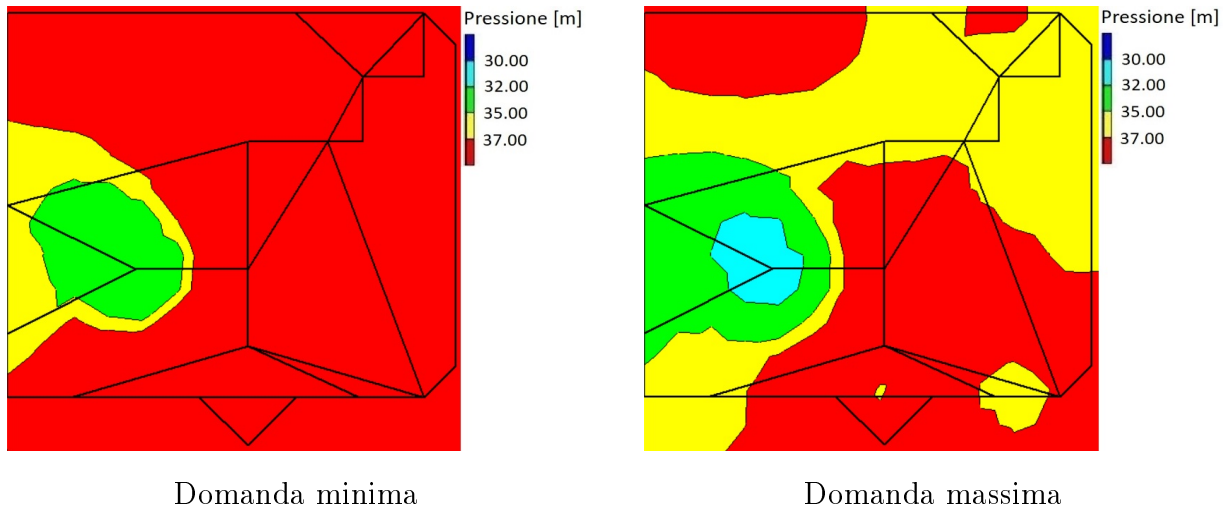


Figura 4.4: Pressioni in rete senza valvole

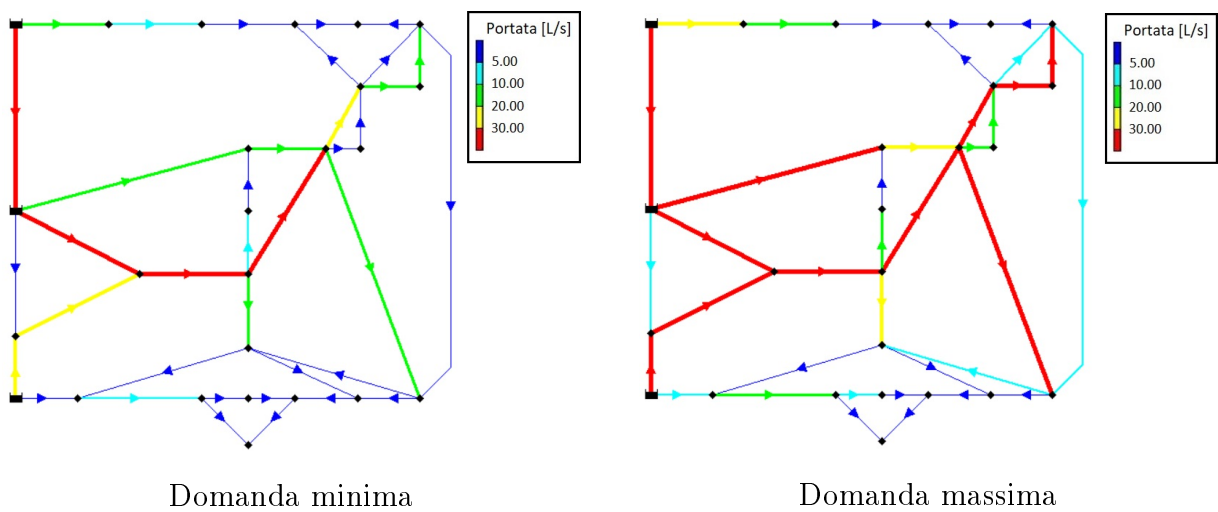


Figura 4.5: Portate in rete senza valvole

## 4.2 Formulazione del problema

L'ottimizzazione del problema richiede la minimizzazione del volume di perdita tenendo in considerazione i vincoli idraulici e i vincoli specifici del problema.

I vincoli idraulici sono rappresentati dall'equazione di continuità e dall'equazione del moto [6] e sono tenuti in conto tramite l'accoppiamento dell'algoritmo con il simulatore idraulico Epanet [40]. L'altro vincolo da tenere in considerazione è la pressione minima ai nodi da garantire per il corretto approvvigionamento agli utenti ed è considerato tramite una penalità all'interno della funzione obiettivo (sottosezione 3.3.1).

### 4.2.1 Equazione di continuità

Il principio di conservazione della massa implica che l'equazione di continuità (eq. 4.1) sia verificata in tutti i nodi della rete.

$$\sum_{j=1}^{N_{p,i}} Q_{ij,t} = \alpha_t \cdot q_{base,i} + q_{leak,it} \quad i = 1 \dots N_n \quad (4.1)$$



- $Q_{ij,t}$  è la portata che passa tra il nodo  $i$  e il nodo  $j$  al tempo  $t$  (considerata positiva se entrante al nodo  $i$ , negativa se uscente);
- $N_{p,i}$  è il numero totale di tubi collegati al nodo  $i$ ;
- $\alpha_t$  è il coefficiente moltiplicativo della domanda base al tempo  $t$ ;
- $q_{base,i}$  è la domanda base del nodo  $i$ ;
- $q_{leak,it}$  è la perdita dal nodo  $i$  al tempo  $t$ ;
- $N_n$  è il numero di nodi della rete.

Tutte le portate sono in  $\frac{L}{s}$ .

### Domanda idrica

Ogni sistema di distribuzione è caratterizzato da una curva di domanda che varia in funzione del tipo di utenze che la rete serve: quando le utenze sono principalmente civili la curva è caratterizzata solitamente da due massimi (uno la mattina e uno la sera), quando le utenze sono principalmente industriali l'andamento della domanda risulta più costante durante la giornata. Per modellare il funzionamento della rete a ogni utente è assegnata una domanda base che viene poi moltiplicata per un coefficiente moltiplicativo  $\alpha_t$  che varia durante la giornata in base alla curva di domanda assegnata alla rete o al nodo.

### Perdita idrica

Le perdite sono state calcolate secondo la formula utilizzata da Araujo et al. in [4] e Nicolini e Zovatto in [6] che mette in relazione la portata persa con la pressione di esercizio della rete:

$$q_{leak,it} = K_{f,i} \cdot p_{i,t}^\gamma \quad i = 1 \dots N_n \quad (4.2)$$

dove:

- $K_{f,i}$  è il coefficiente di perdita;
- $p_{i,t}$  è la pressione al nodo  $i$  al tempo  $t$  misurata in metri;
- $\gamma$  è l'esponente di perdita assunto pari a 1.18 ([3],[4],[6]);

Il coefficiente di perdita  $K_{f,i}$  è calcolato come:

$$K_{f,i} = c \cdot 0.5 \cdot \sum_{j=1}^{N_{p,i}} L_{ij} \quad i = 1 \dots N_n \quad (4.3)$$

dove:

- $c$  è il coefficiente che mette in relazione la perdita per unità di lunghezza del tubo alla pressione di esercizio e dipende dalle caratteristiche del sistema (età, deterioramento del tubo, proprietà del suolo...). È assunto pari a  $10^{-5}$  [3];
- $L_{ij}$  è la lunghezza del tubo che connette il tubo  $i$  al tubo  $j$  in metri.

In questo lavoro sono stati considerati direttamente i valori di  $K_{f,i}$  riportati in tabella 4.1 utilizzati in [4].

### 4.2.2 Equazione del moto

Il principio di conservazione dell'energia implica che l'equazione del moto (eq. 4.4) sia verificata in tutti i tubi della rete.

$$H_{i,t} - H_{j,t} = h_{ij,t} \quad (4.4)$$

- $H_{i,t}$  è il carico al nodo  $i$  al tempo  $t$  in  $m$ ;
- $H_{j,t}$  è il carico al nodo  $j$  al tempo  $t$  in  $m$ ;
- $h_{ij,t}$  è la perdita di carico tra il nodo  $i$  e il nodo  $j$  al tempo  $t$  in  $m$ ;

### Perdite di carico

Le perdite di carico sono calcolate tramite la formula di Hazen-Williams:

$$h_{ij,t} = 10.668 \cdot HW_{ij}^{-1.852} \cdot d_{ij}^{-4.871} \cdot L_{ij} \cdot Q_{ij,t}^{1.852} \quad (4.5)$$

dove:

- $HW_{ij}$  è il coefficiente di Hazen-Williams del tubo che collega i nodi  $i$  e  $j$ ;
- $d_{ij}$  è il diametro del tubo che collega i nodi  $i$  e  $j$ .

## 4.3 Funzione obiettivo

La funzione obiettivo da minimizzare è data dalla somma del volume di perdita e del coefficiente di penalità che tiene conto della violazione della condizione sulla pressione minima:

$$FF = W_{leak} + PF_1 \quad (4.6)$$

Il volume di perdita è calcolato come la somma dei volumi persi dai singoli nodi durante l'intera simulazione:

$$W_{leak} = \sum_{i=1}^{N_n} w_{leak,i} = \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{t=1}^T q_{leak,it} \cdot \frac{3600}{1000} \quad [m^3] \quad (4.7)$$

Il coefficiente di penalità è calcolato come:

$$PF_1 = p_1 \cdot \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{t=1}^T \max \{0, p_{min} - p_{i,t}\} \quad (4.8)$$

con  $p_1 = 10^5$  e  $p_{min} = 30 m$ .

Il coefficiente di penalità  $PF_1$  considera solo i nodi con domanda ( $N_c$ ) in quanto lì la pressione deve essere mantenuta sopra i 30 metri per garantire il servizio agli utenti, negli altri nodi non è invece necessario rispettare questo vincolo.

In assenza di valvole installate in rete il volume di perdita in un'ora è dell'ordine di un centinaio di metri cubi. Imponendo  $p_1 = 10^5$  il valore di  $PF_1$  risulta sufficientemente elevato da pesare più di  $W_{leak}$  sul valore di  $FF$ .

Osservando l'equazione 4.8 si vede che se la pressione al nodo  $i$  al tempo  $t$  è maggiore di 30 m il coefficiente di penalità risulta uguale a zero e la funzione obiettivo è data solo dal volume di perdita; nei nodi in cui il vincolo sulla pressione non è rispettato al volume di perdita si somma il coefficiente di penalità che ha un ordine di grandezza di  $10^5$ .

## 4.4 Nomenclatura

Dato il limite legato alla nomenclatura esposto nella sottosezione 3.3.2 sono state eseguite delle simulazioni sulla rete benchmark cambiando la nomenclatura dei tubi così da valutare se l'algoritmo restituisse i tubi corretti rispetto ai risultati di letteratura ([4], [6]). In questo modo è stato possibile valutare quanto la soluzione trovata dall'algoritmo dipenda dal numero assegnato ai tubi e tra le nomenclature proposte è stata scelta per le simulazioni quella che restituiva i risultati migliori. Le nomenclature sono state scelte usando criteri diversi: topografia della rete, portata passante e correlazione dei tubi.

### 4.4.1 Topografia della rete

Sono state utilizzate tre tipi di nomenclatura topografica: spirale dall'esterno al centro della rete in senso orario (T1, fig. 4.6), dal basso verso l'alto e da sinistra verso destra (T2, fig. 4.7), spirale dal centro verso l'esterno della rete in senso orario (T3, fig. 4.8).

Sono state eseguite delle simulazioni utilizzando queste tre nomenclature e i risultati ottenuti sono stati confrontati in termini di tubo scelto per installare la valvola. La nomenclatura per cui il tubo scelto corrispondeva più volte a quello dei risultati di letteratura è stato successivamente confrontato con i risultati ottenuti utilizzando gli altri due criteri di nomenclatura.

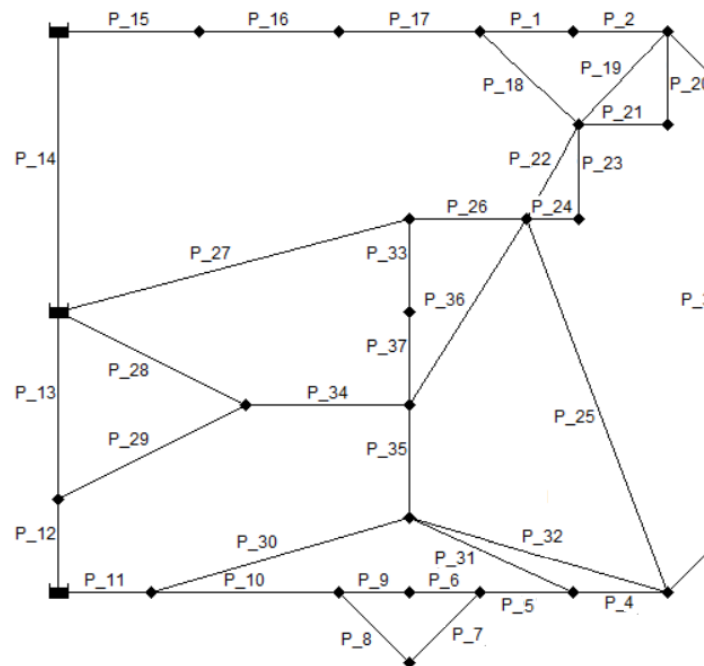


Figura 4.6: Rete benchmark, nomenclatura *T1*

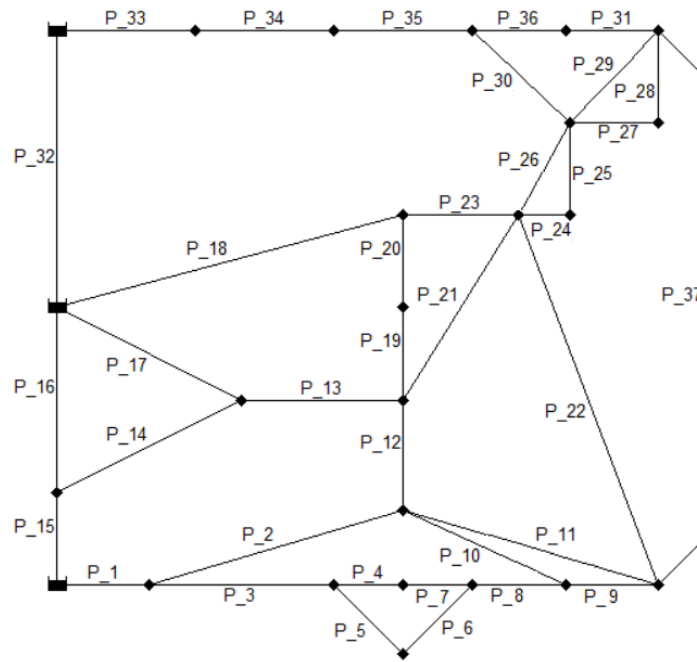


Figura 4.7: Rete benchmark, nomenclatura  $T2$

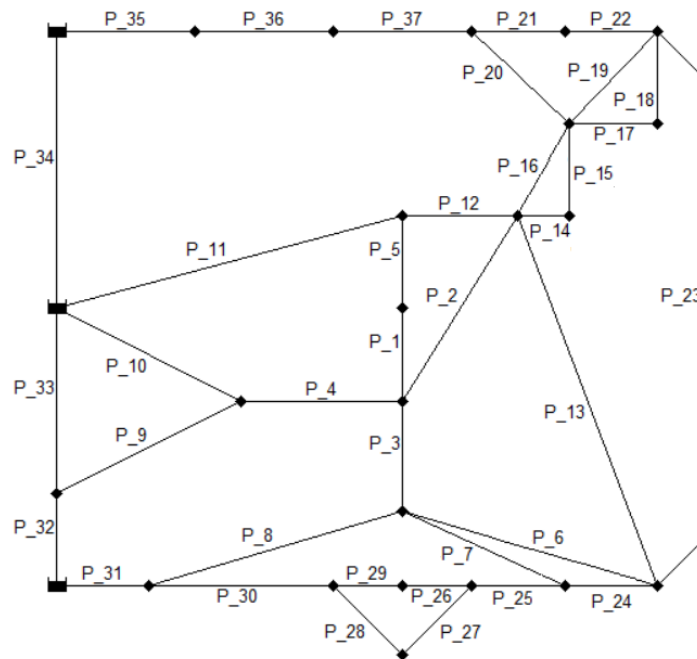


Figura 4.8: Rete benchmark, nomenclatura  $T3$

#### 4.4.2 Portata passante

È stata eseguita una simulazione senza valvole così da poter ordinare i tubi secondo la portata passante durante le ventiquattro ore: sono state sommate le portate orarie di ogni tubo e i valori poi sono stati ordinati in senso decrescente. La nomenclatura è stata assegnata partendo dal centro dell'elenco (al tubo con portata maggiore è stato assegnato l'ID  $P_{19}$ ) per poi allontanarsi da esso così che i tubi con portata minore fossero al limite della nomenclatura ( $P_1$  e  $P_{37}$ ). Questo perché dato il suo funzionamento, l'algoritmo ha più possibilità di

trovare tubi al centro dell'elenco che agli estremi. In figura 4.9 è riportata la rete con la nomenclatura  $Q_{sort}$ .

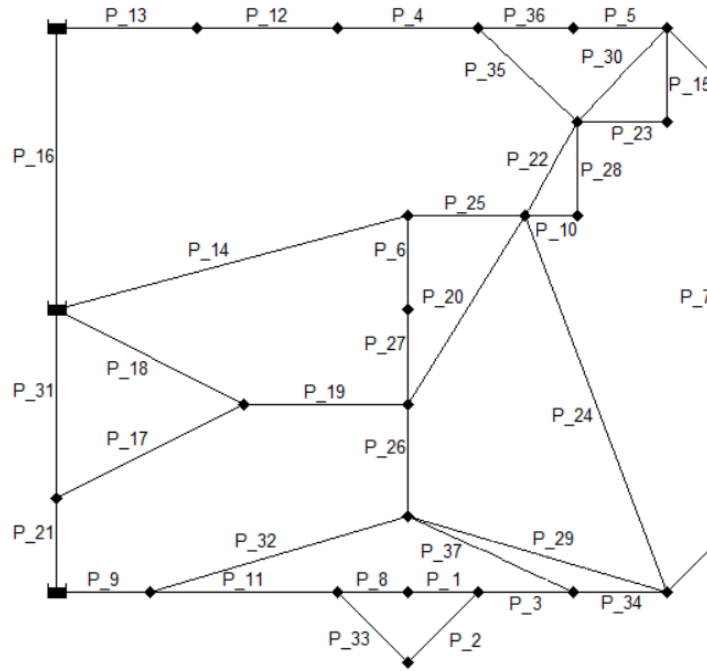


Figura 4.9: Rete benchmark, nomenclatura  $Q_{sort}$

### 4.4.3 Correlazione tra i tubi

È stata calcolata la matrice di correlazione tra le portate passanti nei tubi andando a calcolare il coefficiente di correlazione di Pearson,  $PCC$ , similmente a come fatto in [41]. In questo modo è possibile valutare quali tubi hanno valori di correlazione totale maggiori e quindi hanno maggiore influenza sulla rete.

Le serie temporali delle portate passanti nei tubi sono assimilabili a campioni estratti da variabili aleatorie,  $Q_i$ ,  $i = 1 \dots N_{tubi}$ , di cui si può calcolare il coefficiente di correlazione di Pearson come:

$$PCC_{Q_i, Q_j} = \frac{\sigma_{Q_i, Q_j}}{\sigma_{Q_i} \cdot \sigma_{Q_j}} = \frac{\sum_{t=1}^T (q_{i,t} - \bar{Q}_i) \cdot (q_{j,t} - \bar{Q}_j)}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (q_{i,t} - \bar{Q}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{t=1}^T (q_{j,t} - \bar{Q}_j)^2}} \quad i = 1 \dots N_{tubi}, j = 1 \dots N_{tubi} \quad (4.9)$$

con:

- $Q_i$  e  $Q_j$ : serie delle portate passanti per i tubi  $i$  e  $j$ , rispettivamente;
- $\sigma_{Q_i, Q_j}$ : covarianza di  $Q_i$  e  $Q_j$ ;
- $\sigma_{Q_i}$  e  $\sigma_{Q_j}$ : varianza di  $Q_i$  e  $Q_j$ , rispettivamente;
- $q_{i,t}$  e  $q_{j,t}$ : componenti di  $Q_i$  e  $Q_j$ , rispettivamente;

In figura 4.10 è riportata la rete con la nomenclatura  $PCC$ .

In tabella 4.2 sono riportati i nomi dei tubi: in ogni riga è riportato il nome del tubo in una nomenclatura facendo riferimento alla nomenclatura di Jowitt e Xu (fig. 4.1). Le righe evidenziate sono quelle dei tubi che vengono ottenuti come soluzione in letteratura.

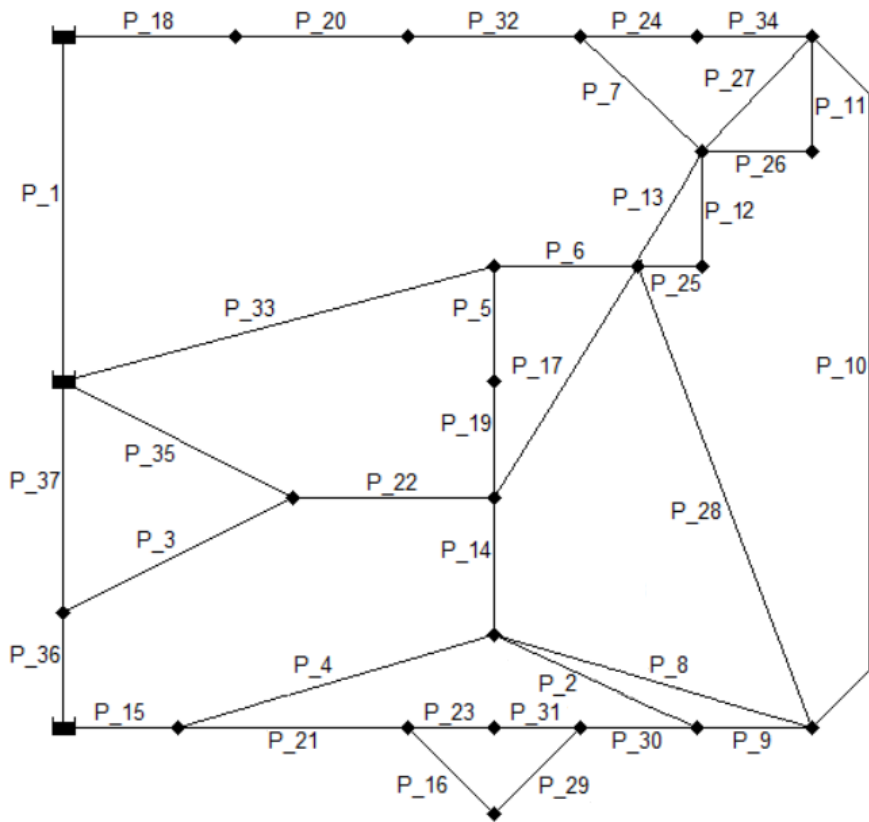


Figura 4.10: Rete benchmark, nomenclatura PCC

Jowitt e Xu	T1	T2	T3	Qsort	PCC
P_1	P_15	P_33	P_35	P_13	P_18
P_2	P_14	P_32	P_34	P_16	P_1
P_3	P_13	P_16	P_33	P_31	P_37
P_4	P_12	P_15	P_32	P_21	P_36
P_5	P_27	P_18	P_11	P_14	P_33
P_6	P_28	P_17	P_10	P_18	P_35
P_7	P_29	P_14	P_9	P_17	P_3
P_8	P_11	P_1	P_31	P_9	P_15
P_9	P_16	P_34	P_36	P_12	P_20
P_10	P_17	P_35	P_37	P_4	P_32
P_11	P_34	P_13	P_4	P_19	P_22
P_12	P_30	P_2	P_8	P_32	P_4
P_13	P_10	P_3	P_30	P_11	P_21
P_14	P_8	P_5	P_28	P_33	P_16
P_15	P_7	P_6	P_27	P_2	P_29
P_16	P_9	P_4	P_29	P_8	P_23
P_17	P_6	P_7	P_26	P_1	P_31
P_18	P_5	P_8	P_25	P_3	P_30
P_19	P_31	P_10	P_7	P_37	P_2
P_20	P_32	P_11	P_6	P_29	P_8
P_21	P_35	P_12	P_3	P_26	P_14
P_22	P_37	P_19	P_1	P_27	P_19

P_23	P_33	P_20	P_5	P_6	P_5
P_24	P_36	P_21	P_2	P_20	P_17
P_25	P_26	P_23	P_12	P_25	P_6
P_26	P_24	P_24	P_14	P_10	P_25
P_27	P_22	P_26	P_16	P_22	P_13
P_28	P_25	P_22	P_13	P_24	P_28
P_29	P_4	P_9	P_24	P_34	P_9
P_30	P_1	P_36	P_21	P_36	P_24
P_31	P_2	P_31	P_22	P_5	P_34
P_32	P_18	P_30	P_20	P_35	P_7
P_33	P_19	P_29	P_19	P_30	P_27
P_34	P_21	P_27	P_17	P_23	P_26
P_35	P_3	P_37	P_23	P_7	P_10
P_36	P_20	P_28	P_18	P_15	P_11
P_37	P_23	P_25	P_15	P_28	P_12

Tabella 4.2: Confronto dei nomi dei tubi nelle diverse nomenclature

#### 4.4.4 Risultati

##### Topografia della rete

Per trovare la nomenclatura migliore tra quelle topografiche è stato utilizzato l'algoritmo di minimizzazione delle perdite per posizionare una singola valvola. Sono state eseguite dieci simulazioni da 24 ore per ogni nomenclatura per valutare quante volte l'algoritmo restituisce il tubo corretto. In tabella 4.3 sono riportati i risultati. Nella prima riga di fianco alla nomenclatura è riportato il nome del tubo che l'algoritmo dovrebbe scegliere.

Simulazione	Rete T1 - P_34	Rete T2 - P_13	Rete T3 - P_4
1	P_34	P_13	P_4
2	P_25	P_13	P_36
3	P_34	P_13	P_16
4	P_36	P_12	P_35
5	P_34	P_21	P_4
6	P_34	P_21	P_13
7	P_25	P_13	P_16
8	P_34	P_13	P_13
9	P_34	P_21	P_4
10	P_34	P_13	P_11

Tabella 4.3: Risultati di posizionamento di una valvola per le nomenclature topografiche

Riferendosi ai risultati di letteratura, considerando il posizionamento di una singola valvola il tubo che l'algoritmo dovrebbe restituire è P\_34 per T1, P\_13 per T2 e P\_4 per T3. Confrontando i risultati in tabella 4.3, la nomenclatura T1 è quella per cui l'algoritmo restituisce più volte il tubo corretto (sette simulazioni su dieci) ed è quindi stata utilizzata nel confronto successivo con gli altri due criteri di nomenclatura.

**Confronto tra  $T1$ ,  $Qsort$  e  $PCC$** 

Il confronto tra i tre criteri di nomenclatura è stato eseguito considerando sia il posizionamento di una valvola che di due ed eseguendo le simulazioni per ogni fattore di domanda separatamente. Per ogni nomenclatura e per ogni fattore di domanda sono state eseguite dieci simulazioni ed è stata scelta quella con valore di funzione obiettivo maggiore. In tabella 4.4 sono riportati i tubi scelti per ogni fattore di domanda.

	fattore di domanda	T1 - P_34	Qsort - P_19	PCC - P_22
1 valvola	0.61	P_34	P_19	P_22
	0.41	P_34	P_19	P_22
	0.81	P_34	P_19	P_22
	1.23	P_34	P_26	P_14
	1.13	P_34	P_19	P_22
	0.92	P_34	P_19	P_22
	1.03	P_34	P_19	P_22
	0.82	P_34	P_19	P_22
	fattore di domanda	T1 - P_15 P_34	Qsort - P_13 P_19	PCC - P_18 P_22
2 valvole	0.61	P_5, P_34	P_19, P_29	P_8, P_22
	0.41	P_10, P_34	P_11, P_19	P_18, P_22
	0.81	P_10, P_34	P_19, P_29	P_18, P_22
	1.23	P_11, P_22	P_19, P_29	P_20, P_22
	1.13	P_3, P_34	P_19, P_29	P_8, P_22
	0.92	P_10, P_34	P_19, P_29	P_20, P_22
	1.03	P_32, P_34	P_26, P_22	P_17, P_20
	0.82	P_4, P_34	P_19, P_11	P_8, P_22

Tabella 4.4: Risultati di posizionamento di una e due valvole per i diversi tipi di nomenclatura

Riferendosi ai risultati di letteratura, considerando il posizionamento di una singola valvola il tubo che l'algoritmo dovrebbe restituire è P\_34 per  $T1$ , P\_19 per  $Qsort$ , P\_22 per  $PCC$ ; nel caso di due valvole: P\_15 e P\_34 per  $T1$ , P\_13 e P\_19 per  $Qsort$ , P\_18 e P\_22 per  $PCC$ . Nel caso del posizionamento di una singola valvola la nomenclatura  $T1$  è quella che restituisce maggiormente il tubo corretto, ma nel caso di due valvole non restituisce mai la coppia corretta. La nomenclatura  $PCC$  non restituisce il tubo corretto per un fattore di domanda per una valvola ma restituisce la coppia corretta per due volte. Dato che la nomenclatura  $PCC$  è quella per cui l'algoritmo trova più spesso la soluzione rispetto ai risultati di letteratura, è stata adottata negli esperimenti.

Si fa comunque notare che nel caso della nomenclatura  $Qsort$  una coppia di tubi (P\_19 e P\_29) viene scelta per cinque fattori di domanda su otto. Questa può essere una configurazione diversa da quella trovata in letteratura che comunque ottiene buoni risultati. Infatti la coppia di tubi P\_19 e P\_29 di  $Qsort$  corrisponde alla coppia P\_22 e P\_8 di  $PCC$  che l'algoritmo seleziona per tre fattori di domanda. Si è comunque scelto di utilizzare la nomenclatura  $PCC$  in quanto calcolando la diminuzione di perdita che si ha nei due casi si ottiene:  $-14.09\%$  per la coppia P\_18 e P\_22 di  $PCC$  e  $-13.55\%$  per P\_19 e P\_29 di  $Qsort$ .



## 4.5 Dettagli della simulazione

Le simulazioni sono state eseguite utilizzando l'ambiente MATLAB [42] in cui viene utilizzato il toolkit *EPANET-Matlab toolkit* [43] per accoppiare l'algoritmo PSO al simulatore idraulico Epanet [40].

La simulazione consiste nell'applicare l'algoritmo PSO all'ottimizzazione della rete: si vuole posizionare una o più valvole di tipo PRV per minimizzare le perdite. Inizialmente è stata installata una valvola e successivamente due.

Durante la simulazione vengono generate casualmente 10 particelle: ogni particella contiene il numero del tubo su cui installare la valvola e il setting da impostare alla valvola. Per ogni particella il toolkit aggiunge la PRV alla rete ed esegue la simulazione idraulica; sono così noti i valori di pressione in tutti i nodi. Viene quindi calcolato il valore della funzione obiettivo (eq. 4.6) per ogni particella. L'algoritmo confronta il valore della minor FF ottenuta con il valore di  $FF_{p_{best}}$  salvato nelle iterazioni precedenti e se risulta minore aggiorna il valore di  $FF_{p_{best}}$  e delle variabili decisionali corrispondenti, il tubo ( $p_{best,loc}$ ) e il setting ( $p_{best,set}$ ). Inoltre se il valore della minor FF ottenuta dall'iterazione è minore di  $FF_{g_{best}}$  viene sostituito anche il minimo globale ( $FF_{g_{best}}$ ,  $g_{best,loc}$  e  $g_{best,set}$ ). Vengono poi calcolate la nuova velocità (eq. 3.3) e la nuova posizione (eq. 3.1). Dato che la velocità non è necessariamente un numero intero, la nuova posizione dei tubi è ottenuta arrotondato il valore calcolato. Questo insieme di operazioni viene eseguito per un massimo di 20 iterazioni.

Il numero di iterazioni massime è stato scelto pari a 20 in quanto è un compromesso tra il tempo computazionale che aumenta linearmente con le iterazioni e la precisione dell'algoritmo.

Le valvole che vengono utilizzate sono delle PRV. Il setting che si vuole trovare rappresenta quindi la pressione massima (in metri) che la valvola deve mantenere nel nodo a valle. Se la pressione nel nodo di valle risulta maggiore del valore del setting la valvola si chiude, aprendosi poi quando la pressione è diminuita.

Le valvole vengono aggiunte alla fine del tubo così da tenere conto delle perdite di carico distribuite che si hanno lungo il tubo, in quanto in alcuni casi possono raggiungere valori di qualche metro. Viene quindi creato un nodo fittizio che diventa il nodo finale del tubo e il nodo iniziale della valvola.

Il posizionamento delle valvole viene effettuato separatamente per ogni fattore di domanda. Questo procedimento può portare a trovare tubi diversi per ogni valore di domanda ma permette di ottimizzare il setting più efficientemente. Infatti considerando una simulazione di 24 ore, l'algoritmo cerca un unico valore di tubo e di setting da applicare a tutte le ore. Si può immaginare che questo valore non sarà ottimale al variare del carico di domanda sulla rete. Si preferisce quindi dividere le simulazioni per poi andare a valutare separatamente ogni risultato. Per ogni fattore di domanda sono state eseguite 10 simulazioni così da poter confrontare più risultati.

Dal punto di vista computazione, la ricerca del tubo su cui installare la valvola e il setting di primo tentativo richiede un certo tempo. Il funzionamento del *EPANET-Matlab toolkit* necessita il salvataggio di due file, in cui è salvata la rete, ogni volta che si vuole aggiungere una valvola. Considerando 20 iterazioni e 10 particella, i file che devono essere salvati sono 400 e la simulazione può arrivare a durare anche mezz'ora. Ogni simulazione viene ripetuta 10 volte per tutti i fattori di domanda considerati.

La sola ricerca del setting non richiede il salvataggio dei file quindi il tempo computazione risulta molto minore. Ciò implica che se sono già presenti valvole in rete conviene inizialmente cercare

di ottimizzare il loro setting e solo successivamente aggiungere altre valvole. Questo procedimento è conveniente anche da un punto di vista economico perchè non richiede l'installazione di ulteriori valvole.

Il codice Matlab è riportato in appendice A.

#### 4.5.1    **Analisi di sensibilità dei parametri dell'algorithm PSO**

I parametri  $c_1$ ,  $c_2$  e  $w$  indirizzano la ricerca della soluzione da parte delle particelle ed è quindi fondamentale calibrarli correttamente così da facilitare la convergenza delle simulazioni. Per questa ragione è stata eseguita un'analisi di sensibilità sui parametri per valutare quale combinazione facilitasse la convergenza della simulazione.

Il valore del parametro  $w$  varia durante le iterazioni: inizialmente quando conviene che la ricerca spazi in un campo maggiore si adotta un valore di inerzia maggiore ( $w = 1$ ) che viene abbassato a 0.8 raggiunto un terzo delle simulazioni e poi a 0.6 alla fine della simulazione, quando conviene concentrare la ricerca in uno spazio ristretto.

Per stabilire i valori di  $c_1$  e  $c_2$  sono state eseguite delle simulazioni con combinazioni diverse dei due parametri. In tabella 4.5 sono riportate le simulazioni eseguite; nelle figure 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 sono riportati gli andamenti dei valori dei tubi per le diverse particelle durante le simulazioni.

Le simulazioni sono state eseguite per fattore di domanda pari a 0.41 (domanda minima, condizione più critica). Considerando le condizioni al contorno impostate e riferendosi ai risultati di letteratura, l'algorithm dovrebbe convergere sul tubo P\_22. Osservando i risultati è stato deciso di usare come parametri:  $c_1 = 0.1$ ,  $c_2 = 0.2$ . Infatti negli altri casi alla fine delle 20 iterazioni le particelle sono divise su quattro tubi diversi mentre con  $c_1 = 0.1$  e  $c_2 = 0.2$  le particelle sono divise tra due soli tubi (maggior convergenza) e inoltre la maggior parte converge su P\_22.

Simulazione	$c_1$	$c_2$	$w$
1	0.1	0.1	0.8
2	0.1	0.2	0.8
3	0.2	0.1	0.8
4	0.2	0.2	0.8

Tabella 4.5: Analisi di sensibilità rispetto ai coefficienti  $c_1$  e  $c_2$

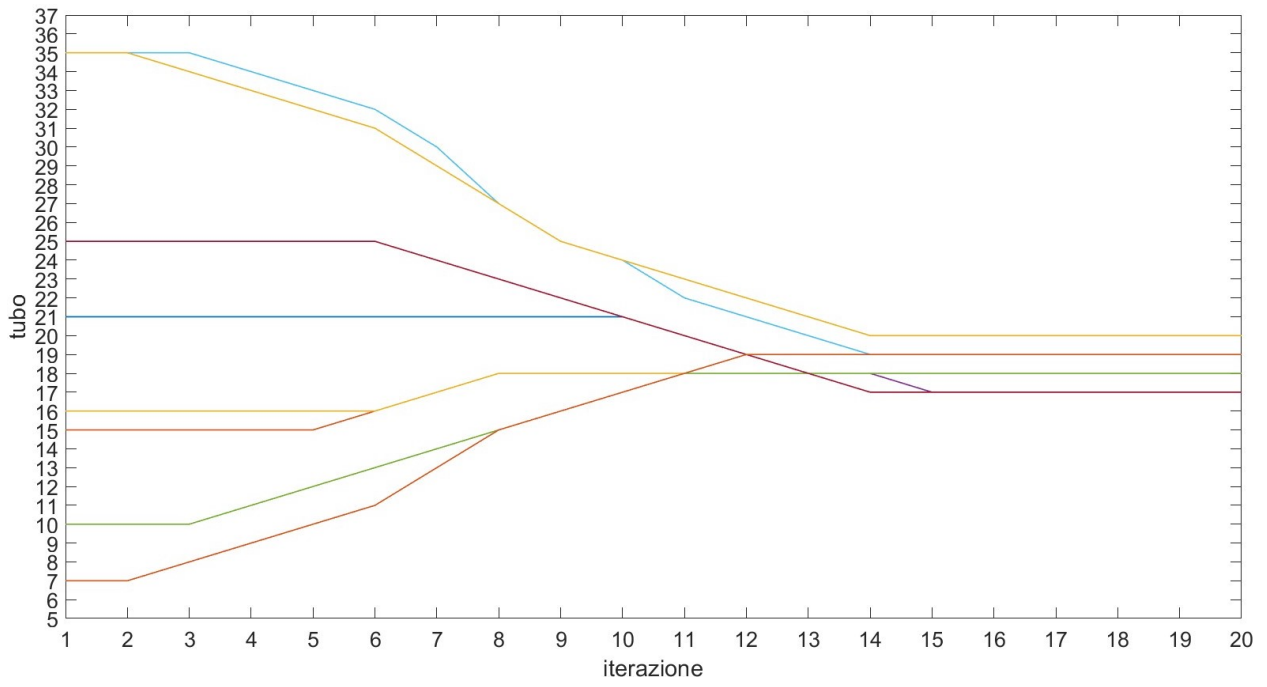


Figura 4.11: Risultato della simulazione con  $c_1 = 0.1$  e  $c_2 = 0.1$

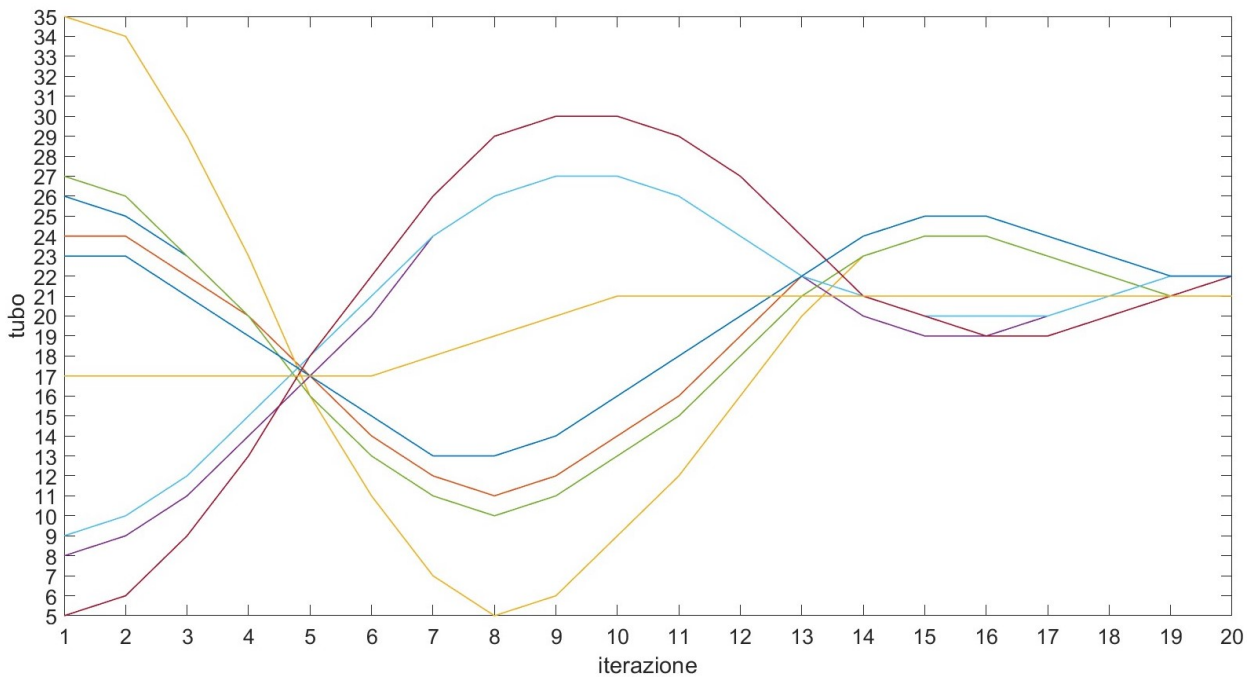


Figura 4.12: Risultato della simulazione con  $c_1 = 0.1$  e  $c_2 = 0.2$

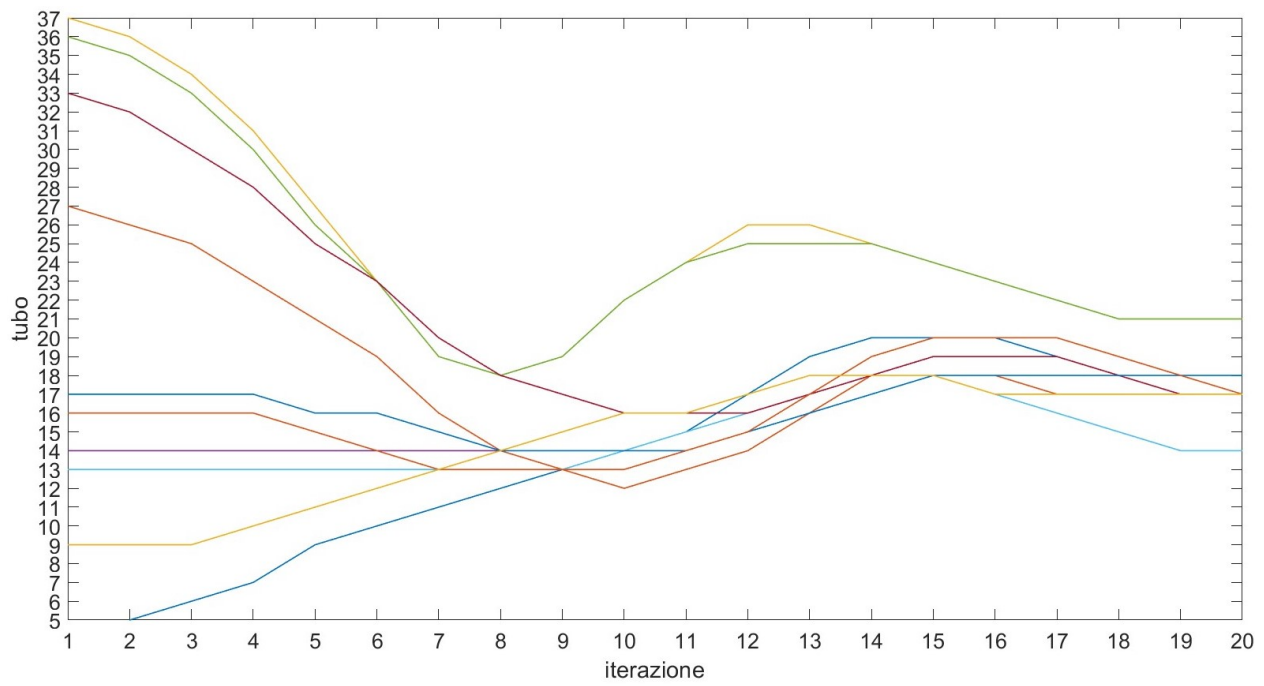


Figura 4.13: Risultato della simulazione con  $c_1 = 0.2$  e  $c_2 = 0.1$

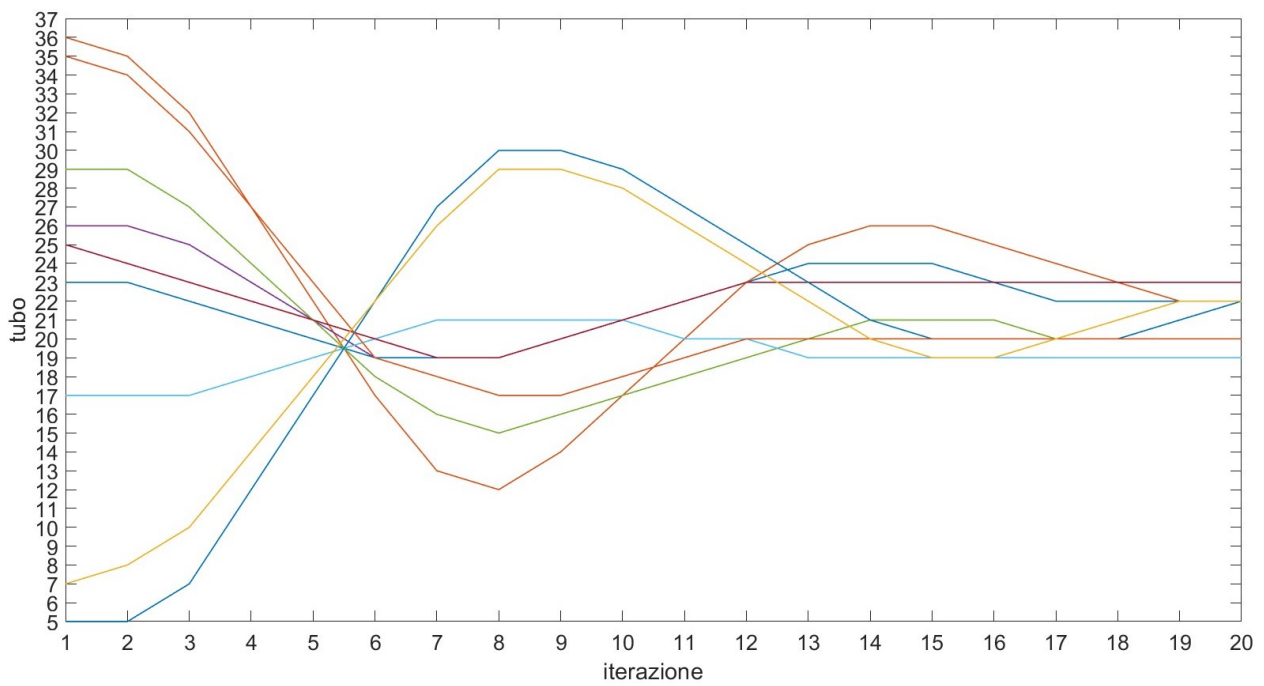


Figura 4.14: Risultato della simulazione con  $c_1 = 0.2$  e  $c_2 = 0.2$

## 4.6 Risultati per una valvola

Come esposto nella sezione 4.5, per ogni fattore di domanda vengono eseguite 10 simulazioni in cui il numero massimo di iterazioni è 20 e dove ogni simulazione genera 10 particelle (e quindi soluzioni). Per ogni simulazione l'algoritmo sceglie la particella che genera la soluzione più ottimale (funzione obiettivo minore); tra le 10 particelle selezionate viene poi selezionata la migliore. In questa sezione sono riportati i risultati complessivi per ogni fattore di domanda, ossia i valori delle variabili decisionali (tubo e setting) della particella selezionata e i valori di perdita ottenuti utilizzando la configurazione ottimale. In appendice B sono riportati i risultati completi.

Dato che la ricerca della soluzione ottimale viene eseguita separatamente per ogni fattore di domanda, può succedere che il tubo scelto dall'algoritmo per installare la valvola cambi da un caso con l'altro. In caso ciò avvenga si procede all'ottimizzazione per ogni fattore di domanda del solo setting installando la valvola sui diversi tubi trovati. Viene alla fine scelto il tubo che dà la soluzione migliore su tutte le 24 ore calcolando i parametri come media pesata sulla curva di domanda.

Anche quando il tubo trovato non cambia durante la giornata il setting può essere ottimizzato. Questo permette anche di verificare che la prima soluzione ottenuta non sia un minimo locale ma che l'algoritmo abbia effettivamente trovato la soluzione ottimale.

FD [-]	tubo	setting [m]	FF [ $m^3$ ]	$\Delta q_{leak,01}$
0.61	22	31.0010	83.57	-16.36%
0.41	22	30.4231	83.20	-18.44%
0.81	22	31.7802	83.94	-13.79%
1.23	14	32.5173	85.20	-6.03%
1.13	22	33.5712	84.79	-8.25%
0.92	22	32.3221	84.20	-12.09%
1.03	22	32.9567	84.53	-10.15%
0.82	22	31.8251	83.96	-13.65%

Tabella 4.6: Risultati per una valvola ottenuti con *minimizzazione*

In tabella 4.6 sono riportati i risultati ottenuti per ogni fattore di domanda scegliendo tra le dieci configurazioni tubo-setting trovate dall'algoritmo quella che comporta la maggior diminuzione di volume di perdita (funzione obiettivo minore).

Come si può osservare in tabella 4.6, per domanda massima (FD=1.23) il tubo selezionato dall'algoritmo è diverso che negli altri casi. È stato quindi ottimizzato il setting per ogni fattore di domanda installando la valvola sui tubi P\_14 e P\_22.

Configurazione	FF [-]	$\Delta q_{leak,01}$
P_14	92.82	-4.22%
P_22	84.01	-13.32%

Tabella 4.7: Risultati ottenuti ottimizzando il setting per le configurazioni trovate con *minimizzazione* per una valvola

In tabella 4.7 sono riportati i risultati in termini di funzione obiettivo e variazione di perdita per i due casi. La configurazione che fornisce il minor valore di funzione obiettivo è quella per cui la valvola viene installata sul tubo P\_22.

In tabella 5.3 sono riportati i risultati per P\_22 completi per tutti i fattori di domanda.

FD [-]	setting [m]	$q_{leak,1} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak,01}$
0.61	30.97	23.19	-16.43%
0.41	30.41	23.11	-18.46%
0.81	31.77	23.31	-13.82%
1.23	34.24	23.63	-6.16%
1.13	33.56	23.55	-8.27%
0.92	32.31	23.38	-12.11%
1.03	32.93	23.47	-10.20%
0.82	31.82	23.32	-13.67%

Tabella 4.8: Risultati ottenuti ottimizzando il setting della valvola installata sul tubo P\_22

Escludendo il caso di domanda massima, si può osservare che la differenza percentuale in termini di variazione di perdita tra il primo risultato ottenuto (tab. 4.6) e quello ottenuto ottimizzando il setting della valvole installata sul tubo P\_22 (tab. 4.8) è mediamente di 0.03%. Si può quindi affermare che già inizialmente l'algoritmo aveva trovato la soluzione ottimale per sette fattori di domanda su otto.

Per FD=1.23 la perdita diminuisce maggiormente quando la valvola è installata sul tubo P\_22 rispetto alla soluzione trovata inizialmente; in questo caso al primo passaggio l'algoritmo aveva restituito un minimo locale non riuscendo a convergere nella soluzione ottimale. Osservando i risultati riportati in appendice B si vede che per tutte le 10 simulazioni l'algoritmo non trova il tubo P\_22 ma restituisce sempre soluzioni che comportano valori di perdita maggiori di quello trovato ottimizzando il setting. I tubi che l'algoritmo restituisce sono il P\_14 e il P\_33 che si trovano vicino a P\_22; quindi installando la valvola su di essi l'effetto sulla rete può risultare simile a quando la valvola è installata su P\_22.

### 4.6.1 Analisi dei risultati

In questa sottosezione sono riportati e discussi i risultati ottenuti in termini di setting oltre ai valori di pressione, perdita e portata che si hanno in rete quando si va ad installare la valvola secondo la configurazione trovata.

#### Setting

L'andamento del setting impostato alla valvola, riportato in figura 4.15, segue l'andamento della domanda idrica (fig. 4.3). Ciò è dovuto al fatto che quando la domanda aumenta aumentano le velocità in rete (aumentano le portate a parità di diametro dei tubi) e con queste le perdite di carico distribuite; per mantenere tutti i nodi sopra i 30 metri la valvola non può dissipare troppa energia altrimenti la pressione minima sarebbe garantita nei nodi vicino alle sorgenti ma potrebbe non essere rispettata nei nodi più lontani. Viceversa per domanda bassa le perdite distribuite diminuiscono ed è possibile impostare valori minori di setting così da riuscire a gestire in modo più ottimale le pressioni e quindi le perdite.

In figura 4.16 è rappresentato l'andamento delle perdite distribuite in  $\frac{m}{km}$  per tutti i tubi per diversi carichi di domanda. In quasi tutti i tubi le perdite distribuite sono maggiori per domanda massima che per domanda media o minima. I tubi per cui il comportamento è invertito sono tra quelli con coefficiente di correlazione basso e hanno poca influenza sulla rete quindi questi dati

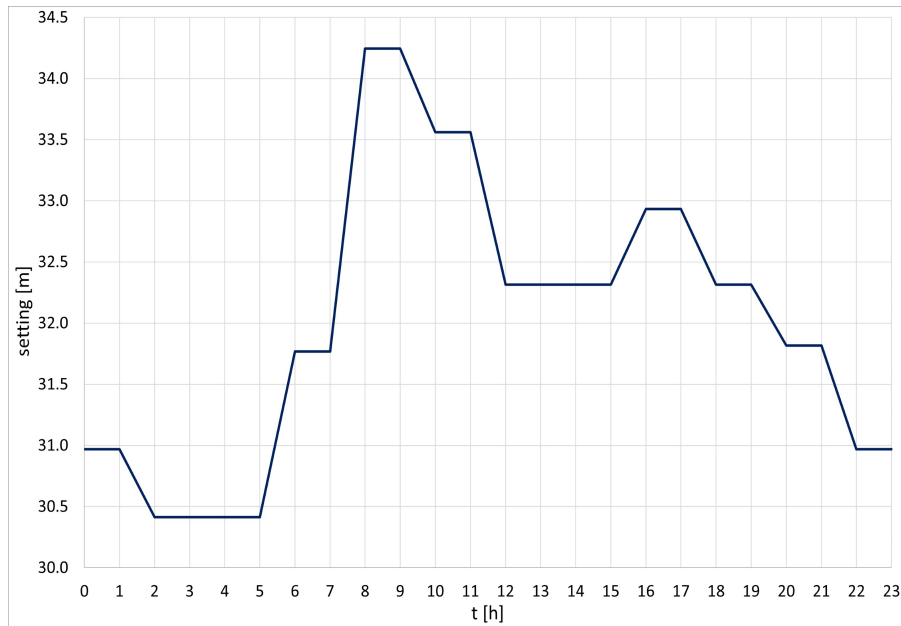


Figura 4.15: Setting impostato alla valvola installata sul tubo P\_22

non contraddicono il ragionamento precedentemente esposto. Per questo a domanda maggiore corrisponde un valore maggiore di pressione al nodo di valle della valvola.

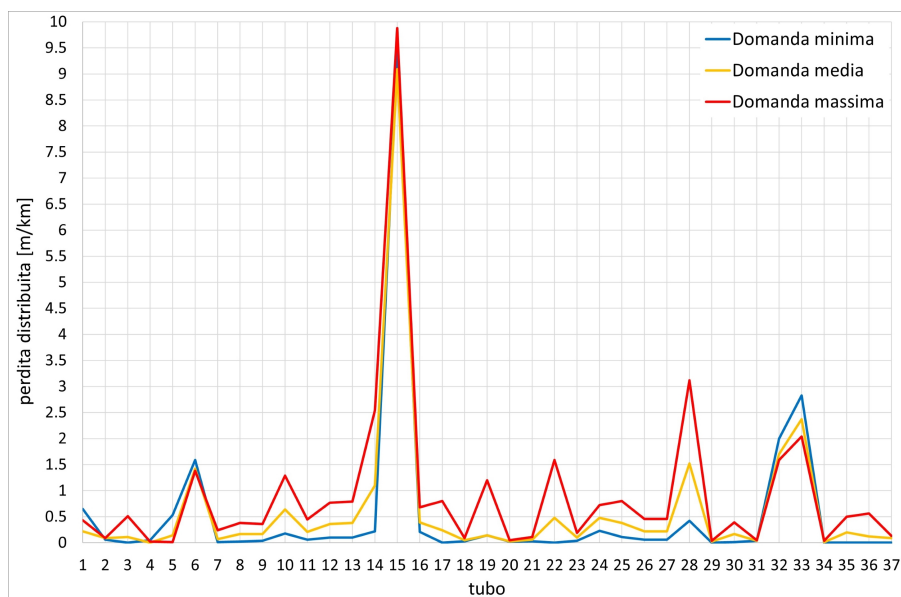


Figura 4.16: Andamento delle perdite distribuite nei tubi per diversi valori di domanda

## Pressioni

In figura 4.17 sono rappresentate le pressioni in rete a domanda minima e a domanda massima con una valvola installata sul tubo P\_22.

Le pressioni risultano regolate nei nodi serviti tramite il tubo P\_22 con valori maggiori nei nodi a quote inferiori (parte bassa della rete). La pressione nei nodi in alto a sinistra non subisce

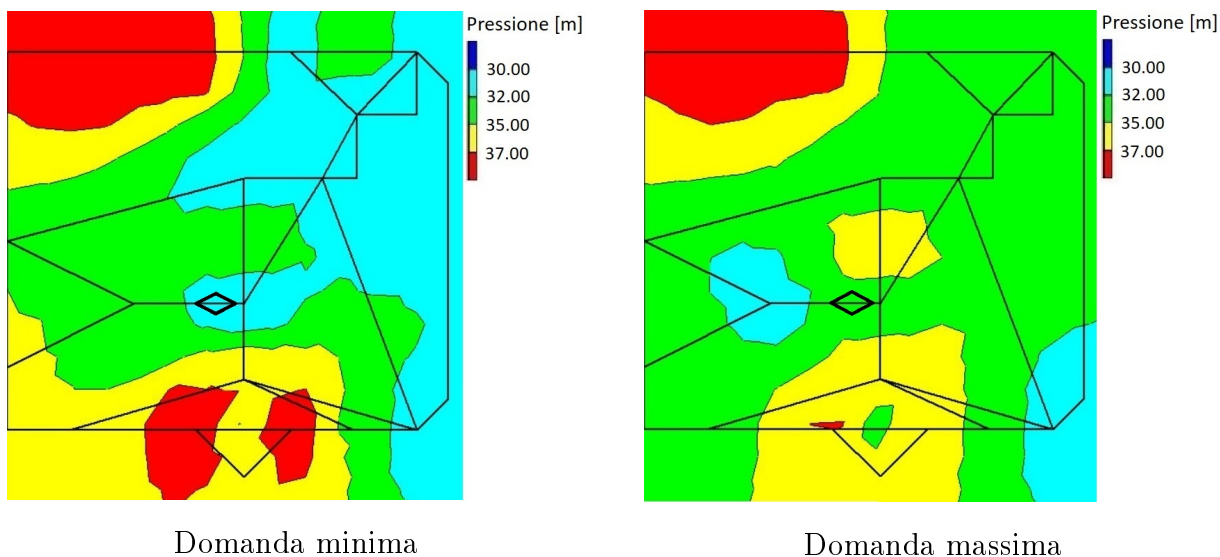


Figura 4.17: Pressioni in rete con una valvola installata sul tubo P\_22

variazioni rispetto alla condizione senza valvole in quanto i nodi sono serviti direttamente da R\_23.

## Perdita

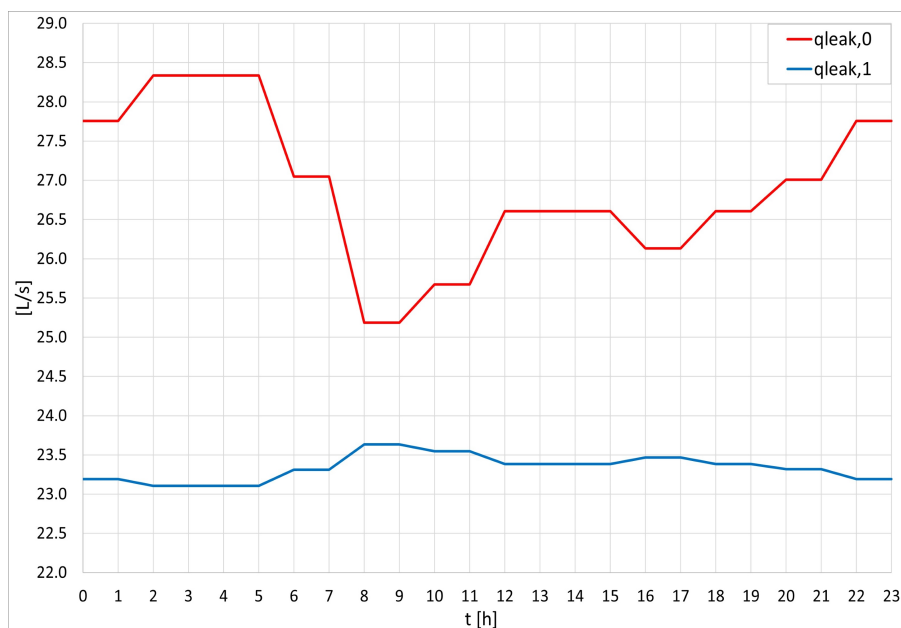


Figura 4.18: Andamento delle perdite durante la giornata prima (in rosso) e dopo (in blu) l'installazione della valvola sul tubo P\_22

Installando la valvola sul tubo P\_22, la perdita media giornaliera passa da un valore di  $26.92 \frac{L}{s}$  a un valore di  $23.34 \frac{L}{s}$  con una diminuzione del 13.32%. In termine di volume si passa da un valore di  $2326 m^3$  a un valore di  $2016 m^3$ , con un risparmio pari a  $310 m^3$  giornalieri.

In figura 4.18 è rappresentato l'andamento delle perdite nel tempo. Quando in rete non sono presenti valvole (qleak,0) le perdite hanno andamento opposto a quello della domanda



(fig. 4.3): al diminuire della domanda le pressioni in rete aumentano e di conseguenza anche le perdite, viceversa per domanda che aumenta. Quando viene installata la valvola (qlack,1) le perdite seguono direttamente il setting (e quindi la domanda idrica): per domanda maggiore il setting deve garantire il soddisfacimento del servizio anche nei nodi più lontani dalle sorgenti anche a discapito delle perdite idriche che risultano maggiori; per domanda minore il setting può essere abbassato così da gestire maggiormente le perdite.

L'andamento delle perdite durante la giornata risulta quasi costante quando in rete è installata la valvola rispetto a quando non sono presenti valvole.

## Portate

Installando la valvola, la portata attraverso il tubo P\_22 diminuisce (fig. 4.19). Dato che la domanda globale della rete non cambia, le portate vengono redistribuite tra gli altri tubi (fig. 4.20). Confrontando le figure 4.5 e 4.20 si può vedere che, soprattutto per domanda minima quando la valvola risulta più chiusa, la portata cambia percorso passando principalmente per i tubi P\_33 e P\_6 invece che per i tubi P\_35, P\_22 e P\_17. Inoltre in uno dei tubi in alto a destra cambia la direzione della portata; questo comporta che il serbatoio R\_23 per domanda minima serve ulteriori nodi oltre N\_1, N\_2 e N\_3.

Nel caso di domanda massima, la valvola risulta più aperta, essendo il setting maggiore, e la variazione di portata passante nel tubo è minore. L'effetto della valvola sul percorso delle portate risulta quindi minore.

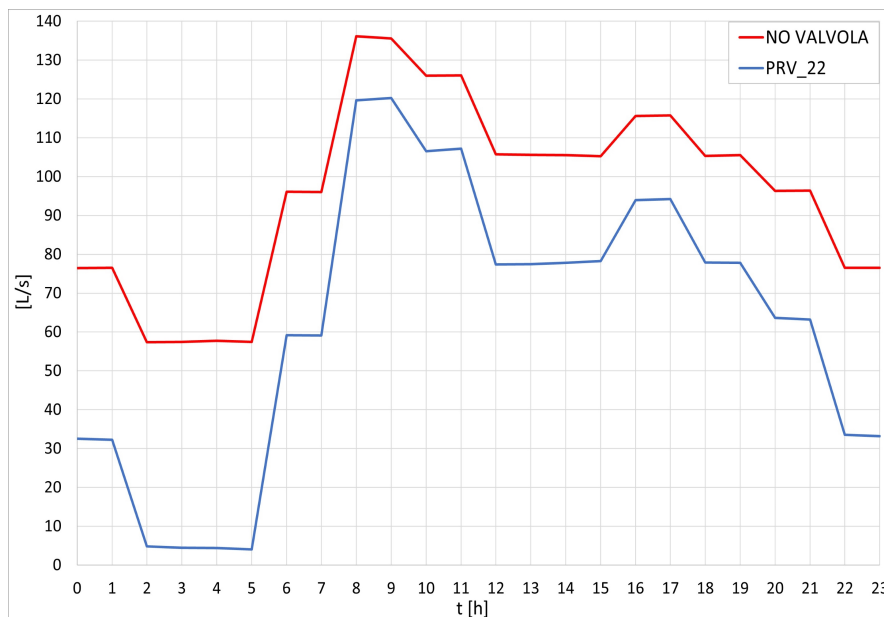


Figura 4.19: Portata attraverso il tubo P\_22 con e senza la valvola installata

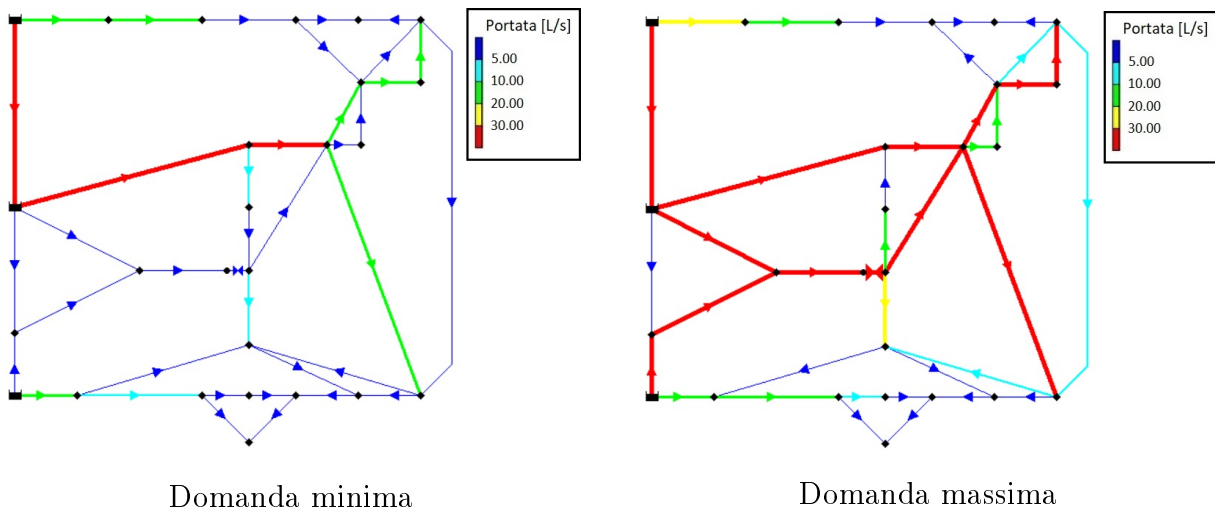


Figura 4.20: Portate in rete con una valvola installata sul tubo P\_22

## 4.7 Risultati per due valvole

FD [-]	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
0.61	P_8	34.6262	P_22	30.8266	82.9023
0.41	P_18	33.8589	P_22	30.5453	82.4317
0.81	P_18	30.7379	P_22	32.2183	82.6211
1.23	P_20	33.5247	P_22	34.4409	84.5926
1.13	P_8	33.8176	P_22	33.6142	83.9152
0.92	P_20	32.7532	P_22	32.4356	83.3477
1.03	P_20	31.2342	P_17	32.2818	84.0190
0.82	P_8	30.3687	P_22	31.6374	83.0331

Tabella 4.9: Risultati per due valvole ottenuti con *minimizzazione*

In tabella 4.9 sono riportati i risultati complessivi per l'installazione di due valvole per i diversi fattori di domanda.

Per minimizzare le perdite l'algoritmo seleziona quattro possibili configurazioni. È stata quindi eseguita la ricerca del setting ottimale per i quattro casi.

Configurazione	FF [-]	$\Delta q_{leak,02}$
P_8 P_22	82.59	-14.78%
P_18 P_22	81.54	-15.79%
P_20 P_22	82.21	-15.17%
P_17 P_20	86.47	-10.78%

Tabella 4.10: Risultati ottenuti ottimizzando il setting per le configurazioni ottenute con *minimizzazione* per due valvole

In tabella 4.10 sono riportati i risultati in termini di funzione obiettivo e variazione di perdita per i quattro casi. La configurazione che fornisce il minor valore di funzione obiettivo è quella per cui le valvole vengono installate sui tubi P\_18 e P\_22.

In tabella 4.11 sono riportati i risultati completi per tutti i fattori di domanda ottenuti con questa configurazione.

FD [-]	setting P_18 [m]	setting P_22 [m]	$q_{leak,2} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak,02}$
0.61	30.15	31.01	22.54	-18.78%
0.41	30.10	30.42	22.44	-20.81%
0.81	30.07	31.80	22.64	-16.31%
1.23	30.08	34.32	22.97	-8.81%
1.13	30.09	33.61	22.87	-10.90%
0.92	30.11	32.36	22.72	-14.62%
1.03	30.10	32.99	22.80	-12.76%
0.82	30.11	31.85	22.65	-16.14%

Tabella 4.11: Risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P\_18 e P\_22

### 4.7.1 Analisi dei risultati

#### Setting

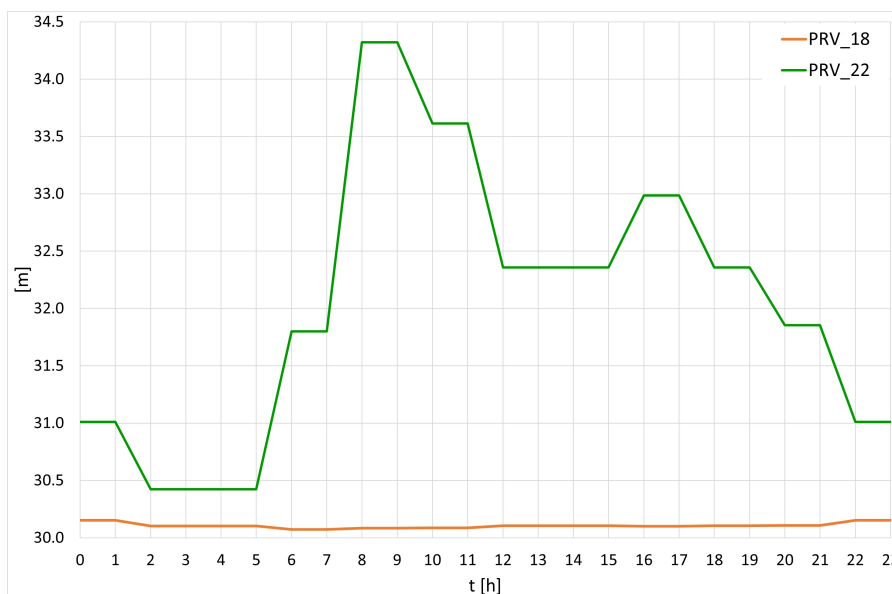


Figura 4.21: Setting delle valvole installate sui tubi P\_22 e P\_18

In figura 4.21 sono riportati i setting per le due valvole. Il setting della valvola installata sul tubo P\_22 segue l'andamento della domanda idrica e si discosta di poco dal risultato ottenuto per una valvola (figura 4.15). Il valore del setting della valvola installata sul tubo P\_18 è quasi costante intorno a un valore pari a 30.1 metri.

#### Pressioni

In figura 4.22 sono rappresentate le pressioni in rete a domanda minima e a domanda massima con due valvole installate.

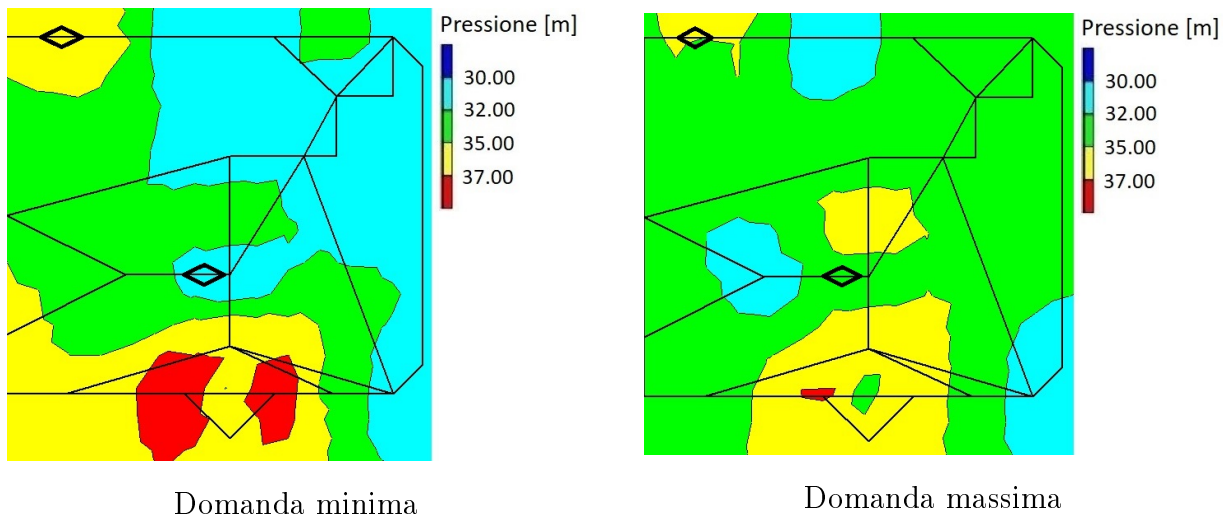


Figura 4.22: Pressioni in rete con due valvole installate sui tubi P\_18 e P\_22

Rispetto alla distribuzione delle pressioni che si aveva con un'unica valvola installata sul tubo P\_22 (figura 4.17) la situazione resta invariata, eccetto che nella parte in alto a sinistra della rete dove viene installata la seconda valvola. Il fatto che il setting della valvola installata sul tubo P\_22 sia lo stesso per i due casi e che la portata che fluisce tramite la valvola installata sul tubo P\_18 serva solo i nodi N\_1, N\_2 ed N\_3 giustifica il fatto che le pressioni nel resto della rete rimangano invariate.

## Perdita

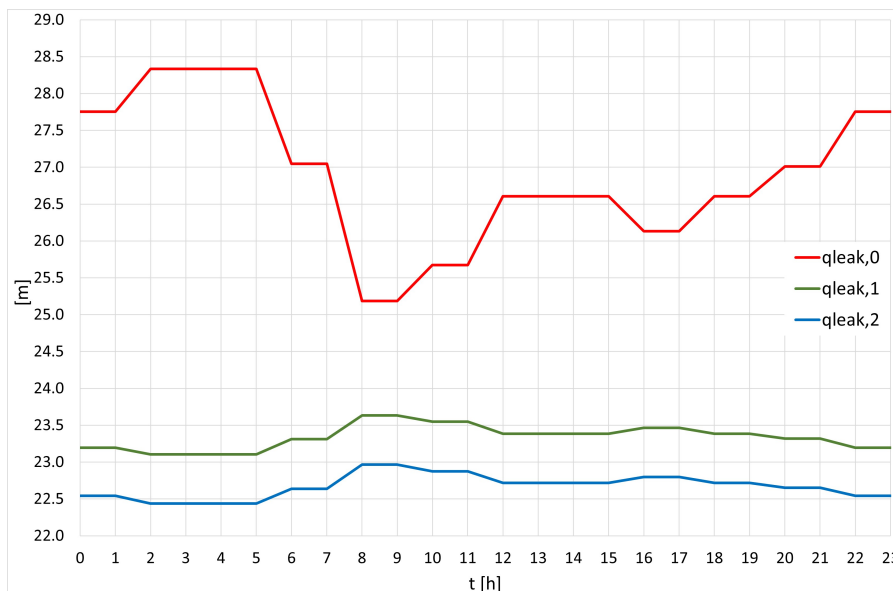


Figura 4.23: Andamento delle perdite senza valvole, con una valvola installata sul tubo P\_22 e con due valvole installate sui tubi P\_22 e P\_18

In figura 4.23 sono rappresentati gli andamenti delle perdite nel tempo quando in rete non sono presenti valvole (qleak,0), quando una valvola è installata sul tubo P\_22 (qleak,1) e quando una valvola è installata sui tubi P\_22 e P\_18 (qleak,2).

L'installazione di una valvola comporta una decisiva diminuzione delle perdite rispetto al caso senza valvola (-13.32%) mentre l'installazione della seconda valvola comporta un miglioramento minore rispetto al caso con una valvola (-2.85%).

L'installazione della seconda valvola sul tubo P\_18 influenza le pressioni, e quindi le perdite, di pochi nodi della rete. La diminuzione di perdita che si ha installando la seconda valvola è quindi dovuta alla diminuzione delle perdite nei nodi forniti da R\_23 e regolati dalla valvola installata sul tubo P\_18.

La perdita media giornaliera passa da un valore senza valvole di  $26.92 \frac{L}{s}$  a un valore di  $22.67 \frac{L}{s}$  con una diminuzione del 15.79%. In termine di volume si passa da  $2326 m^3$  senza valvole a  $1959 m^3$ , con un risparmio pari a  $367 m^3$  giornalieri.

In tabella4.12 sono riportate le perdite medie della rete nella configurazione senza valvole ( $q_{leak,0}$ ), con una valvola ( $q_{leak,1}$ ) e con due valvole ( $q_{leak,2}$ ).  $\Delta q_{leak 02}$  rappresenta la variazione percentuale di perdita tra la configurazione senza valvole e quella con due valvole;  $\Delta q_{leak 12}$  da una a due valvole.

FD [-]	$q_{leak,0} [\frac{L}{s}]$	$q_{leak,1} [\frac{L}{s}]$	$q_{leak,2} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak 02}$	$\Delta q_{leak 12}$
0.61	27.7550	23.1939	22.5423	-18.78%	-2.81%
0.41	28.3349	23.1052	22.4379	-20.81%	-2.89%
0.81	27.0477	23.3101	22.6367	-16.31%	-2.89%
1.23	25.1845	23.6326	22.9668	-8.81%	-2.82%
1.13	25.6721	23.5482	22.8742	-10.90%	-2.86%
0.92	26.6076	23.3850	22.7172	-14.62%	-2.86%
1.03	26.1328	23.4666	22.7990	-12.76%	-2.84%
0.82	27.0092	23.3183	22.6510	-16.14%	-2.86%

Tabella 4.12: Variazione della perdita media senza, con una valvola installata sul tubo P\_22 e con due valvole installate sui tubi P\_22 e P\_18

### Portate

Confrontando le figure 4.20 e 4.24 si osserva che aggiungendo la valvola sul tubo P\_18 la portata attraverso P\_22 aumenta per domanda minima rispetto alla condizione con una valvola installata. Infatti installando la valvola sul tubo P\_18 il serbatoio R\_23 torna a servire i soli nodi N\_1, N\_2 e N\_3 e la domanda degli altri nodi viene quindi soddisfatta dalla sorgente R\_24 tramite il tubo P\_22.

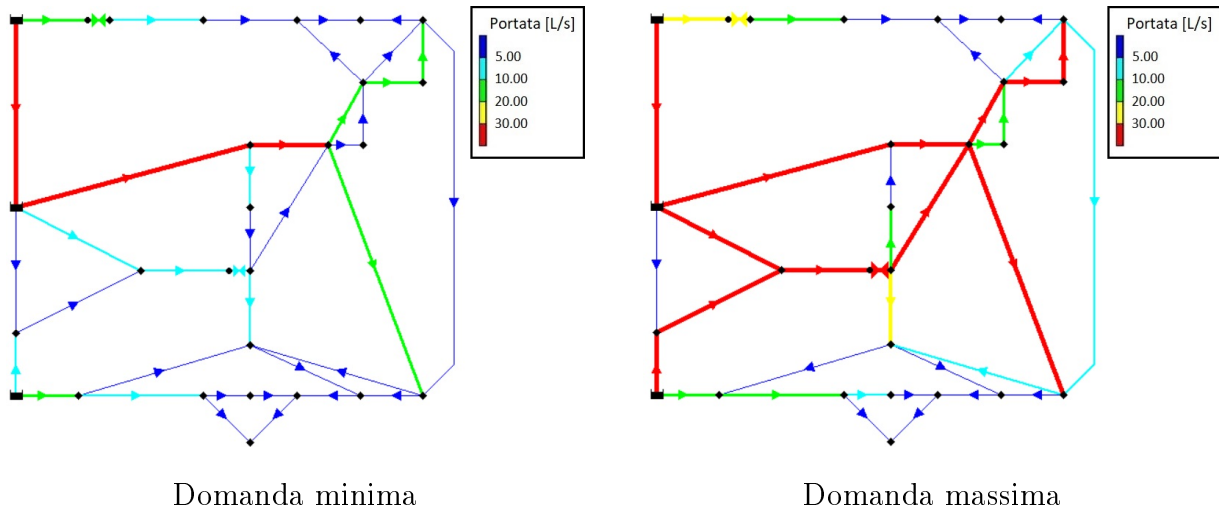


Figura 4.24: Portate in rete con due valvole installate sui tubi P\_18 e P\_22

## 4.8 Risultati di letteratura

Per verificare l'efficacia del metodo utilizzato, i risultati riportati nelle sezioni 4.6 e 4.7 verranno comparati con risultati noti dalla letteratura. In particolare si considerano i risultati di Araujo et al. [4] e Nicolini e Zovatto [6].

La nomenclatura utilizzata in questa sezione è *PCC*. Non viene utilizzata quella dei singoli autori in modo da poter confrontare più facilmente i risultati.

### 4.8.1 Araujo et al.

Il procedimento utilizzato da Araujo et al. [4] è strutturato in due fasi: ottimizzazione del numero e della localizzazione delle valvole; definizione del setting delle valvole.

Il primo passo consiste nell'ottimizzazione del numero e della possibile ubicazione delle valvole di controllo nella rete di distribuzione. L'installazione delle valvole è simulata impostando una scabrezza aggiuntiva (maggiore del 90% della scabrezza reale del tubo) per i tubi prescelti. Questo primo livello si basa sull'ottimizzazione della seguente funzione obiettivo:

$$f1(p_{i,t}, nv) \Big|_{t=1}^T = \frac{nv_t}{\left\{ \sum_{i=1}^N \left[ \frac{p_{i,t} - p_{min}}{p_{min}} \right]^2 \cdot nv_t + nv_t \right\} \Big|_{t=1}^T} \quad (4.10)$$

con:

$T$  il numero di intervalli temporali simulati;

$nv_t$  il numero di valvole al tempo  $t$ ;

$N$  il numero totale di nodi.

La seconda fase di ottimizzazione ha lo scopo di stabilire la regolazione delle valvole: nel caso di Throttle Control Valve (TCV) si cerca il coefficiente di perdita,  $K_v$ ; per le PRV, la pressione che la valvola deve mantenere a valle. Questo livello si basa sull'ottimizzazione della seguente funzione obiettivo:

$$f2(p_{i,t}) \Big|_{t=1}^T = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{p_{i,t} - p_{min}}{p_{min}} \right]^2 \Big|_{t=1}^T} \quad (4.11)$$

L'ottimizzazione è eseguita utilizzando un algoritmo genetico generazionale in cui la popolazione viene sostituita una generazione dopo l'altra secondo il processo di selezione e l'applicazione degli operatori mutazione e crossover. In tabella 4.13 sono riportati i risultati. In figura 4.25 sono rappresentate le aperture delle valvole.

	Tubo	$\Delta q_{leak}[\%]$
1 valvola	P_22	-13.92
2 valvole	P_22, P_18	-16.48
3 valvole	P_22, P_14, P_9	-14.65
4 valvole	P_22, P_18, P_8, P_15	-18.68
5 valvole	P_22, P_18, P_14, P_15, P_9	-17.22
6 valvole	P_22, P_18, P_14, P_8, P_15, P_33	-19.05

Tabella 4.13: Risultati ottenuti da Araujo et al. [4]

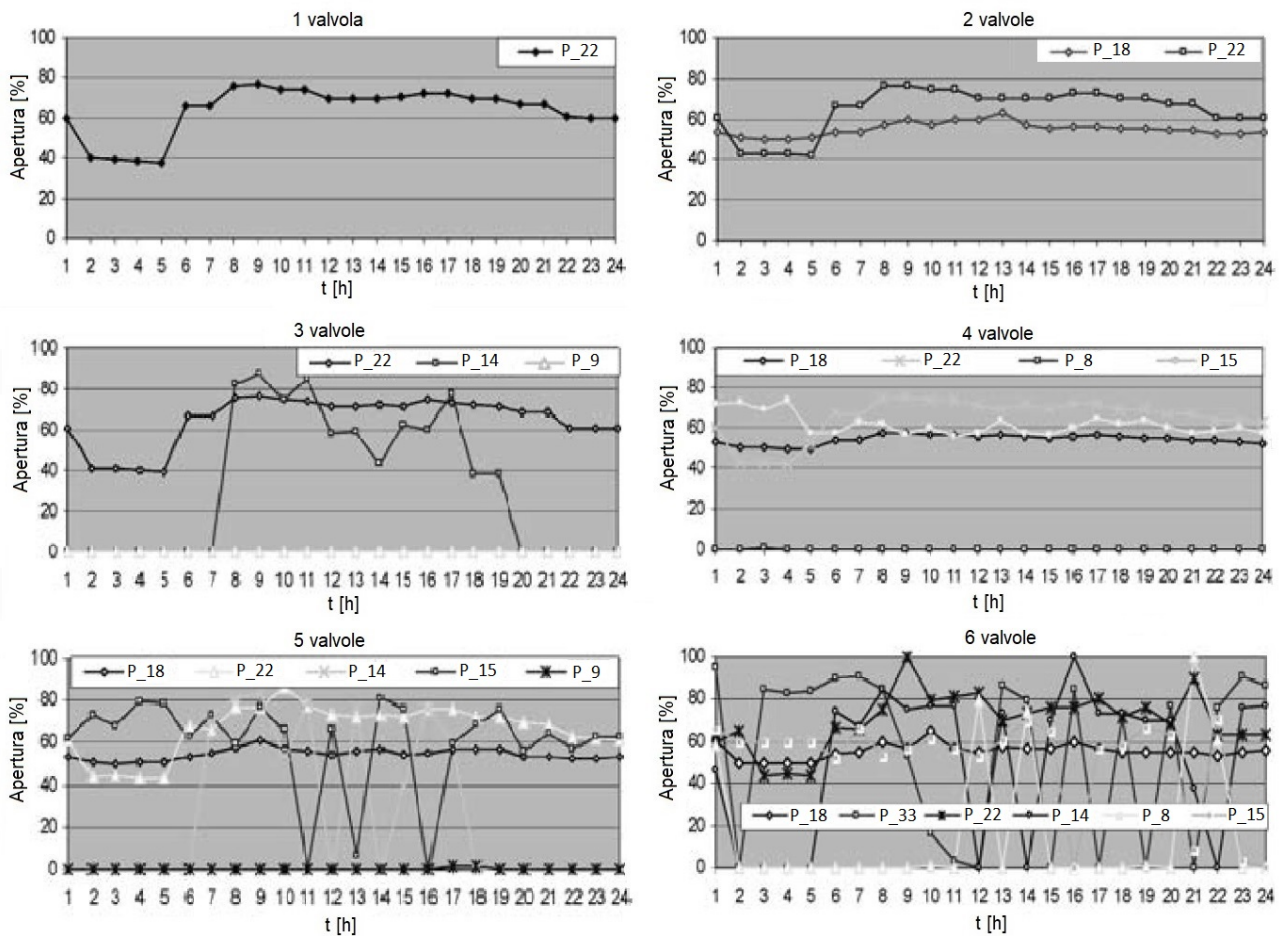


Figura 4.25: Risultato per l'apertura delle valvole ottenuto in Araujo et al. [4]

### 4.8.2 Nicolini e Zovatto

Nicolini e Zovatto [6] affrontano il problema di ottimizzazione volendo minimizzare contemporaneamente due funzioni obiettivo: il numero di valvole ( $f1$ ) e il volume di perdita ( $f2$ ).

$$f1 = n_v \quad f2 = \frac{1}{N_L} \sum_{t=1}^{N_L} \sum_{i=1}^{N_n} w_t \cdot q_{leak,it} = \frac{1}{N_L} \sum_{t=1}^{N_L} \sum_{i=1}^{N_n} w_t \cdot c \cdot 0.5 \cdot \sum_{j=1}^{N_{p,i}} L_{ij} \cdot p_{i,t}^\gamma \quad (4.12)$$

- $n_v$  è il numero di valvole da installare;
- $N_L$  è il numero di condizioni di domanda considerate;
- $w_t$  è il peso relativo alla condizione di domanda  $t$ .

La perdita è calcolata come descritto nella sottosezione 4.2.1.

Le variabili decisionali che l'algoritmo deve trovare sono i tubi su cui installare le valvole e il loro setting.

Nicolini e Zovatto accoppiano il simulatore idraulico Epanet [40] al modello di ottimizzazione. L'algoritmo genetico utilizzato in questo lavoro è il NSGA-II [18], un algoritmo multiobiettivo che restituisce come risultato non un'unica soluzione ma un insieme di soluzioni che ottimizzano il problema. Sono state eseguite dieci simulazioni in cui sono state installate da una a cinque PRV.

A differenza dell'approccio utilizzato in [4] e in questa tesi, l'ottimizzazione viene eseguita solo per tre fattori di domanda "rappresentativi" dell'intera curva: 0.6, 1 e 1.4.

In tabella 4.14 sono riportati i migliori risultati tra quelli ottenuti da Nicolini e Zovatto nelle dieci simulazione. La differenza di perdita è calcolata sul valore medio delle tre condizioni di domanda.

	Tubo	$\Delta q_{leak}[\%]$
1 valvola	P_22	-9.93
2 valvole	P_22, P_18	-12.20
	P_22, P_8	-12.19
3 valvole	P_22, P_18, P_8	-14.59
4 valvole	P_22, P_18, P_8, P_14	-15.94
5 valvole	P_22, P_18, P_8, P_14, P_22	-16.55

Tabella 4.14: Risultati ottenuti da Nicolini e Zovatto [6]

### 4.8.3 Confronto tra i risultati di letteratura

Confrontando i risultati ottenuti da Araujo et al. [4] e da Nicolini e Zovatto [6] riportati nelle tabelle 4.13 e 4.14 si può osservare che nel caso di una singola valvola il tubo trovato è il medesimo. Nel caso di due valvole, Nicolini e Zovatto trovano due configurazioni che danno valori di perdita molto simili e una di queste è la stessa trovata da Araujo et al.. Quando il numero di valvole da installare è maggiore o uguale a tre i risultati dei due articoli sono discordanti.

Le diverse configurazioni che sono ottenute nei due articoli per tre o più valvole possono essere dovute al diverso procedimento utilizzato: Araujo et al. trovano inizialmente i possibili tubi e solo successivamente il setting da impostare alla valvole; Nicolini e Zovatto cercano questi valori contemporaneamente. Inoltre le funzioni obiettivo utilizzate sono diverse per quanto in



entrambi i casi si miri a minimizzare le perdite: la funzione obiettivo usata da Araujo et al. massimizza l'inverso della differenza normalizzata tra la pressione ai nodi e la pressione minima che va garantita; la funzione obiettivo usata da Nicolini e Zovatto minimizza direttamente il volume di perdita. Per di più anche il vincolo sulla pressione minima è trattato differentemente nei due articoli: Araujo et al. lo incorporano direttamente nella funzione obiettivo; Nicolini e Zovatto considerano il vincolo attraverso un coefficiente di penalità.

I valori di riduzione di perdita che sono riportati nelle tabelle 4.13 e 4.14 differiscono nei due casi. Ciò può essere dovuto alla differenza del carico di domanda considerato: per Araujo et al. è noto il peso che ogni condizione di domanda assume sulla domanda globale giornaliera mentre nel caso di Nicolini e Zovatto i valori di  $w_k$  non sono noti. Facendo una semplice media aritmetica dei fattori di domanda ( $w_k = 1$ ) si ottiene 0.87 per Araujo et al. e 1 per Nicolini e Zovatto; a valori minori di domanda corrispondono valori maggiori di pressioni e quindi di perdita e l'effetto che l'installazione di una o più valvole ha sulla rete può essere maggiore. Il valore maggiore di diminuzione di perdita in Araujo può essere dovuto a questo fatto. Un altro punto da valutare in sede di confronto è la complessità del procedimento e il tempo di calcolo necessario. Dati purtroppo non a disposizione.

## 4.9 Conclusioni

Come riportato in sottosezione 4.8.3 per tre e più valvole i risultati di letteratura sono contrastanti, per questa ragione vengono confrontati solo i risultati ottenuti per una e due valvole. In tabella 4.15 sono riportati i risultati riportati nelle sezioni 4.6 e 4.7 e quelli ottenuti in letteratura (sez. 4.8).

I risultati migliori sono quelli ottenuti da Araujo et al.. Nel caso di Nicolini e Zovatto i risultati meno ottimali possono essere dovuti ai diversi valori di fattore di domanda considerati, come esposto nella sottosezione 4.8.3.

Confrontando i risultati con quelli di Araujo et al. si può affermare che utilizzando alcuni accorgimenti come la ricerca della nomenclatura e l'ottimizzazione del setting, il metodo basato sull'algoritmo PSO risulta affidabile per la rete benchmark.

1 valvola			
	Scaletti	Araujo et al.	Nicolini e Zovatto
Tubo	P_22	P_22	P_22
$\Delta q_{leak\ 01}$	-13.32%	-13.92%	-9.93%
2 valvole			
	Scaletti	Araujo et al.	Nicolini e Zovatto
Tubo	P_18 P_22	P_18 P_22	P_18 P_22
$\Delta q_{leak\ 02}$	-15.79%	-16.48%	-12.20%

Tabella 4.15: Confronto dei risultati ottenuti con i risultati di letteratura

# Capitolo 5

## Applicazione del metodo alla rete benchmark

Nel capitolo precedente il metodo basato sull'algoritmo PSO è stato validato andando a posizionare una o più valvole in rete così da poter regolare le pressioni di esercizio e diminuire le perdite idriche per poi confrontare i risultati con soluzioni note. In questo capitolo si vuole utilizzare l'algoritmo PSO per andare a posizionare una o più GreenValve nella rete benchmark volendo massimizzare l'uniformità delle pressioni, e quindi l'equità del servizio agli utenti, avendo come vincolo la necessità di produrre sufficiente energia affinché la valvola si autosostenga. Vengono utilizzate quattro diverse funzioni obiettivo:

1. massimizzazione del coefficiente di uniformità ( $UC$ );
2. massimizzazione del coefficiente di uniformità, penalizzando i nodi con pressioni sopra un certo valore ( $UC + Pmax$ );
3. minimizzazione della deviazione standard delle pressioni ( $DS$ );
4. minimizzazione della deviazione standard delle pressioni, penalizzando i nodi con pressioni sopra un certo valore ( $DS + Pmax$ ).

### 5.1 Coefficiente di uniformità delle pressioni

Il coefficiente di uniformità delle pressioni è un adattamento dell'indice  $UC^*$  proposto da Gottipati e Nanduri in [44]. I due autori forniscono un parametro che misura l'equità del servizio idrico in una rete con funzionamento intermittente. Il parametro è basato sul "supply ratio", SR, calcolato come il rapporto tra il volume di acqua fornito e quello richiesto dall'utente. UC viene calcolato come:

$$UC^* = 1 - \frac{ADEV}{ASR} \quad (5.1)$$

dove:

- $ASR$  è la media di SR per tutti i nodi della rete durante l'intero periodo considerato;
- $ADEV$  è la media della deviazione normalizzata di SR rispetto a  $ASR$  durante l'intero periodo considerato.

Volendo misurare l'uniformità delle pressioni in rete è stato modificato  $UC^*$  andando a sostituire il *supply ratio* con la pressione ai nodi:

$$UC = 1 - \frac{ADEV}{AP} \quad (5.2)$$

dove:

- $AP$  è la media della pressione ai nodi con domanda durante l'intera simulazione;
- $ADEV$  è la media della deviazione normalizzata della pressione rispetto a  $AP$  durante l'intera simulazione.

La prima funzione obiettivo è quindi data dal coefficiente di uniformità delle pressioni a cui vengono sottratti due coefficienti di penalità:

$$\max FF_1 = \max \{UC - PF_1 - PF_2\} \quad (5.3)$$

Il coefficiente di penalità  $PF_1$  è legato alla pressione minima da garantire ai nodi (eq.4.8). In questo problema il parametro che si vuole massimizzare è  $UC$  che assume valori tra zero e uno. Dato che l'ordine di grandezza è molto minore di quello del volume di perdita che si considerava nel capitolo 4 il valore del parametro di penalità  $p_1$  è stato posto pari a  $10^3$ .

Il coefficiente di penalità  $PF_2$  è legato alla potenza disponibile per la valvola:

$$PF_2 = p_2 \cdot \sum_{k=1}^{N_v} \sum_{t=1}^T \max \{0, W_{min} - W_{k,t}\} \quad (5.4)$$

con  $p_2 = 10$  e  $W_{min} = 150 W$ .

La produzione di energia da parte della valvola è un vantaggio che però riveste un'importanza minore della gestione delle pressioni, per questa ragione il parametro di penalità  $p_2$  è di due ordine di grandezza minore di  $p_1$ . In questo modo si penalizzano delle configurazioni non adatte alla produzione di energia senza però escluderle completamente.

La potenza minima è stata scelta tenendo conto della potenza necessaria per la gestione della valvola (20 W), dell'efficienza di trasformazione dell'energia fornita dall'acqua in energia elettrica (10%) [30] e del fatto che la potenza di gestione deve essere garantita in media durante la giornata e non a tutte le ore. Dato che durante alcune ore della giornata si produrrà molta più energia di quella necessaria è accettabile produrne di meno durante altre presupponendo la possibilità di un volume di accumulo sufficiente.

Le considerazioni fatte per scegliere un valore di potenza minima non tengono conto di alcuni aspetti del funzionamento reale della valvola, come ad esempio la variazione dell'efficienza di produzione di energia con l'apertura della valvola, ma sono state utilizzate per avere un valore iniziale con cui lavorare. Quando poi si dovesse passare allo studio effettivo della fattibilità vanno considerati tutti i fattori che influenzano il funzionamento della valvola e la produzione di energia.

La potenza disponibile dalla corrente è calcolata come:

$$W_{k,t} = q_{k,t} \cdot \Delta P_{k,t} \quad [W] \quad (5.5)$$

dove  $q_{k,t} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  è la portata che passa per la valvola  $k$  al tempo  $t$  e  $\Delta P_{k,t} [Pa]$  è la perdita di carico causata dalla valvola  $k$  al tempo  $t$  [31].

### 5.1.1 Funzione obiettivo che tiene conto del livello delle pressioni

Quando l'algoritmo viene utilizzato per posizionare una valvola su un tubo per aumentare l'uniformità delle pressioni, secondo la funzione obiettivo 5.3, non si tiene conto del valore che queste assumono. Nonostante l'obiettivo sia quello dell'uniformità si vuole anche che le

pressioni in rete siano mantenute basse, per questa ragione viene aggiunto un coefficiente di penalità che tiene conto di quanti nodi hanno una pressione maggiore di 35 metri.

$$\max FF_2 = \max \{UC - PF_1 - PF_2 - PF_3 - PF_4\} \quad (5.6)$$

$$PF_3 = p_3 \cdot \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{t=1}^T PF_{3,nt} \quad PF_{3,nt} = \begin{cases} 0 & \text{se } p_{i,t} \leq p_{minPF_3} \\ \frac{p_{i,t} - p_{minPF_3}}{p_{max,PF_3} - p_{min,PF_3}} & \text{se } p_{minPF_3} < p_{i,t} < p_{maxPF_3} \\ 1 & \text{se } p_{i,t} \geq p_{maxPF_3} \end{cases}$$

$$PF_4 = p_4 \cdot \max(0, UC_0 - UC)$$

A differenza di  $PF_1$ , che viene calcolato nei soli nodi con domanda,  $PF_3$  viene calcolato in tutti i nodi di rete. Questo perché la limitazione delle pressioni ha tra i suoi fini la riduzione delle perdite e non si può escludere che anche aree della rete non caratterizzate dalla presenza di utenti siano affette da perdite. Inoltre dato che valori di pressione elevati sollecitano maggiormente la rete aumentando il rischio di danni, si vuole ridurre la pressione ovunque e non solo dove c'è domanda. Si consideri anche che la domanda stessa aiuta a regolare le pressioni quindi le zone dove non sono presenti utenti potrebbero risultare zone di alta pressione.

Dato che le soluzioni che non rispettano questo vincolo non vanno escluse ma solo penalizzate e considerato che UC assume valori tra 0 e 1, il fattore di accrescimento  $p_3$  è imposto pari a 10 (come  $p_2$ ). Inizialmente era stato posto pari a 1, ma le soluzioni risultavano meno ottimali in quanto la funzione obiettivo era meno restrittiva.

Il valore del coefficiente di penalità nodale  $PF_{3,nt}$  varia linearmente tra due pressioni fissate,  $p_{minPF_3} = 30 m$  e  $p_{maxPF_3} = 35 m$ . Se la pressione al nodo è minore o uguale a 30 metri il coefficiente di penalità è pari a zero e non influisce sulla funzione obiettivo, se è maggiore o uguale di 35 metri  $PF_{3,nt}$  è pari a 1. Si vuole quindi avvicinare le pressioni il più possibile a 30 metri andando a penalizzare ugualmente tutte le pressioni maggiori di 35 metri. Inizialmente erano stati scelti come valori  $p_{minPF_3} = 35 m$  e  $p_{maxPF_3} = 80 m$ , ma sono stati successivamente modificati per poterne valutare il peso sul valore del volume di perdita.

Utilizzando lo stesso valore di pressione come soglia di attivazione di  $PF_1$  e di  $PF_3$ , l'algoritmo tenderà a fare convergere le pressioni a quel valore che conviene quindi imporre pari alla pressione che il gestore considera come ottimale per servire l'utenza.

Il coefficiente di penalità  $PF_4$  (con  $p_4 = 1000$ ) esclude le soluzioni che comportano una diminuzione di coefficiente di uniformità. Esso risulta necessario in quanto altrimenti l'algoritmo tende a selezionare configurazioni che diminuiscono le pressioni medie senza aumentare il coefficiente di uniformità. Questo avviene perché  $PF_3$  ha un peso maggiore di UC e quindi tende ad indirizzare la ricerca.  $PF_4$  permette di trovare soluzioni che aumentano UC diminuendo le pressioni.

Il coefficiente  $PF_4$  sarebbe evitabile dando meno peso a  $PF_3$ , ma così facendo si avrebbe una peggior gestione delle perdite. Aggiungere  $PF_4$  è il trade-off che permette di aumentare UC, diminuendo le pressioni di rete.

## 5.2 Deviazione standard

La deviazione standard di un campione misura la dispersione dei singoli elementi rispetto alla loro media [45]. Volendo uniformare le pressioni di rete, l'obiettivo coincide con quello di minimizzare la deviazione standard delle pressioni ai nodi. La funzione obiettivo considerata è:

$$\min FF_3 = \min \{DS + PF_1 + PF_2\} \quad (5.7)$$

### 5.2.1 Funzione obiettivo che tiene conto del livello delle pressioni

Date le considerazioni fatte precedentemente (sottosezione 5.1.1) anche in questo caso si è utilizzata una funzione obiettivo che penalizza le soluzioni per cui i nodi hanno pressione maggiore di 35 metri.

$$\begin{aligned} \min FF_4 &= \min \{DS + PF_1 + PF_2 + PF_3 + PF_4\} \\ PF_4 &= p_4 \max(0, DS - DS_0) \end{aligned} \quad (5.8)$$

In questo caso il coefficiente di penalità  $PF_4$  (con  $p_4 = 1000$ ) esclude le soluzioni che comportano un aumento di deviazione standard.

## 5.3 Risultati per una valvola

Come esposto nella sezione 4.6, per ogni fattore di domanda vengono eseguite 10 simulazioni in cui il numero massimo di iterazioni è 20 e dove ogni simulazione genera 10 particelle (e quindi soluzioni). Per ogni simulazione l'algoritmo sceglie la particella che genera la soluzione più ottimale (funzione obiettivo minore o maggiore in base al caso); tra le 10 particelle selezionate viene poi selezionata la migliore. In questa sezione sono riportati i risultati complessivi per ogni fattore di domanda, ossia i valori delle variabili decisionali (tubo e setting) della particella selezionata e i valori dei parametri ottenuti (UC, DS, perdita...) utilizzando la configurazione ottimale.

### 5.3.1 Coefficiente di uniformità delle pressioni

FD [-]	tubo	setting [m]	FF [-]
0.61	P_28	34.17	0.9510
0.41	P_22	34.37	0.9386
0.81	P_28	32.64	0.9572
1.23	P_18	35.78	0.9598
1.13	P_28	31.34	0.9607
0.92	P_28	32.29	0.9592
1.03	P_28	31.41	0.9607
0.82	P_28	32.61	0.9573

Tabella 5.1: Risultati complessivi ottenuti con funzione obiettivo  $UC$  per una valvola

In tabella 5.1 sono riportati i risultati complessivi ottenuti con la funzione obiettivo  $UC$ : per ogni fattore di domanda è stata selezionata la configurazione che restituisce il valore massimo di funzione obiettivo (maggiore aumento di coefficiente di uniformità). Il valore della funzione obiettivo risulta pari a quello del coefficiente di uniformità. Questo significa che i coefficienti di penalità non si attivano e i vincoli sono sempre rispettati.

Come si può osservare in tabella 5.1, per domanda minima (FD=0.41) e per domanda massima (FD=1.23) il tubo selezionato dall'algoritmo è diverso che negli altri casi. È stato quindi ottimizzato il setting per ogni fattore di domanda installando la valvola sui tubi P\_28, P\_22 e P\_18, separatamente.

In tabella 5.2 sono riportati i risultati in termini di funzione obiettivo e variazione di UC, DS e

perdita per i tre casi. La configurazione che fornisce il miglior risultato in termini di funzione obiettivo è quella per cui la valvola viene installata sul tubo P\_28.

Si nota che installando la valvola sul tubo P\_18 il coefficiente di uniformità diminuisce invece che aumentare, questo significa che questa configurazione è adatta solo quando la domanda è massima.

In tabella 5.3 sono riportati i risultati per P\_28 completi per tutti i fattori di domanda.

Configurazione	FF [-]	$\Delta UC_{01}$	$\Delta DS_{01}$	$\Delta q_{leak,01}$
P_28	0.9557	1.15%	-13.36%	-2.25%
P_22	0.9492	0.47%	-15.27%	-5.36%
P_18	0.9427	-0.22%	2.68%	-0.44%

Tabella 5.2: Risultati ottenuti ottimizzando il setting per le configurazioni ottenute con  $UC$  per una valvola

FD [-]	setting [m]	P[W]	$UC_1$ [-]	$\Delta UC_{01}$	$DS_1$ [-]	$\Delta DS_{01}$	$q_{leak,1} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak,01}$
0.61	33.77	150	0.9523	1.70%	2.65	-18.59%	26.93	-2.99%
0.41	31.44	0	0.9444	1.50%	3.01	-16.27%	27.68	-2.33%
0.81	32.80	469	0.9572	1.42%	2.41	-15.35%	26.31	-2.71%
1.23	31.96	235	0.9605	0.08%	2.03	-1.26%	25.09	-0.39%
1.13	32.02	537	0.9612	0.40%	2.11	-4.53%	25.39	-1.11%
0.92	32.34	617	0.9592	1.12%	2.31	-12.08%	25.98	-2.36%
1.03	31.76	717	0.9609	0.83%	2.19	-8.70%	25.58	-2.10%
0.82	32.74	485	0.9574	1.39%	2.40	-15.11%	26.28	-2.70%

Tabella 5.3: Risultati con funzione obiettivo  $UC$  per valvola installata su tubo P\_28

Il coefficiente di uniformità medio passa dal valore iniziale di 0.94479 (senza valvola) a 0.95567 con una valvola installata, aumentando di 1.15%.

Quando la valvola è installata sul tubo P\_28, durante le ore di domanda minima (FD=0.41), la potenza disponibile non è mai maggiore di quella minima richiesta. È stato quindi ottimizzato il setting eliminando la penalità  $PF_2$  così da poter massimizzare il più possibile UC; così facendo la valvola risulta chiusa. Questa scelta è giustificata dal fatto che anche non producendo energia durante le quattro ore di domanda minima la potenza media disponibile durante le 24 ore è di 383 W e la potenza producibile è quindi comunque sufficiente a gestire la valvola.

Confrontando i risultati in tabella 5.3 con quelli ottenuti inizialmente (tab. 5.1) si osserva che per i due fattori di domanda per cui inizialmente non era stato scelto il tubo P\_28 (FD=0.41 e FD=1.23) alla fine la soluzione risulta migliore in termini di UC. Questo significa che inizialmente l'algoritmo aveva trovato un minimo locale e non quello globale.

Nelle figure 5.1 e 5.2 sono rappresentati gli andamenti della pressione media di rete e della deviazione standard in funzione dei fattori di domanda. Entrambe diminuiscono linearmente all'aumentare della domanda.

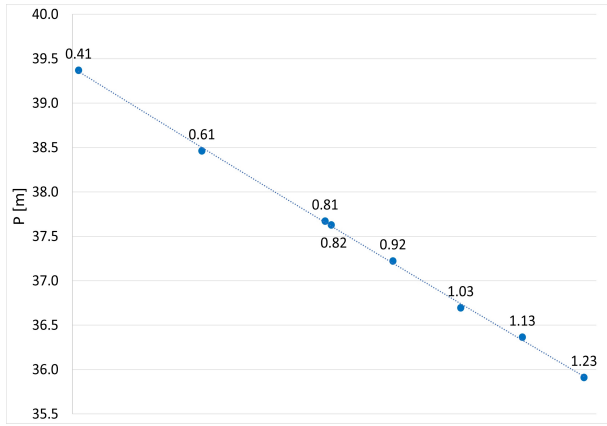


Figura 5.1: Valori di pressione media in funzione del fattore di domanda

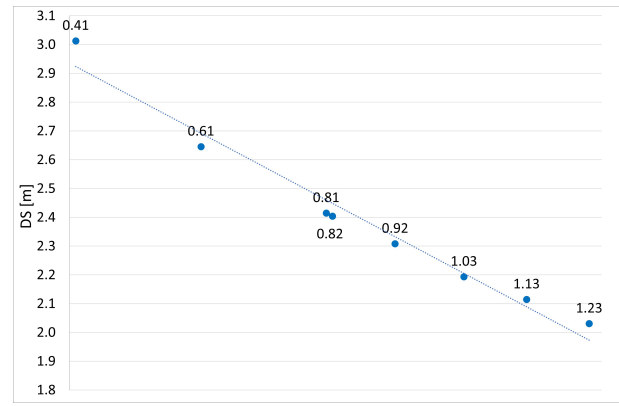


Figura 5.2: Valori di deviazione standard in funzione del fattore di domanda

### Funzione obiettivo che tiene conto del livello delle pressioni

FD [-]	tubo	setting [m]	FF [-]
0.61	P_22	34.82	0.010
0.41	P_22	34.34	-0.022
0.81	P_22	34.97	0.181
1.23	P_22	34.34	0.727
1.13	P_22	35.47	0.460
0.92	P_22	33.15	0.619
1.03	P_22	35.57	0.303
0.82	P_22	35.54	0.037

Tabella 5.4: Risultati complessivi ottenuti con funzione obiettivo  $UC + Pmax$  per una valvola

In questo caso l'algoritmo ha selezionato il tubo P\_22 per tutti i fattori di domanda (tab. 5.4). In tabella 5.5 sono riportati i risultati completi ottenuti ottimizzando il setting della valvola installata sul tubo P\_22.

Il coefficiente di uniformità medio è passato dal valore iniziale di 0.9448 (senza valvola) a 0.9476 con una valvola installata (+0.296%) a 0.9477 (+0.305%) con setting ottimizzato. La variazione di miglioramento che si ottiene ottimizzando il setting è sufficientemente piccola (+0.0089%) da poter affermare che l'algoritmo aveva trovato il massimo assoluto già al primo passaggio.

FD [-]	setting [m]	P[W]	$UC_1$ [-]	$\Delta UC_{01}$	$DS_1$ [-]	$\Delta DS_{01}$	$q_{leak,1} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak,01}$
0.61	34.85	2247	0.9430	0.71%	2.58	-20.69%	25.52	-8.06%
0.41	34.31	1303	0.9385	0.87%	2.74	-23.77%	25.49	-10.03%
0.81	35.00	2833	0.9477	0.42%	2.34	-18.07%	25.20	-6.84%
1.23	34.40	3770	0.9572	-0.27%	1.91	-7.21%	23.72	-5.82%
1.13	35.53	2480	0.9575	0.02%	2.00	-9.77%	24.65	-3.97%
0.92	33.26	4351	0.9476	-0.10%	2.15	-18.08%	23.93	-10.05%
1.03	35.68	2416	0.9548	0.19%	2.12	-11.73%	25.03	-4.22%
0.82	35.57	2444	0.9489	0.49%	2.38	-15.80%	25.51	-5.57%

Tabella 5.5: Risultati ottenuti ottimizzando il setting della valvola installata su tubo P\_22

Per i fattori di domanda 0.92 e 1.23 il coefficiente di uniformità diminuisce invece che aumentare. Il valore di variazione per  $FD=1.23$  è coerente con l'andamento che si ha all'aumentare della domanda (UC aumenta sempre meno all'aumentare della domanda).

La diminuzione per  $FD=0.92$  è spiegabile analizzando la definizione di UC (eq. 5.2) e l'andamento della pressione media con i fattori di domanda (fig. 5.3). Il punto in arancione in figura 5.3 rappresenta la pressione media di rete per  $FD=0.92$  e si trova molto più in basso della linea di tendenza che unisce gli altri punti (in blu). L'andamento della deviazione standard con i fattori di domanda riportata in figura 5.4 mostra una diminuzione lineare per tutti i casi. Dato che il coefficiente di uniformità diminuisce all'aumentare del rapporto tra deviazione standard e pressione per  $FD=0.92$  esso assume valori minori di quelli previsti.

Il risultato incoerente in termini di pressione media che si ha per  $FD=0.92$  può essere dovuto alla convergenza della soluzione in un minimo locale; le simulazioni sono state ripetute più volte senza ottenere una variazione nella soluzione.

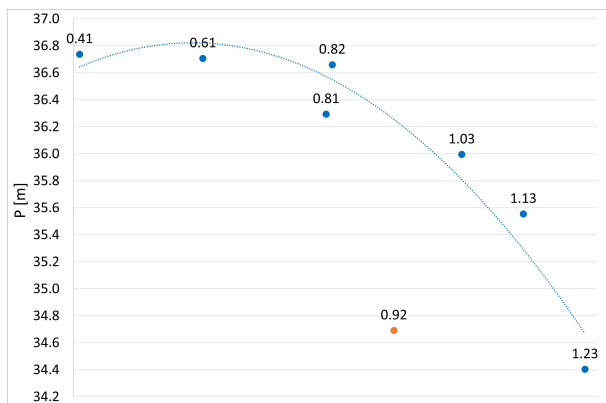


Figura 5.3: Valori di pressione media in funzione del fattore di domanda

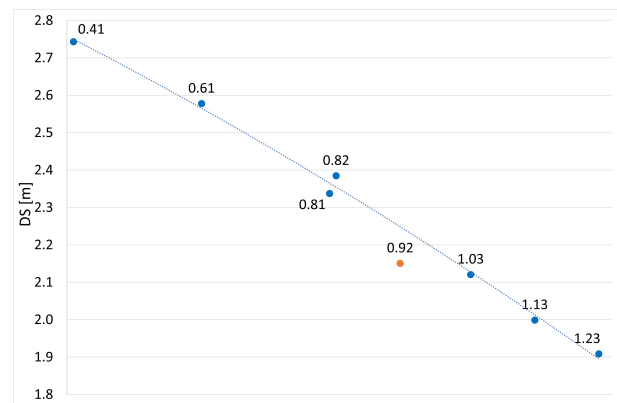


Figura 5.4: Valori di deviazione standard in funzione del fattore di domanda

### Confronto dei risultati

In termini di coefficiente di uniformità la funzione obiettivo  $UC$  dà risultati migliori rispetto a  $UC + Pmax$  (+1.15% vs +0.305%). Ciò è dovuto al fatto che  $UC + Pmax$  ha come obiettivo l'aumento di UC con il vincolo di mantenere il livello delle pressioni il più basso possibile. Analizzando la definizione di UC (eq. 5.2) si può vedere che al diminuire della pressione media, a parità di deviazione, UC aumenta. Essendo i due obiettivi contrari l'uno all'altro, nel secondo caso, l'ottimizzazione della rete risulta limitata.

È interessante notare che anche nel caso di  $UC$ , dove si vuole massimizzare il coefficiente di uniformità che tende ad aumentare all'aumentare della pressione, nonostante non siano presenti vincoli sul livello della pressione di rete, la pressione media che si ottiene è comunque minore di quella iniziale.

Nelle figure 5.5 e 5.6 sono rappresentati i valori del coefficiente di uniformità e della pressione media di rete per gli otto fattori di domanda. La funzione obiettivo  $UC$  è quella per cui il coefficiente di uniformità aumenta maggiormente; mentre l'utilizzo di  $UC + Pmax$  causa una maggiore diminuzione della pressione media.

Per analizzare l'uniformità delle pressioni per le due soluzioni ottenute si possono anche considerare i valori di deviazione standard.

In primo luogo si può analizzare la variabilità spaziale delle pressioni durante le 24 ore; si calcola



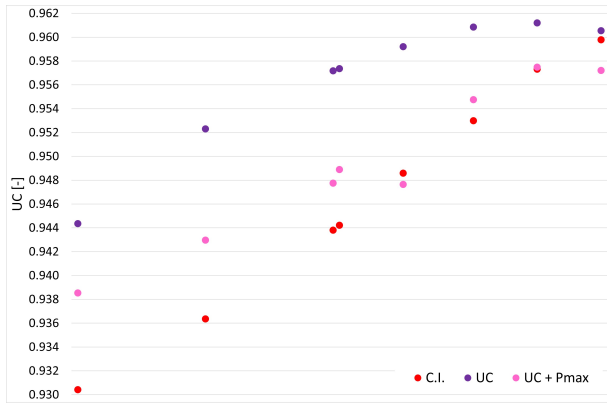


Figura 5.5: Confronto di UC in funzione del fattore di domanda tra la condizione iniziale senza valvole e per le configurazioni trovate con  $UC$  e  $UC + Pmax$

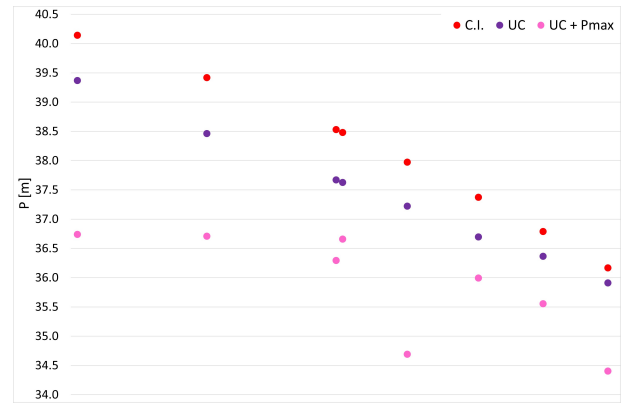


Figura 5.6: Confronto della pressione media di rete in funzione del fattore di domanda tra la condizione iniziale senza valvole e per le configurazioni trovate con  $UC$  e  $UC + Pmax$

quindi la deviazione standard delle pressioni (DS) per ogni fattore di domanda andando poi ad assegnare il valore ottenuto ad ogni ora in base alla curva di domanda. I valori per ogni fattore di domanda sono riportati nelle tabelle con i risultati (tabelle 5.3 e 5.5). La media sulle 24 ore di DS per  $UC$  è pari a 2.45 metri mentre per  $UC + Pmax$  a 2.32 metri.

In figura 5.7 è riportato il confronto della deviazione standard delle pressioni per i diversi fattori di domanda. Confrontando i risultati si vede che la funzione  $UC + Pmax$  comporta una maggiore diminuzione di deviazione standard rispetto a  $UC$ . Questo risultato è in contrasto con quello ottenuto in termini di coefficiente di uniformità (fig. 5.5) per cui  $UC$  restituisce risultati migliori di  $UC + Pmax$ . Questa differenza è dovuta al fatto che il coefficiente di uniformità aumenta all'aumentare della pressione media e come si può vedere in figura 5.6  $UC$  restituisce risultati con pressione media maggiore rispetto a  $UC + Pmax$ .

Se la funzione obiettivo dipende dal valore di pressione media della rete non è possibile confrontare i risultati ottenuti per diversi valori di domanda o su reti diverse, per questa ragione è stato scelto di testare anche due funzioni obiettivo basate sulla deviazione standard della pressione di rete. Infatti la deviazione standard misura la dispersione dei valori rispetto alla media ma è indipendente dal valore che essa assume.

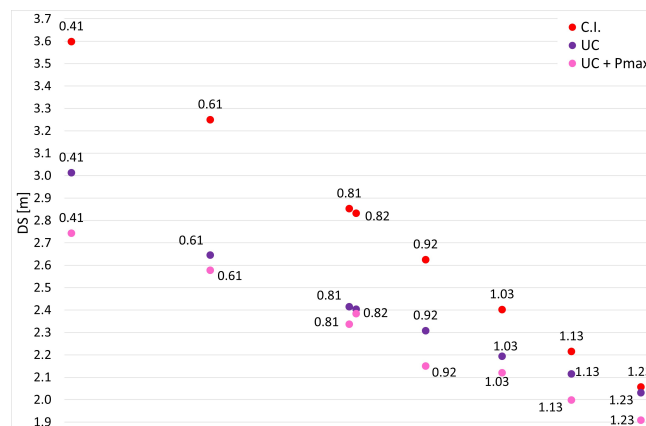


Figura 5.7: Confronto della deviazione standard in funzione del fattore di domanda tra la condizione iniziale senza valvole e per le configurazioni trovate con  $UC$  e  $UC + Pmax$

### 5.3.2 Deviazione standard delle pressioni

FD [-]	tubo	setting [m]	FF [-]
0.61	P_22	32.77	2.46
0.41	P_22	32.34	2.64
0.81	P_22	33.31	2.26
1.23	P_15	34.37	1.84
1.13	P_14	36.75	1.88
0.92	P_14	37.43	1.97
1.03	P_14	37.09	1.91
0.82	P_22	33.35	2.25

Tabella 5.6: Risultati complessivi ottenuti con funzione obiettivo  $DS$  per una valvola

In tabella 5.6 sono riportati i risultati complessivi ottenuti con la funzione obiettivo  $DS$ : per ogni fattore di domanda è stata selezionata la configurazione che restituisce il valore minimo di funzione obiettivo (maggiore diminuzione di deviazione standard). L'algoritmo seleziona tre diversi tubi in funzione del valore della domanda: il tubo P\_15 quando la domanda è massima, il tubo P\_22 per i valori di domanda minore e il tubo P\_15 negli altri casi (tab. 5.6). È stato quindi ottimizzato il setting per ogni fattore di domanda installando la valvola sui tubi P\_14, P\_15 e P\_22 separatamente

In tabella 5.7 sono riportati i risultati in termini di funzione obiettivo e variazione di UC, DS e perdita per i tre casi.

Configurazione	FF [-]	$\Delta UC_{01}$	$\Delta DS_{01}$	$\Delta q_{leak,01}$
P_14	95.47	1.18%	-18.68%	-2.63%
P_15	360.72	0.45%	-6.70%	-0.94%
P_22	2.25	0.11%	-20.28%	-10.18%

Tabella 5.7: Risultati ottenuti ottimizzando il setting per le configurazioni ottenute con  $DS$  per una valvola

Il minor valore di funzione obiettivo è ottenuto quando la valvola è installata sul tubo P\_22. Negli altri due casi per una o più ore la potenza disponibile per la valvola è minore di quella necessaria e si ottiene quindi un valore di funzione obiettivo molto elevato. Inoltre installando la valvola sul tubo P\_22 si ha la maggior diminuzione di deviazione standard.

In tabella 5.8 sono riportati i risultati completi ottenuti ottimizzando il setting della valvola installata sul tubo P\_22.

La deviazione standard passa da un valore medio di 2.83 metri (senza valvola) a 2.25 metri installando la valvola sul tubo P\_22, con una diminuzione media del -20.28%. La maggior diminuzione si ottiene, come prevedibile, per i fattori di domanda minori, infatti questi sono i casi per cui l'algoritmo aveva scelto il tubo già al primo passaggio; inoltre le ore di domanda minima sono quelle più critiche nella stato di fatto lasciando maggior margine di miglioramento per la procedura di ottimizzazione.

In figura 5.8 è rappresentato l'andamento della pressione in funzione del fattore di domanda. Come si può notare la pressione aumenta linearmente all'aumentare della domanda (andamento opposto rispetto ai risultati ottenuti in sezione 5.1), ma nonostante ciò le perdite diminuiscono all'aumentare della domanda (tab. 5.8). Ciò è dovuto al fatto che la pressione della rete

FD [-]	setting [m]	P[W]	$UC_1$ [-]	$\Delta UC_{01}$	$DS_1$ [-]	$\Delta DS_{01}$	$q_{leak,1} \left[ \frac{L}{s} \right]$	$\Delta q_{leak,01}$
0.61	32.77	2762	0.939	0.33%	2.46	-24.29%	24.27	-12.54%
0.41	32.34	1131	0.935	0.50%	2.64	-26.56%	24.29	-14.29%
0.81	33.31	3820	0.945	0.11%	2.26	-20.87%	24.21	-10.48%
1.23	34.82	3220	0.958	-0.19%	1.90	-7.50%	23.95	-4.88%
1.13	34.43	3766	0.956	-0.16%	1.96	-11.48%	24.04	-6.36%
0.92	33.68	4066	0.948	-0.02%	2.15	-18.28%	24.17	-9.15%
1.03	34.07	4038	0.952	-0.09%	2.04	-15.04%	24.11	-7.73%
0.82	33.35	3852	0.945	0.10%	2.25	-20.66%	24.21	-10.36%

Tabella 5.8: Risultati ottenuti ottimizzando il setting della valvola installata su tubo P\_22

aumenta con la domanda per garantire il servizio anche ai nodi più lontani dalle sorgenti (le perdite distribuite aumentano con la domanda) ma il valore che raggiungono è comunque minore di quello iniziale (senza valvole) e di quello ottenuto con UC.

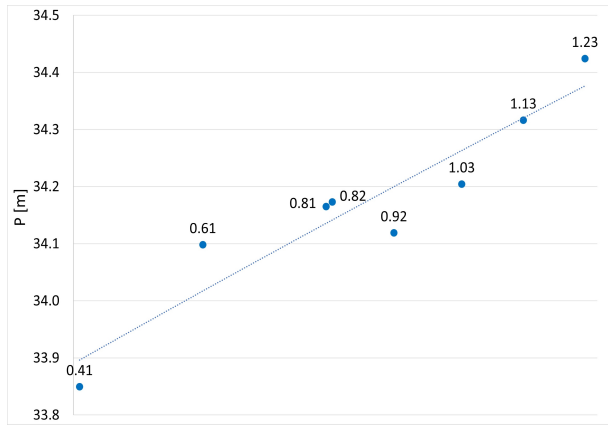


Figura 5.8: Valori di pressione media in funzione del fattore di domanda

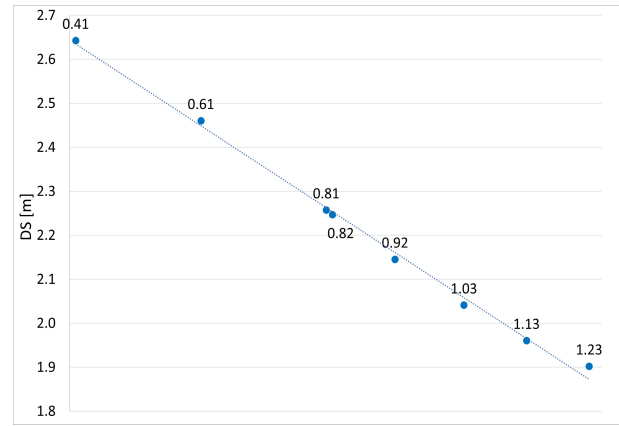


Figura 5.9: Valori di deviazione standard in funzione del fattore di domanda

### Deviazione standard + Pmax

FD [-]	tubo	setting [m]	FF [-]
0.61	P_22	30.99	139.8
0.41	P_22	30.42	133.4
0.81	P_22	31.85	149.6
1.23	P_22	34.39	170.0
1.13	P_22	33.58	162.3
0.92	P_22	32.33	152.8
1.03	P_22	32.94	157.2
0.82	P_22	31.82	148.0

Tabella 5.9: Risultati con funzione obiettivo  $DS + Pmax$  per una valvola

In questo caso l'algoritmo ha selezionato il tubo P\_22 per tutti i fattori di domanda (tab. 5.9). In tabella 5.10 sono riportati i risultati completi ottenuti ottimizzando il setting della

valvola installata sul tubo P\_22.

La deviazione standard media passa dal valore iniziale di 2.83 metri (senza valvola) a 2.315 metri con una valvola installata (-18.12%) a 2.317 metri (-18.05%) con setting ottimizzato. Il risultato di primo tentativo comporta una maggiore diminuzione di deviazione standard rispetto alla soluzione ottimizzata; ciò è dovuto al fatto che in questo caso la funzione obiettivo contiene la penalità legata al livello di pressione di rete. Infatti nel caso di setting non ottimizzato la pressione diminuisce -11.19%, mentre ottimizzando il setting la diminuzione è di -11.25%. Considerando che la differenza in variazione di deviazione standard tra i due casi è di -0.071% si può affermare che già al primo passaggio l'algoritmo abbia trovato il minimo assoluto.

FD [-]	setting [m]	P[W]	$UC_1$ [-]	$\Delta UC_{01}$	$DS_1$ [-]	$\Delta DS_{01}$	$q_{leak,1}$ [ $\frac{L}{s}$ ]	$\Delta q_{leak,01}$
0.61	30.97	2902	0.934	-0.30%	2.55	-21.52%	23.19	-16.43%
0.41	30.41	667	0.928	-0.28%	2.74	-23.83%	23.11	-18.46%
0.81	31.77	4490	0.940	-0.36%	2.33	-18.45%	23.31	-13.82%
1.23	34.24	3962	0.957	-0.33%	1.91	-6.97%	23.63	-6.16%
1.13	33.56	4699	0.953	-0.41%	1.99	-10.37%	23.55	-8.28%
0.92	32.31	4943	0.945	-0.42%	2.20	-16.18%	23.38	-12.11%
1.03	32.93	5016	0.949	-0.40%	2.08	-13.39%	23.47	-10.20%
0.82	31.81	4545	0.941	-0.36%	2.31	-18.26%	23.32	-13.67%

Tabella 5.10: Risultati ottenuti ottimizzando il setting della valvola installata su tubo P\_22

Il coefficiente di uniformità diminuisce per tutti i fattori di domanda. La spiegazione di questo fatto può essere spiegata come nel caso della funzione obiettivo  $DS$  (sottosezione 5.3.2): installando la valvola la pressione aumenta mentre la deviazione standard diminuisce linearmente

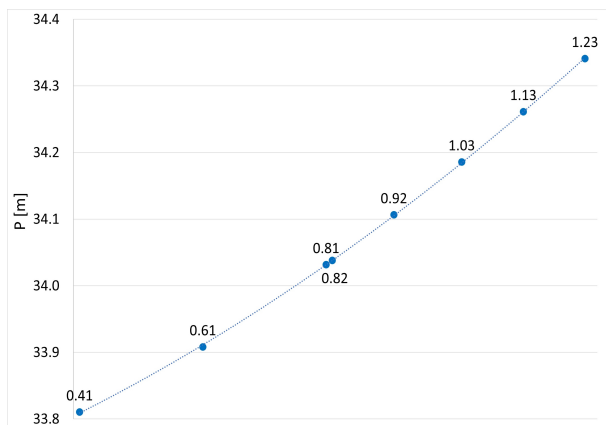


Figura 5.10: Valori di pressione media in funzione del fattore di domanda

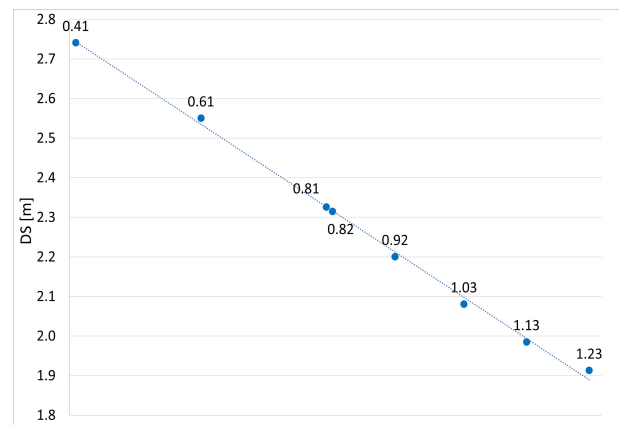


Figura 5.11: Valori di deviazione standard in funzione del fattore di domanda

### Confronto dei risultati

I risultati in termini di deviazione standard che si ottengono con le funzioni obiettivo  $DS$  e  $DS + Pmax$  sono comparabili ma non uguali, infatti quando si utilizza la funzione che ha come obiettivo la sola minimizzazione di  $DS$  il risultato che si ottiene è migliore (-20.28% vs

-18.05%). Ciò è sensato in quanto nel secondo caso l'algoritmo deve gestire il vincolo sul livello delle pressioni di rete. La media sulle 24 ore della deviazione standard delle pressioni di rete è pari a 2.25 metri per  $DS$  e a 2.32 metri per  $DS + Pmax$  (variazione spaziale). Questi valori sono equiparabili a quelli ottenuti con  $UC$  ed  $UC + Pmax$  (5.3.1).

In termini di variazione nel tempo delle pressioni, la deviazione standard della pressione media nelle 24 ore è pari a 0.159 metri per  $DS$  e a 0.165 metri per  $DS + Pmax$ . In questo caso il risultato che si ottiene è migliore di quello ottenuto con  $UC$  ed  $UC + Pmax$ .

Come sottolineato in sottosezione 5.3.1 si può notare che anche non imponendo un vincolo sul livello della pressione media ( $DS$ ) le pressioni diminuiscono comunque rispetto alla condizione iniziale (-11.05%). In questo caso raggiungono un valore quasi uguale a quello ottenuto imponendo il vincolo,  $DS + Pmax$  (-11.25%).

## 5.4 Confronto dei risultati per 1 valvola

Confrontando i risultati ottenuti con le diverse funzioni obiettivo si nota che in un caso su quattro ( $UC$ ) la valvola viene installata sul tubo P\_28 mentre negli altri casi sul tubo P\_22.

In questa sottosezione vengono confrontati i risultati ottenuti con le diverse funzioni obiettivo in termini di potenza disponibile, coefficiente di uniformità, deviazione standard e perdite. Vengono considerati anche i risultati ottenuti con la funzione obiettivo di minimizzazione delle perdite (*minimizzazione*).

### 5.4.1 Setting

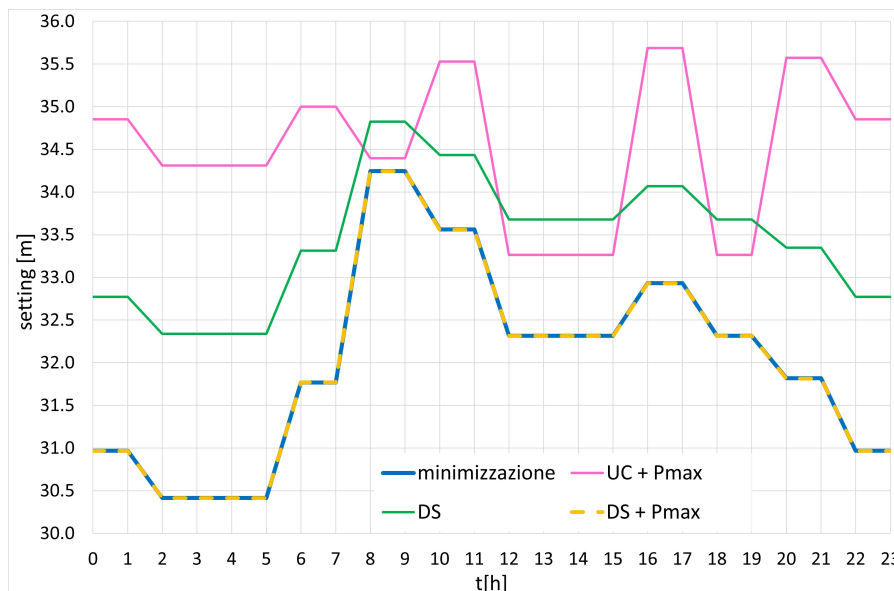


Figura 5.12: Andamento del setting orario della valvola installata sul tubo P\_22

In figura 5.12 sono riportati i setting della valvola installata sul tubo P\_22. Come si può osservare il risultato ottenuto utilizzando le funzioni obiettivo *minimizzazione* e  $DS + Pmax$  coincidono, quindi l'effetto che si avrà sulla rete nei due casi sarà il medesimo. Per questi due casi e per la funzione  $DS$ , l'andamento del setting segue quello della domanda

idrica (fig.4.3) come in 4.6.

Il setting ottenuto tramite la funzione obiettivo  $UC + Pmax$  non segue la curva di domanda, infatti per alcuni valori di domanda il setting risulta diverso da quello che ci si potrebbe aspettare osservando le altre soluzioni. Ciò può essere dovuto alla maggior complessità della funzione obiettivo: infatti essa dipende da UC, composto da media e deviazione standard delle pressioni, e dai coefficienti di penalità, mentre negli altri casi o non sono presenti le penalità ( $DS$ ) o si considerano separatamente il valore della pressione (*minimizzazione*) e la sua deviazione standard ( $DS + Pmax$ ). Dovendo tenere conto di più fattori contemporaneamente, il setting può doversi adattare ai diversi vincoli in modo differente durante le 24 ore.

I due fattori di domanda per cui il setting ha valori insoliti sono  $FD=0.92$  (tra le 12 e le 15 e tra le 18 e le 19) e  $FD=1.23$  (tra le 8 e le 9). L'andamento insolito del setting è la ragione per cui, come esposto in 5.3.1, la pressione di rete subisce un brusco calo.

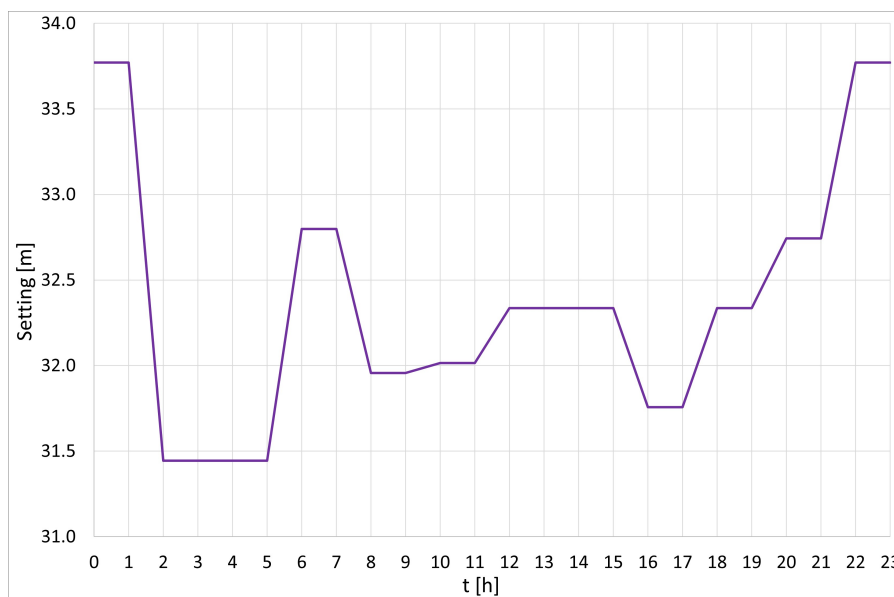


Figura 5.13: Andamento del setting orario della valvola installata sul tubo P\_28

In figura 5.13 è riportato il setting della valvola installata sul tubo P\_28 scelto dall'algoritmo per minimizzare la funzione obiettivo 5.3. Il setting ha andamento opposto alla curva di domanda (fig. 4.3), tranne che per domanda minima: infatti tra le 2:00 e le 5:00 il setting assume un valore molto basso. Come esposto in sottosezione 5.3.1, per domanda minima è stato cercato il setting che massimizzasse il coefficiente di uniformità non tenendo conto del vincolo della potenza disponibile minima. Questa scelta è giustificata dal fatto che anche non producendo energia durante le quattro ore di domanda minima la potenza media disponibile durante le 24 ore è di 383 W ed è quindi comunque sufficiente a gestire la valvola. Il valore di setting minore di quello che ci si sarebbe potuti aspettare è quindi dovuto a questa modifica della soluzione cercata.

## 5.4.2 Potenza disponibile

In figura 5.14 è riportato l'andamento della potenza disponibile ad ogni ora quando la configurazione della valvola è scelta in base alle funzioni obiettivo 5.3 ( $UC$ ), 5.6 ( $UC + Pmax$ ), 5.7 ( $DS$ ) e 5.8 ( $DS + Pmax$ ).

L'andamento della potenza disponibile durante la giornata è maggiore per i valori di domanda

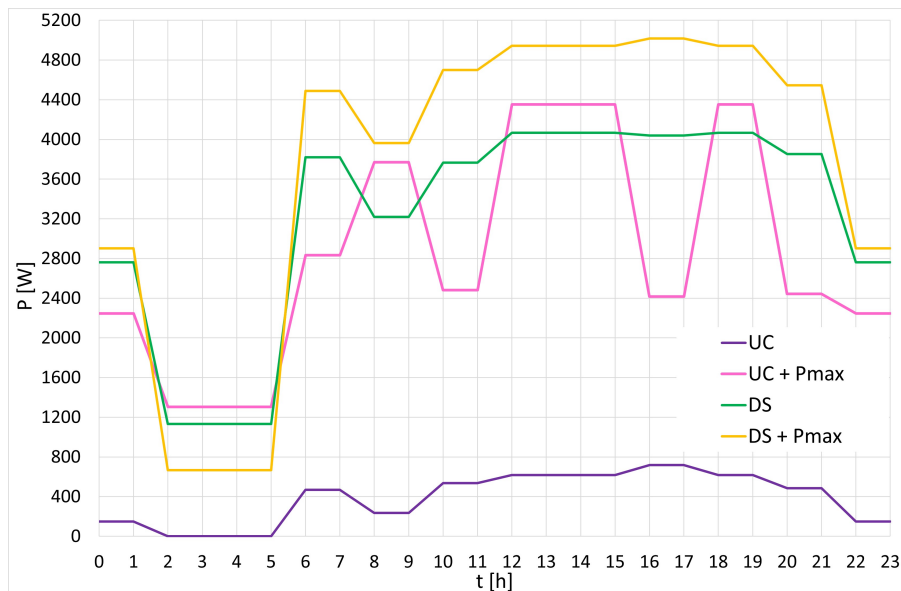


Figura 5.14: Andamento della potenza disponibile

medi ( $FD=0.92$  e  $FD=1.03$ ); infatti per domanda bassa la valvola risulta più chiusa per poter meglio gestire le pressioni e quindi la portata che transita è bassa, per domanda elevata le pressioni necessitano minor regolazione quindi  $\Delta P$  risulta basso.

La potenza prodotta con la configurazione  $UC$  raggiunge un valore minimo di 0 W prodotti durante la notte, ciò è il risultato della scelta esposta in sottosezione 5.4.1 di non tenere conto della potenza minima.

La potenza minima disponibile necessaria per gestire la valvola è di 200 W. Tutte le quattro configurazioni forniscono almeno questo valore e in caso fosse disponibile potenza in eccesso essa può essere utilizzata per altri usi locali o accumulata.

Quando si sceglie su quale tubo installare la valvola va comunque considerato il diverso ordine di grandezza della potenza disponibile, e quindi producibile a parità di condizioni, che si ha per i due tubi.

### 5.4.3 Coefficiente di uniformità

In figura 5.15 sono rappresentati gli andamenti del coefficiente di uniformità per le diverse configurazioni. Sono riportati anche l'andamento per la condizione iniziale senza valvole e per la configurazione trovata con la funzione obiettivo *minimizzazione*.

L'andamento del coefficiente di uniformità è concorde con quello della domanda idrica (fig. 4.3): all'aumentare della domanda, la deviazione standard della pressione diminuisce e la maggiore o minore concordanza con la domanda è data dalla pressione media (sezioni 5.1 e 5.2).

La funzione  $UC$  che ha come obiettivo la massimizzazione del coefficiente di uniformità senza vincoli sul livello delle pressioni ( $UC$ ), è l'unica per cui il valore di  $UC$  risulta sempre maggiore di quello iniziale ( $C.I.$ ) durante le 24 ore. Anche quando si vuole massimizzare  $UC$  ma si tiene conto del livello della pressione ai nodi ( $UC+Pmax$ ), il valore di  $UC$  che si ottiene risulta minore di quello iniziale per alcuni valori di domanda.

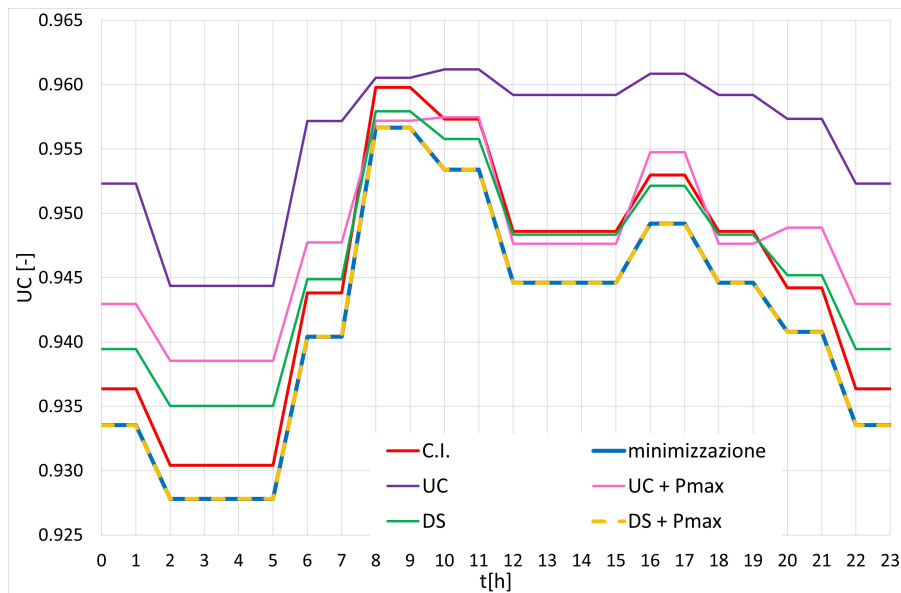


Figura 5.15: Andamento del coefficiente di uniformità (UC) con 1 valvola installata nelle diverse configurazioni

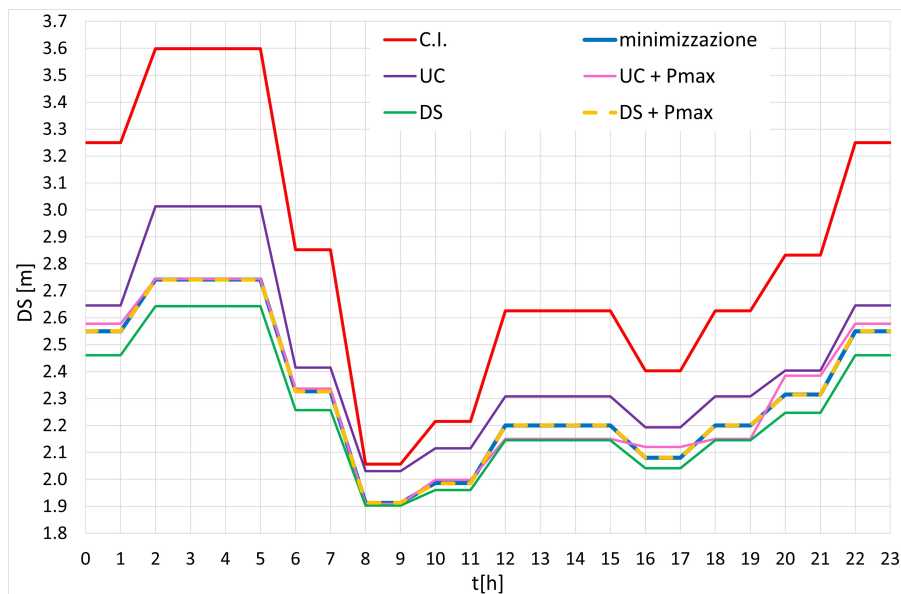


Figura 5.16: Andamento della deviazione standard delle pressioni con 1 valvola installata nelle diverse configurazioni

#### 5.4.4 Deviazione standard

In figura 5.16 sono rappresentati gli andamenti della deviazione standard delle pressioni di rete per le diverse configurazioni.

Tutte le funzioni obiettivo usate forniscono una soluzione che diminuisce la deviazione standard rispetto alla condizione iniziale. La funzione che ha come obiettivo la minimizzazione della deviazione senza vincoli (*DS*) è quella per cui si hanno i risultati migliori; ma soprattutto per i valori di domanda maggiori l'efficacia è molto simile, escludendo *UC*, agli altri casi.



### 5.4.5 Perdite

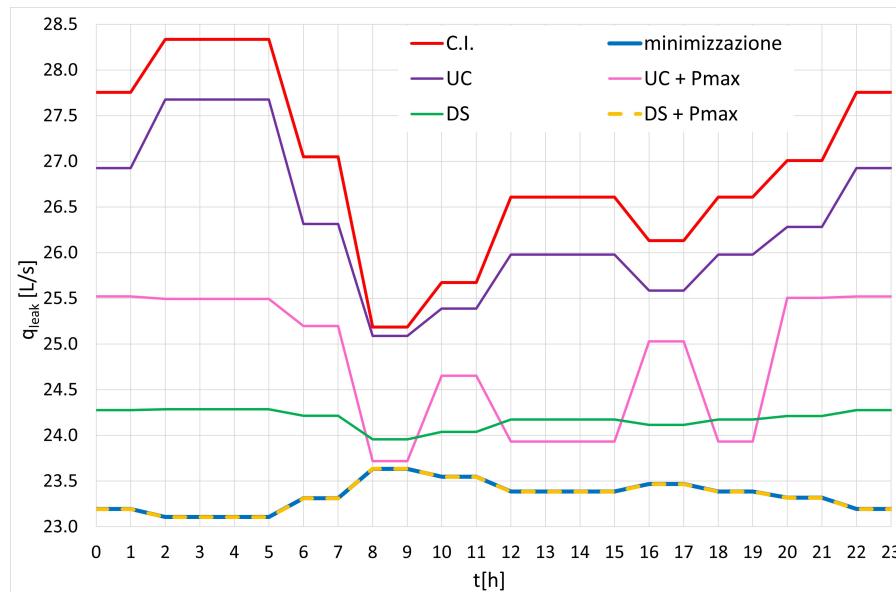


Figura 5.17: Andamento delle perdite idriche con 1 valvola installata nelle diverse configurazioni

In figura 5.17 sono rappresentati gli andamenti delle perdite idriche per le diverse configurazioni.

Tutte le funzioni obiettivo usate forniscono una soluzione che diminuisce le perdite rispetto alla condizione iniziale.

L'effetto ottenuto dalla funzione obiettivo che minimizza le perdite (*minimizzazione*) e la funzione obiettivo che minimizza la deviazione standard con il vincolo sulle pressioni (*DS + Pmax*) danno gli stessi risultati. Ciò è conseguente al fatto che i setting trovati nei due casi sono i medesimi.

### 5.4.6 Conclusioni tratte dai risultati ottenuti con 1 valvola

#### Diminuzione della pressione media

Come espresso nelle sezioni 5.1 e 5.2 la pressione media di rete diminuisce anche quando non sono presenti vincoli ad essa correlati nella funzione obiettivo. Nel caso delle funzioni obiettivo legate a UC questa diminuzione è minore che nel caso di quelle legate a DS. Ciò è dovuto al fatto che UC aumenta all'aumentare del livello di pressione.

#### Uniformità delle pressioni

I risultati (sezioni 5.1 e 5.2) mostrano che le quattro funzioni obiettivo restituiscono soluzioni che comportano variabilità spaziali delle pressioni (DS) simili: a parità di domanda le pressioni in rete sono similmente uniformi. Riferendosi ai grafici in figura 5.16 si osserva che a parità di orario le soluzioni differiscono di poco. Per confrontare le soluzioni si può calcolare il valore medio della deviazione standard durante le 24 ore.

In termini di variabilità temporale le funzioni obiettivo legate a DS danno risultati più uniformi rispetto a quelle legate a UC: la pressione in un dato nodo varia di meno durante la giornata. Per confrontare le soluzioni si può calcolare la deviazione standard della pressione media di rete calcolata a ogni ora.

In tabella sono riportati la media di DS pesata sulle 24 ore (variabilità spaziale media) e la deviazione standard della pressione media durante le 24 ore (variabilità temporale) che si hanno senza valvole installata (C.I.) e con le quattro configurazioni.

configurazione	variabilità spaziale [m]	variabilità temporale [m]
C.I.	2.83	1.228
<i>UC</i>	2.45	1.078
<i>UC + Pmax</i>	2.32	0.938
<i>DS</i>	2.25	0.159
<i>DS + Pmax</i>	3.32	0.165

Tabella 5.11: Valori di variabilità spaziale e temporale delle pressioni con le diverse configurazioni

### Legame tra coefficiente di uniformità e pressione media

Dalle conclusioni tratte nelle sezioni 5.1 e 5.2 si può dedurre che il coefficiente di uniformità sia meno rappresentativo dell'uniformità delle pressioni in rete rispetto alla deviazione standard. Ciò è dovuto alla sua dipendenza dalla pressione media.

Il coefficiente di uniformità è parametro ideato per misurare l'uniformità del soddisfacimento della domanda degli utenti in una rete (sez. 5.1). Dato che l'obiettivo è la massimizzazione del soddisfacimento della domanda, il fatto che *UC* aumenti all'aumentare della media non è limitante. Nel caso delle pressioni l'obiettivo, oltre all'aumento dell'uniformità, è anche quello di abbassarne il valore medio, quindi, anche visti i risultati ottenuti, si può concludere che *UC* non sia adatto a questo scopo. Per questa ragione nella prossima sezione non si riporteranno i risultati delle funzioni obiettivo *UC* e *UC + Pmax* per il caso in cui vengono installate due valvole.

Nell'ambito della gestione delle pressioni il coefficiente di uniformità può essere modificato utilizzando, invece della pressione media (che varia tra rete e rete e durante le ore), una pressione di riferimento, che può essere ad esempio quella ottimale per il servizio agli utenti. In questo modo è possibile confrontare i risultati che si ottengono sia su reti diverse che per valori di domanda diversi.

### Gestione delle perdite

I risultati in termine di variabili decisionali ottenuti con le funzioni obiettivo *minimizzazione* e *DS + Pmax* sono uguali. Ciò comporta che gli effetti sulla rete siano gli stessi.

È interessante osservare che per poter utilizzare la funzione obiettivo *minimizzazione* è necessario conoscere l'entità delle perdite e la loro localizzazione, invece per poter utilizzare *DS + Pmax* è sufficiente conoscere la distribuzione delle pressioni in rete. Nella realtà le pressioni sono solitamente note in quanto sono facilmente ricavabili una volta installati dei misuratori di pressione. Le perdite invece sono più difficili da localizzare e da caratterizzare anche quando sono a disposizione misuratori di pressione e portata. Ciò significa che poter ottenere gli stessi risultati conoscendo solo l'andamento delle pressioni in rete comporta un grosso vantaggio dal punto di vista pratico.

La gestione delle perdite tramite l'utilizzo di valvole di regolazione può essere utile nel breve-medio periodo per limitare il volume perso mentre si utilizzano altre tecniche per localizzare le perdite e poter agire sulla loro eliminazione (riparazione o sostituzione del tubo); mentre nel

lungo periodo le valvole possono permettere di uniformare la pressione in rete migliorando il servizio all'utenza e diminuendo la sollecitazione dell'infrastruttura.

## 5.5 Risultati per due valvole

### 5.5.1 Deviazione standard delle pressioni

FD [-]	tubo1	tubo2 [m]	FF [-]
0.61	P_14	P_17	2.281
0.41	P_22	P_15	2.684
0.81	P_14	P_22	1.874
1.23	P_22	P_21	1.729
1.13	P_22	P_21	1.727
0.92	P_14	P_22	1.652
1.03	P_22	P_14	1.688
0.82	P_14	P_17	1.959

Tabella 5.12: Risultati con funzione obiettivo  $DS$  per due valvole

Per minimizzare la deviazione standard l'algoritmo seleziona quattro possibili configurazioni (tab. 5.12). È stata quindi eseguita la ricerca del setting ottimale per i quattro casi. In tabella 5.13 sono riportati i risultati complessivi.

Configurazione	FF [-]	$\Delta UC_{02}$	$\Delta DS_{02}$	$\Delta q_{leak,02}$
P_14 P_17	2.03	1.25%	-28.25%	-6.76%
P_15 P_22	1.99	0.89%	-29.78%	-10.81%
P_14 P_22	119.2	1.29%	-28.13%	-7.23%
P_21 P_22	382.5	0.98%	-16.47%	-2.45%

Tabella 5.13: Risultati ottenuti ottimizzando il setting per le configurazioni ottenute con  $DS$  per due valvole

Osservando i valori delle funzione obiettivo in tabella 5.13 si può affermare che nel caso delle configurazioni P\_14 P\_22 e P\_21 P\_22 per alcuni fattori di domanda non sono rispettati i vincoli sulla potenza disponibile.

Le configurazioni P\_14 P\_17 e P\_15 P\_22 comportano entrambe una diminuzione di deviazione standard rispettando i vincoli imposti. Si potrebbe scegliere subito la configurazione P\_15 P\_22 in quanto comporta la maggior diminuzione di deviazione ma andando ad osservare la potenza disponibile media giornaliera per le due valvole si nota che per P\_15 è pari a 161 W. Nonostante questo valore sia superiore a 150 W (potenza sotto la quale si attiva la penalità  $PF_2$ ), esso non è sufficiente a produrre la potenza necessaria a gestire la valvola (20 W). Nel caso della configurazione P\_14 P\_17 entrambe le valvole hanno una potenza disponibile media giornaliera maggiore di 300 W. Considerando che la differenza in termini di miglioramento della deviazione standard è molto bassa (0.04 metri), si sceglie la configurazione P\_14 P\_17. È stato quindi ottimizzato il setting per questo caso.

Osservando i risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P\_14 e P\_17, si è visto che per i fattori di domanda minore (FD=0.41 e FD=0.61) si ottenevano

valori di deviazione standard non allineati rispetto all'andamento generale (linea di tendenza blu in fig. 5.18). In figura 5.18 è riportato l'andamento della deviazione standard in funzione della domanda: i triangoli in arancione rappresentano i valori iniziali di DS ottenuti per i due fattori di domanda minore. Questo disallineamento può essere dovuto al fatto che per rispettare il vincolo sulla potenza, l'algoritmo sceglie valori di setting sufficientemente alti affinché la potenza disponibile sia maggiore di 150 W, ma così facendo il miglioramento in termini di deviazione standard risulta limitato.

Si è quindi provato ad ottimizzare i setting delle valvole eliminando  $PF_2$  (come fatto in sezione 5.3.1) per  $FD=0.41$  e  $FD=0.61$ . I triangoli in blu rappresentano i valori finali trovati. Come si può vedere anche in questo caso i punti non si allineano sulla linea di tendenza, ma si ottiene comunque un ulteriore diminuzione di deviazione standard.

Anche non producendo energia durante alcune ore, la potenza disponibile media giornaliera risulta pari a 318 W per la valvola installata su P\_14 e a 1049 W per quella installata su P\_17. Entrambe le potenze sono sufficienti per produrre abbastanza energia per gestire la valvole.

In tabella 5.14 sono riportati i risultati complessivi. Si può osservare che per  $FD=0.61$ ,

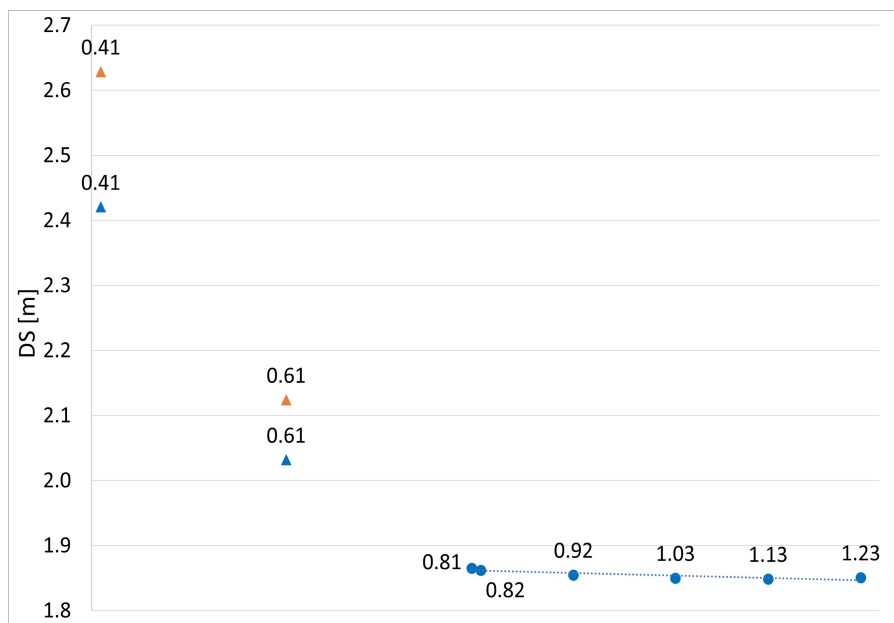


Figura 5.18: Valori di deviazione standard in funzione del fattore di domanda

nonostante l'assenza della penalità  $PF_2$ , la valvola installata sul tubo P\_17 ha una potenza disponibile diversa da zero. Le potenze uguali a zero sono date dalla totale chiusura della valvola per favorire l'uniformità delle pressioni.

La deviazione standard media sulle 24 ore passa dal valore iniziale 2.83 metri (senza valvole) a 1.98 metri, diminuendo del 30.02%. Rispetto alla condizione ottenuta installando una valvola c'è un miglioramento del 9.74%.

FD [-]	setting P_14 [m]	setting P_17 [m]	P P_14 [W]	P P_17 [W]
0.61	30.81	35.77	0	1121
0.41	30	30	0	0
0.81	36.87	36.26	150	1496
1.23	36.22	35.99	815	544
1.13	36.35	36.10	800	965
0.92	36.50	36.16	412	1510
1.03	36.44	36.16	666	1287
0.82	36.72	36.21	153	1529

FD [-]	$DS_2[-]$	$\Delta DS_{02}$	$q_{leak,2} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak,02}$
0.61	2.03	-37.48%	25.29	-8.89%
0.41	2.42	-32.74%	25.61	-9.63%
0.81	1.87	-34.62%	25.04	-7.44%
1.23	1.85	-10.01%	24.49	-2.75%
1.13	1.85	-16.55%	24.64	-4.03%
0.92	1.85	-29.35%	24.84	-6.64%
1.03	1.85	-23.00%	24.75	-5.29%
0.82	1.86	-34.25%	24.97	-7.54%

Tabella 5.14: Risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P\_14 e P\_17

### Deviazione standard + Pmax

FD [-]	tubo1	tubo2 [m]	FF [-]
0.61	P_14	P_17	2.77
0.41	P_18	P_22	2.95
0.81	P_22	P_14	3.02
1.23	P_21	P_22	1.93
1.13	P_22	P_21	1.91
0.92	P_17	P_14	2.24
1.03	P_22	P_14	1.91
0.82	P_22	P_15	2.60

Tabella 5.15: Risultati con funzione obiettivo  $DS + Pmax$  per due valvole

Per minimizzare la deviazione standard l'algoritmo seleziona cinque possibili configurazioni. È stata eseguita la ricerca del setting delle valvole per i cinque casi. In tabella 5.16 sono riportati i risultati complessivi nei cinque casi.

La configurazione che restituisce il valore minore di funzione obiettivo è quella per cui le valvole sono installate sui tubi P\_18 e P\_22. Tuttavia confrontando i risultati con i risultati ottenuti installando una valvola (tab. 5.10) si osserva che la soluzione con due valvole è meno ottimale in termini di deviazione standard, mentre dà risultati migliori in termini di perdite. La configurazione che diminuisce maggiormente la deviazione standard è quella per cui le valvole sono installate sui tubi P\_15 e P\_22 (come avveniva per  $DS$ ) e dà risultati migliori rispetto al caso con una valvola in termini di deviazione e peggiori in termini di perdite. Come per  $DS$ , la potenza disponibile per P\_15 è pari a 161 W e quindi non sufficiente a produrre l'energia

Tubo	FF [-]	$\Delta DS_{02}$	$\Delta q_{leak,02}$
P_14 P_17	161.9	-4.63%	-10.52%
P_18 P_22	128.4	-15.59%	-15.82%
P_14 P_22	275.1	-15.20%	-8.46%
P_21 P_22	565.1	-22.50%	-9.03%
P_15 P_22	149.2	-19.15%	-13.30%

Tabella 5.16: Risultati ottenuti ottimizzando le configurazioni ottenute dall'algoritmo con funzione obiettivo  $DS + P_{max}$

necessaria a gestire la valvola.

Entrambe le configurazioni non rispettano pienamente tutti i vincoli del problema. La soluzione P\_18 P\_22 è adatta quando si vogliono diminuire le perdite oltre a voler uniformare le pressioni; mentre la soluzione P\_15 P\_22 è adatta per uniformare le pressioni ma si deve tenere in conto che una delle due valvole non avrà sufficiente energia per autoregolarsi. Si riportano le soluzioni per entrambi i casi.

### Minimizzazione della deviazione standard

FD [-]	setting P_15 [m]	setting P_22 [m]	P P_15[W]	P P_22[W]
0.61	34.77	31.02	159	2975
0.41	34.93	30.45	164	770
0.81	34.56	31.84	171	4522
1.23	34.00	34.32	151	3857
1.13	34.14	33.65	170	4619
0.92	34.44	32.38	151	4941
1.03	34.30	33.01	153	4973
0.82	34.54	31.89	182	4577

FD [-]	$DS_2[-]$	$\Delta DS_{02}$	$q_{leak,2} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak,02}$
0.61	2.52	-22.50%	23.20	-16.41%
0.41	2.71	-24.55%	23.11	-18.45%
0.81	2.29	-19.73%	23.32	-13.80%
1.23	1.89	-8.04%	23.64	-6.15%
1.13	1.95	-11.80%	23.55	-8.26%
0.92	2.17	-17.40%	23.39	-12.09%
1.03	2.05	-14.72%	23.48	-10.17%
0.82	2.28	-19.65%	23.32	-13.65%

Tabella 5.17: Risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P\_15 e P\_22

In tabella 5.17 sono riportati i risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P\_15 e P\_22.

La deviazione standard media sulle 24 ore passa dal valore iniziale 2.83 metri (senza valvole) a 2.29 metri, diminuendo del 19.15%. Rispetto alla condizione ottenuta installando una valvola c'è un ulteriore miglioramento del 1.10%.

## Minimizzazione delle perdite

FD [-]	setting P_18 [m]	setting P_22 [m]	P P_18[W]	P P_22[W]
0.61	30.04	30.99	903	3054
0.41	30.02	30.42	714	843
0.81	30.06	31.80	1086	4593
1.23	30.44	34.30	1394	3876
1.13	30.07	33.61	1375	4671
0.92	30.05	32.35	1188	5009
1.03	30.09	32.97	1282	5038
0.82	30.06	31.85	1096	4646

FD [-]	$DS_2[-]$	$\Delta DS_{02}$	$q_{leak,2} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak,02}$
0.61	2.57	-20.96%	22.52	-18.87%
0.41	2.73	-24.16%	22.43	-20.84%
0.81	2.39	-16.36%	22.63	-16.32%
1.23	2.05	-0.10%	23.00	-8.69%
1.13	2.15	-3.10%	22.87	-10.92%
0.92	2.29	-12.67%	22.71	-14.66%
1.03	2.20	-8.32%	22.79	-12.79%
0.82	2.38	-16.06%	22.64	-16.18%

Tabella 5.18: Risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P\_18 e P\_22

In tabella 5.18 sono riportati i risultati ottenuti ottimizzando il setting delle valvole installate sui tubi P\_18 e P\_22.

La perdita media sulle 24 ore passa dal valore iniziale 26.92 L/s (senza valvole) a 22.66 L/s, diminuendo del 15.82%. Rispetto alla condizione ottenuta installando una valvola c'è un ulteriore incremento del 2.50% (0.7 L/s).

Questa configurazione è la stessa trovata utilizzando la funzione obiettivo *minimizzazione* nel capitolo 4. Anche l'andamento dei setting delle valvole è lo stesso quindi ci si può aspettare gli stessi effetti sulla rete.

## 5.6 Confronto dei risultati per due valvole

In questa sottosezione vengono confrontati i risultati ottenuti con le diverse funzioni obiettivo in termini di coefficiente di uniformità, deviazione standard e perdite. Vengono considerati anche i risultati ottenuti con la funzione obiettivo di minimizzazione delle perdite.

### 5.6.1 Setting

In figura 5.19 è riportato l'andamento delle coppie di valvole per tutte le configurazioni.

Il setting della valvola installata sul tubo P\_22 è lo stesso per tutte e tre le configurazioni che la installano. Il diverso effetto che esse hanno sulla rete è quindi dato dalla seconda valvola che viene installata.

Nel caso di *minimizzazione* e  $FF_4$  *minimizzazione* anche per la seconda valvola, installata

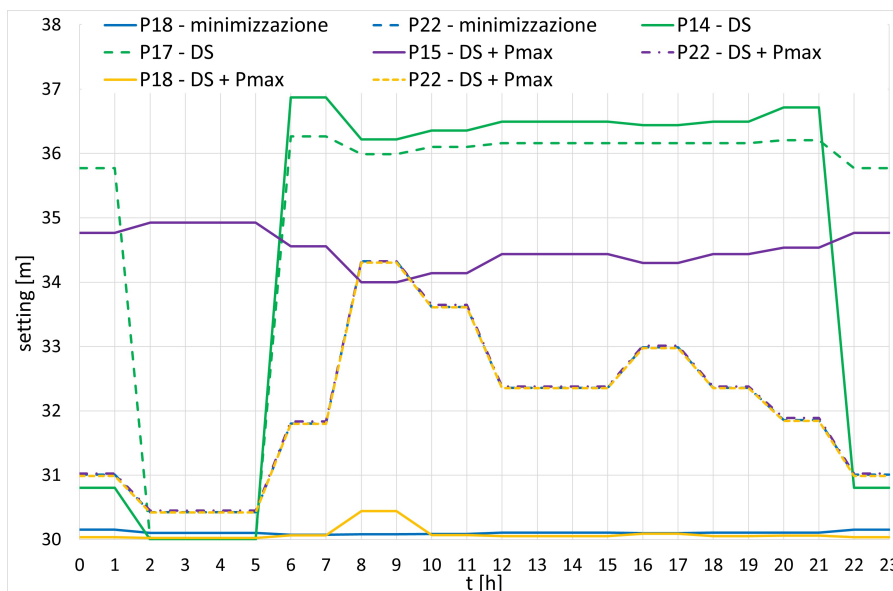


Figura 5.19: Andamento dei setting con 2 valvole installate nelle diverse configurazioni

sul tubo P\_18, il setting ha pressoché uguale andamento, tranne che per le due ore di domanda massima in cui c'è una differenza di circa 0.4 metri. Questa differenza può fare sì che, per quelle due ore, l'effetto delle due configurazioni sulla rete sia diverso. In generale il setting oscilla poco durante la giornata intorno a un valore di poco superiore ai 30 metri.

Nel caso di  $FF_4 DS$ , il setting della valvola installata sul tubo P\_15 ha un andamento opposto alla curva di domanda con limitate oscillazioni nel tempo.

I setting delle due valvole installate sui tubi P\_14 e P\_17 oscillano intorno a un valore abbastanza elevato dovuto alla mancanza del vincolo sul livello delle pressioni. Durante le quattro ore di domanda minima i setting raggiungono valori molto bassi a causa della mancanza del vincolo sulla potenza.

Quando l'obiettivo è la minimizzazione della deviazione standard ( $DS$  e  $FF_4 DS$ ), il setting della seconda valvola ha un andamento opposto a quello della curva di domanda. Mentre quando l'obiettivo è quello di minimizzazione delle perdite (*minimizzazione* e  $FF_4$  *minimizzazione*) il setting della seconda valvola ha un andamento pressoché costante con un valore medio molto basso.

## 5.6.2 Potenza

In figura 5.20 sono rappresentati gli andamenti della potenza disponibile per le valvole per le diverse configurazioni.

Il tubo P\_22 fa parte della dorsale che trasporta l'acqua in tutta la rete; per questa ragione la portata che lo attraversa è elevata (media giornaliera di 96 L/s). Ciò permette alla valvola installata su di esso di avere un'elevata potenza disponibile durante tutte le 24 ore. Come già esposto per una valvola (5.4) la potenza disponibile raggiunge valori massimi per fattori di domanda media.

La valvola installata sul tubo P\_15, come già esposto, ha una potenza disponibile bassa. Ciò è dovuto al fatto che il tubo trasporta una portata abbastanza bassa (media giornaliera di



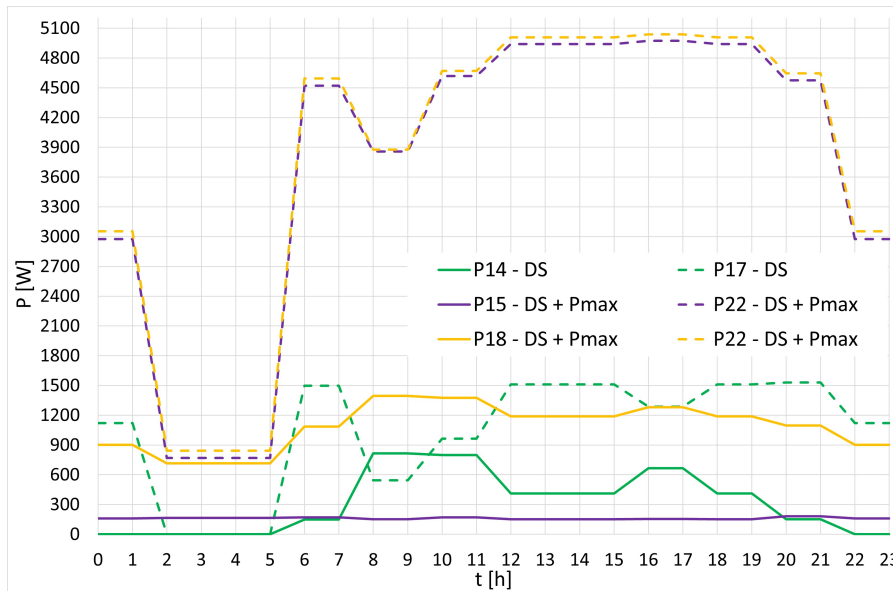


Figura 5.20: Andamento della potenza disponibile per 2 valvole installate nelle diverse configurazioni

9.4 L/s) con un salto medio durante la giornata di circa 2 metri.

La valvola installata sul tubo P\_18 ha invece una potenza disponibile maggiore e infatti la portata media giornaliera che passa è di 16.6 L/s con un salto medio di 10 metri.

La potenza disponibile per le valvole installate sui tubi P\_14 e P\_17 si annulla tra le 2 e le 5 (ore di domanda minima) e nel caso di P\_14 anche tra le 22 e le 2 ( $FD=0.61$ ). Ciò è dovuto al fatto che è stata eliminata la penalità sulla potenza per permettere una maggiore diminuzione della deviazione standard.

### 5.6.3 Deviazione standard

In figura 5.21 sono rappresentati gli andamenti della deviazione standard delle pressioni di rete per le diverse configurazioni.

Anche per due valvole la soluzione che diminuisce maggiormente la deviazione standard è quella ottenuta con  $DS$ . La configurazione P\_15 P\_22 ottenuta con  $DS + Pmax$  dà anch'essa dei buoni risultati.

In questo caso gli andamenti di  $DS$  per *minimizzazione* e  $FF_4$  *minimizzazione* sono concordi eccetto che per domanda massima a causa della differenza di setting della valvola installata su P\_18. Questa differenza è dovuta al fatto che nella funzione obiettivo  $DS + Pmax$  è presente il coefficiente di penalità  $PF_4$  che esclude le soluzioni che aumentano la deviazione standard rispetto alla condizione iniziale, elemento che non è presente in *minimizzazione*.

### 5.6.4 Perdite

In figura 5.22 sono rappresentati gli andamenti delle perdite idriche per le diverse configurazioni.

Tutte le funzioni obiettivo usate forniscono una soluzione che diminuisce le perdite rispetto alla condizione iniziale.

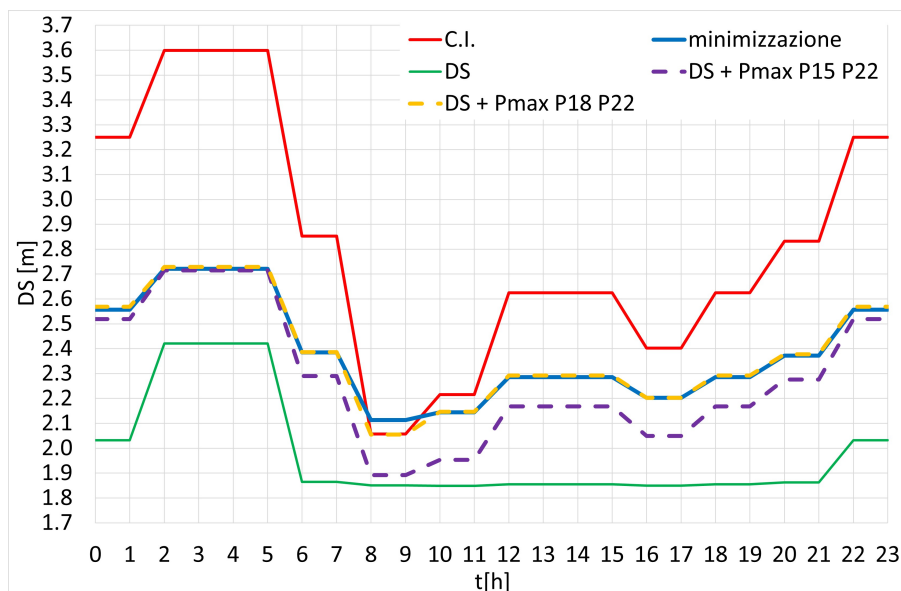


Figura 5.21: Andamento della deviazione standard delle pressioni con 2 valvole installate nelle diverse configurazioni

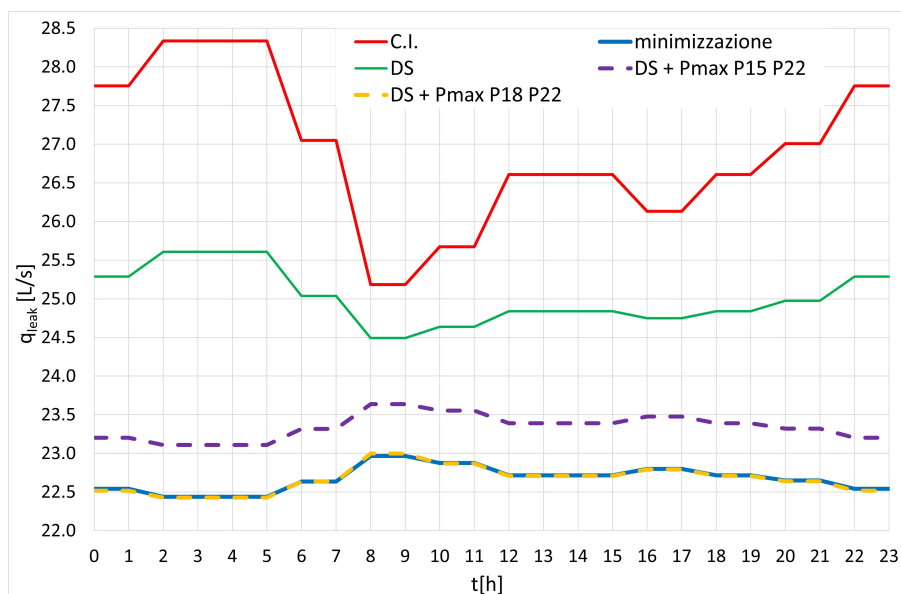


Figura 5.22: Andamento delle perdite idriche con 2 valvole installate nelle diverse configurazioni

Gli andamenti delle perdite ottenuti con le funzioni obiettivo *minimizzazione* e *DS + Pmax* con configurazione P\_18 P\_22 sono uguali.

La differenza di setting tra le due soluzioni che si ha per domanda massima non incide sull'andamento delle perdite; ciò può essere dovuto al fatto che la valvola P\_18 influenza pochi nodi. L'installazione della seconda valvola su un tubo che influenza pochi nodi può sembrare una scelta poco efficace, ma il tubo P\_18 viene comunque scelto dall'algoritmo in quanto si trova a valle della sorgente R\_23 che fornisce i tre nodi in alto non influenzati dal tubo P\_22 (sottosezione 4.1.1). Ciò permette la gestione di un'area che altrimenti non sarebbe regolata.

Nel caso  $FF_4$  *DS* l'andamento delle perdite è lo stesso che si ha per *minimizzazione* e  $FF_4$  *minimizzazione* ma traslato di circa 0.7 L/s. Esso coincide con l'andamento delle perdite

che si ha quando si installa una singola valvola sul tubo P\_22 con setting trovato dalle funzioni obiettivo *minimizzazione* e  $DS + Pmax$  (sezioni 4.6 e 5.4). L'installazione della valvola sul tubo P\_15 non ha quindi alcun effetto sulle perdite ma solo sulla deviazione standard.

È interessante osservare che l'andamento delle perdite segue la domanda per tutti i casi tranne che per la soluzione ottenuta con  $DS$ . Infatti quando le valvole sono installate sui tubi P\_14 e P\_17 l'andamento delle perdite è opposto a quello della domanda e segue quello delle perdite in assenza di valvole. Questo comportamento è concorde con l'andamento del setting evidenziato precedentemente.

### 5.6.5 Conclusioni tratte dai risultati ottenuti con 2 valvole

Come nel caso per una valvola, anche in questa sezione si è visto che in termini di gestione delle perdite le funzioni obiettivo *minimizzazione* e  $DS + Pmax$  possono dare gli stessi risultati. Data l'utilità in termini pratici di questo risultato, queste due funzioni verranno utilizzate per ottimizzare una rete più complessa così da valutare se il risultato è estendibile ad altri casi.

# Capitolo 6

## Applicazione del metodo alla rete L-Town

Per verificare se le funzioni obiettivo *minimizzazione* e  $DS + Pmax$  restituiscono gli stessi risultati anche in situazioni più complesse della rete benchmark, esse verranno utilizzate per ottimizzare il setting di valvole già presenti in una rete di dimensioni maggiori. Verrà utilizzata la rete L-Town fornita nella "Battle of the Leakage Detection and Isolation Methods" (BattLe DIM) [5].

### 6.1 Rete L-Town

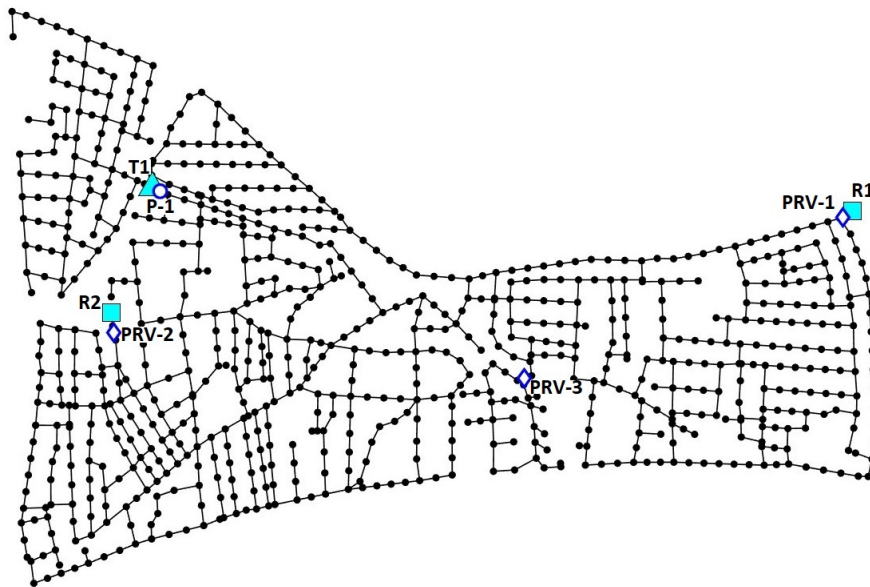


Figura 6.1: Rete L-Town fornita nella Battle of the Leakage Detection and Isolation Methods [5]

La rete L-Town (fig. 6.1) è stata generata basandosi sulla rete reale di una piccola città in Cipro [46]. È formata da 782 nodi, 2 sorgenti e un serbatoio collegati tra di loro da 905 tubi. Le due sorgenti (R1 e R2) sono dotate a valle di due valvole di riduzione della pressione (PRV-1 e PRV-2) che regolano la pressione in rete. È inoltre presente una terza valvola (PRV-3) che regola la pressione di una piccola zona di 31 nodi caratterizzati da quota molto bassa (minore di 8 metri s.l.m.).

Il serbatoio (T1) fa parte di un impianto di pompaggio che fornisce una zona a quota elevata

(maggiore di 58 metri s.l.m.): il serbatoio, che si trova a una quota di 98.68 m s.l.m., viene riempito tramite la pompa (P-1) e fornisce a gravità gli utenti.

Ulteriori caratteristiche riguardanti tubi, nodi e impianti sono forniti in [5].

La rete può essere divisa in quattro area (fig. 6.2): le aree Z1 (in blu) e Z2 (in rosso) servite dai serbatoi R1 e R2, rispettivamente; l'area Z3 (in giallo) che è servita da R1 ma la si considera separatamente in quanto la pressione viene regolata in ingresso da PRV-3 e quindi non dipende dalla quota della sorgente; l'area Z4 (in verde) servita tramite la stazione di pompaggio e che riceve acqua sia da R1 che da R2.

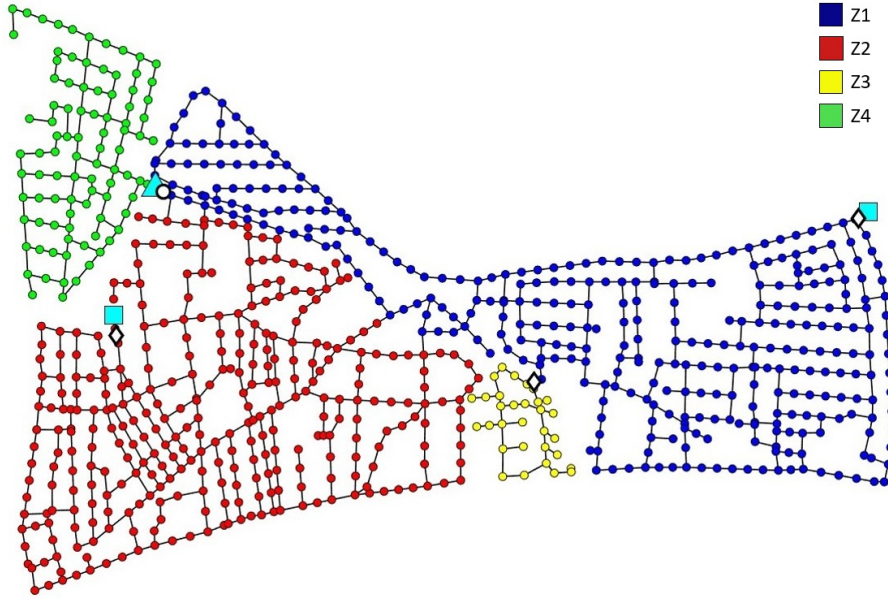


Figura 6.2: Rappresentazione delle aree in cui può essere divisa la rete

## 6.2 Modifiche apportate

Dato che l'obiettivo di questo lavoro è comparare i risultati ottenuti utilizzando due diverse funzioni obiettivo su una rete di dimensioni reali, alcune caratteristiche della rete sono state modificate per meglio adattarsi a questo scopo.

### 6.2.1 Curva di domanda

Ogni utente è caratterizzato da tre diversi valori di domanda di base: civile, commerciale e industriale. La domanda complessiva a ogni ora è calcolata come la somma pesata delle domande di base sulle tre curve di domanda:

$$D_{tot,i} = \alpha_{civ,t} \cdot q_{base\ civ,i} + \alpha_{com,t} \cdot q_{base\ com,i} + \alpha_{ind,t} \cdot q_{base\ ind,i} \quad i = 1 \dots N_n, t = 0 \dots 23 \quad (6.1)$$

- $\alpha_{civ,t}$ ,  $\alpha_{com,t}$  e  $\alpha_{ind,t}$  sono i fattori moltiplicativi al tempo  $t$  della domanda civile, commerciale e industriale rispettivamente;
- $q_{base\ civ,i}$ ,  $q_{base\ com,i}$  e  $q_{base\ ind,i}$  sono i valori di base per il nodo  $i$  per la domanda civile, commerciale e industriale rispettivamente.

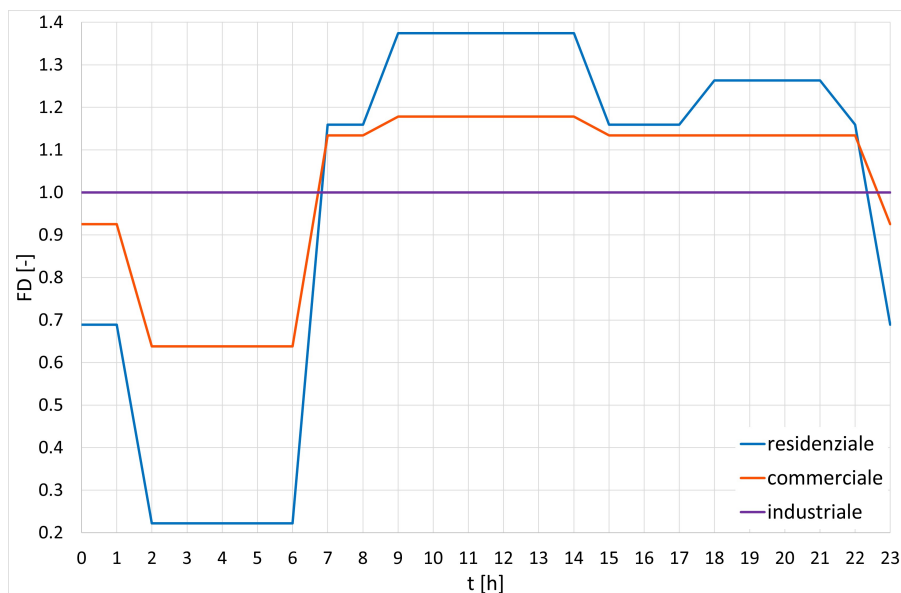


Figura 6.3: Curve di domanda giornaliera

La domanda civile ha un andamento a due picchi; la domanda commerciale assume valore pressoché costante durante il giorno per poi diminuire durante la notte; la domanda industriale è pari a 1 durante tutte le 24 ore (fig. 6.3).

Queste tre curve sono state adattate da quelle utilizzate per la BattLe DIM.

### 6.2.2 Distribuzione delle perdite

Per poter valutare i risultati in condizioni diverse, sono state considerate due configurazioni di perdite, distribuite in modo casuale tra i nodi della rete. In entrambi i casi le perdite sono circa 250 con una portata media di 0.5 L/s per una perdita totale che si attesta a circa il 47% della domanda complessiva.



Figura 6.4: Distribuzione delle perdite nelle due configurazioni

### 6.2.3 Condizione iniziale

Nella rete fornita per la Battle le tre valvole sono settate con valori fissi durante l'intera simulazione. Per permettere una più libera evoluzione dell'algoritmo, nella condizione iniziale le tre valvole sono state settate completamente aperte.

## 6.3 Funzione obiettivo

Le funzioni obiettivo utilizzate sono *minimizzazione* (eq.4.6) e  $DS + Pmax$  (eq. 5.8).

Dato che la rete L-Town ha caratteristiche molto diverse rispetto alla rete benchmark, sono state cambiate le pressioni limite e i parametri di penalità utilizzati.

### Esclusione sulla pressione minima, $PF_1$

Nella rete L-Town alcuni nodi sono caratterizzati da pressioni critiche con minimi di circa 15 metri a valvole aperte, per questa ragione la pressione sotto la quale si attiva il coefficiente di penalità  $PF_1$  è stata abbassata a 10 metri. Inoltre il parametro di penalità è stato aumentato a  $10^{10}$ , in questo modo si aumenta la severità della penalità. Essendo la rete più complessa rispetto alla rete benchmark la convergenza della soluzione può risultare più complessa e quindi conviene escludere maggiormente le soluzioni che allontanano dall'ottimo.

### Penalità sulla potenza disponibile minima, $PF_2$

Data l'entità della portata che passa attraverso le valvole e della differenza di carico che si può ottenere tra il nodo a monte e quello a valle, la potenza disponibile risulta sempre maggiore di 150 W non attivando mai sostanzialmente questa penalità.

### Penalità sulla pressione massima, $PF_3$

Le pressioni in rete hanno un andamento molto variabile con massimi fino a 80 metri quando le valvole sono aperte. Il valore di pressione oltre la quale si attiva il coefficiente di penalità  $PF_3$  è stato abbassato a 20 metri, alzando il valore massimo oltre cui esso è pari a 1 a 80 metri. Utilizzare un valore massimo di 35 metri come per la rete benchmark avrebbe portato ad avere valori molto elevati di  $PF_3$  rischiando di rendere più difficile la convergenza della soluzione.

### Esclusione sulla deviazione standard, $PF_4$

Dato il consistente numero di nodi della rete,  $PF_3$  può assumere valori abbastanza elevati. Si è quindi preferito aumentare il parametro di penalità di  $PF_4$  a  $10^{10}$  per evitare che si potessero avere soluzioni finali con deviazione standard maggiore di quella iniziale.

### Numero di iterazioni e particelle

Oltre ad aumentare i parametri di penalità, la maggiore complessità della rete ha richiesto l'aumento del numero di particelle e di iterazioni massime.

Il numero di particelle è stato aumentato da 10 a 20 così da avere un maggior numero di soluzioni finali da confrontare e poter valutare con più sicurezza la convergenza.

Il numero di iterazioni è stato prima aumentato da 20 a 30 e successivamente fino a 40. Infatti fermando la simulazione dopo 30 iterazioni la soluzione sembra non convergere pienamente. In

figura 6.5 è rappresentato l'andamento della perdita per le 20 particelle durante le iterazioni. Si può osservare che a 30 iterazioni la soluzione converge meno che a 40.

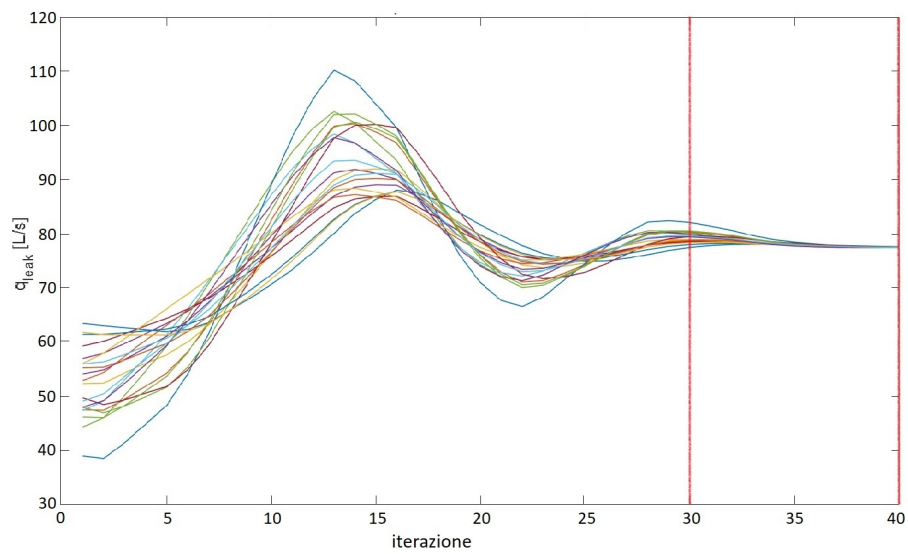


Figura 6.5: Andamento della perdita di rete per le 20 particelle durante le iterazioni



## 6.4 Configurazione perdite LEAK1

La configurazione LEAK1 presenta 252 perdite caratterizzate da una portata media di 0.479 L/s; la perdita media giornaliera dell'intera rete è di 120.8 L/s (10433 m<sup>3</sup>). In figura 6.6 è riportato l'andamento della perdita complessiva durante le 24 ore.

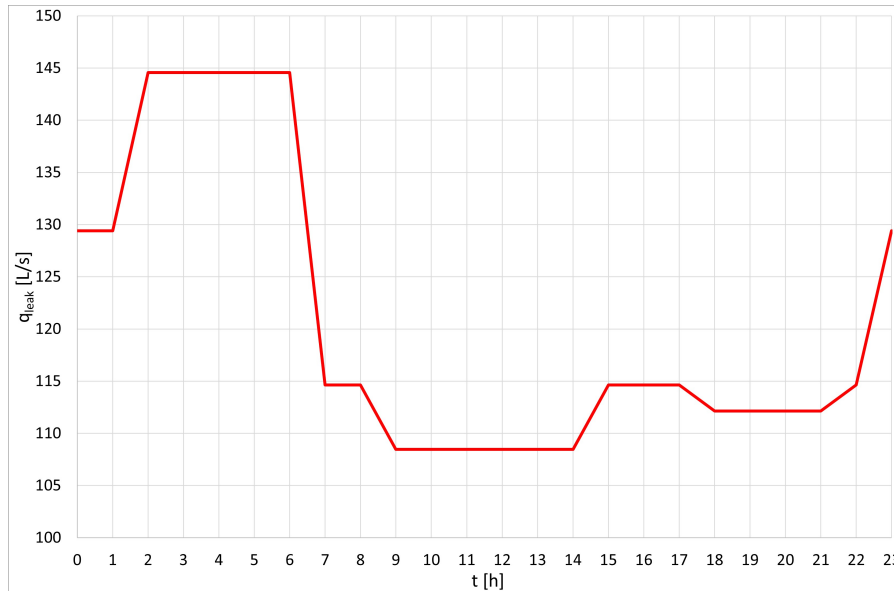


Figura 6.6: Andamento della perdita di rete con valvole aperte durante le 24 ore

La pressione media iniziale è di 48.75 metri con una deviazione nel tempo di 4.49 metri. La deviazione nello spazio (DS) ha un valore iniziale medio durante le 24 ore di 11.13 metri. In figura 6.7 sono rappresentate le pressioni a domanda minima (ore 4:00) e massima (ore 12:00).

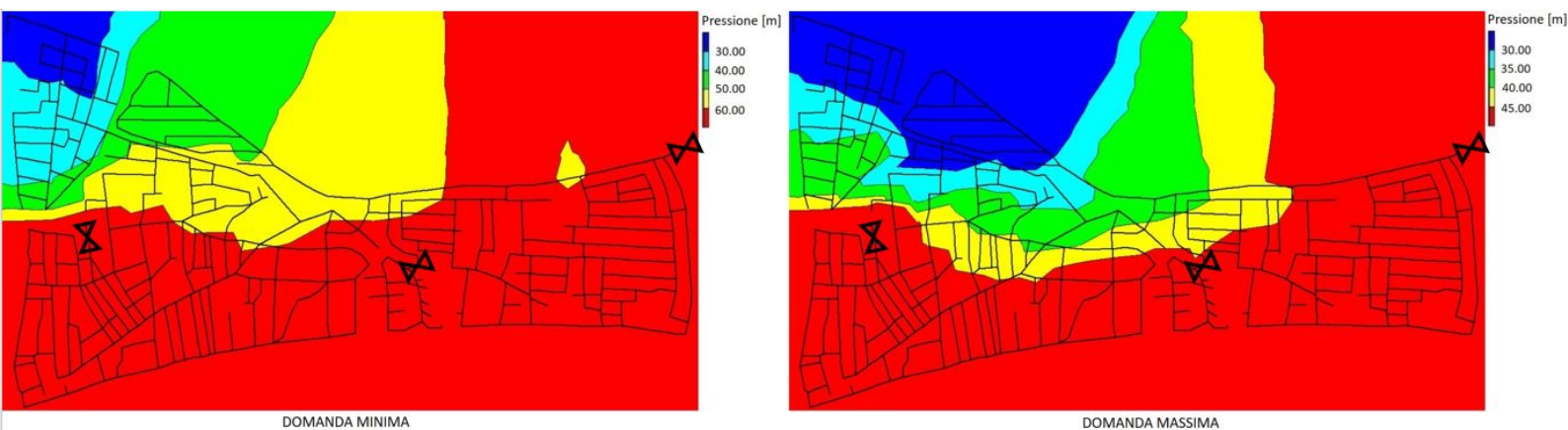


Figura 6.7: Distribuzione delle pressioni con valvole aperte, per domanda minima e domanda massima

### 6.4.1 Risultati

Per ogni fattore di domanda vengono eseguite 10 simulazioni in cui il numero massimo di iterazioni è 40 e dove ogni simulazione genera 20 particelle (e quindi soluzioni). Per ogni simulazione

l'algoritmo sceglie la particella che genera la soluzione più ottimale (funzione obiettivo minore); tra le 20 particelle selezionate viene poi selezionata la migliore. In questa sezione sono riportati i risultati complessivi per ogni fattore di domanda, ossia i valori delle variabili decisionali (setting) della particella selezionata e i valori di potenza, deviazione standard e perdita ottenuti utilizzando la configurazione ottimale.

### Minimizzazione perdite

FD [-]	setting PRV-1 [m]	PRV-2 [m]	PRV-3 [m]
0.22	29.73	40.15	12.53
0.69	36.56	47.32	16.81
1.16	42.68	56.98	12.00
1.26	48.83	54.23	13.55
1.37	45.06	62.00	11.92

FD [-]	$DS[m]$	$\Delta DS$	$q_{leak} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak}$
0.22	7.79	-34.78%	73.42	-49.21%
0.69	8.04	-28.64%	76.97	-40.52%
1.16	9.36	-14.01%	80.23	-30.01%
1.26	9.32	-14.15%	81.25	-27.54%
1.37	9.91	-8.39%	81.99	-24.41%

Tabella 6.1: Risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando *minimizzazione*

In tabella 6.1 sono riportati i risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando la funzione obiettivo *minimizzazione*. I fattori di domanda (FD) si riferiscono alla curva di domanda civile.

Il carico totale dei nodi delle aree R1 e R2 è circa lo stesso, a parità di fattore di domanda, dato che non sono presenti valvole che le separano e che quindi esse sono interconnesse. Essendo la quota media dei nodi nell'area R2 (22.9 metri) minore di quella dei nodi di R1 (28.8 metri), la pressione che si deve garantire in R2 è maggiore di quella in R1. Ciò spiega la ragione per cui il setting ottenuto per PRV-1 è minore di quello ottenuto per PRV-2.

L'area Z3 è separata piezometricamente dal resto della rete tramite PRV-3 e il setting di PRV-3 può essere impostato in modo da minimizzare il più possibile le perdite in quell'area.

La diminuzione di deviazione standard media sulle 24 ore che si ottiene è del 19.16% con miglioramenti percentuali che peggiorano all'aumentare della domanda. Con la domanda aumentano le perdite distribuite e quindi il setting delle valvole deve aumentare per garantire il servizio a tutti i nodi, ma così facendo diminuisce l'effetto che le valvole hanno sulla rete. Per la stessa ragione con l'aumento della domanda diminuisce il miglioramento in termini di perdite. Il miglioramento medio sulle 24 ore è del 34.57%.

### Minimizzazione deviazione standard

In tabella 6.2 sono riportati i risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando la funzione obiettivo  $DS + Pmax$ .

Rispetto ai risultati ottenuti con *minimizzazione*, per PRV-1 si ottengono setting leggermente più bassi con i valori di domanda minori e leggermente maggiore con domanda massima. La

FD [-]	setting PRV-1 [m]	PRV-2 [m]	PRV-3 [m]
0.22	29.28	40.66	16.95
0.69	36.41	47.39	14.28
1.16	40.88	58.94	13.07
1.26	42.06	60.79	15.64
1.37	45.53	61.77	20.87

FD [-]	$DS[m]$	$\Delta DS$	$q_{leak} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak}$
0.22	7.48	-37.33%	73.77	-48.97%
0.69	8.24	-26.94%	76.75	-40.68%
1.16	9.44	-13.31%	80.39	-29.87%
1.26	9.46	-12.92%	81.30	-27.50%
1.37	9.28	-14.17%	82.72	-23.74%

Tabella 6.2: Risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando  $DS + Pmax$

differenza per gli altri valori di domanda è abbastanza elevata, specialmente per  $FD=1.26$ . Per PRV-2 i setting ottenuti hanno variazione, rispetto ai risultati ottenuti con *minimizzazione*, opposti a quelli di PRV-1.

La diminuzione di deviazione standard media sulle 24 ore che si ottiene è del 20.55%, mentre in termini di perdite è del 34.34%.

## 6.4.2 Confronto risultati

### Setting

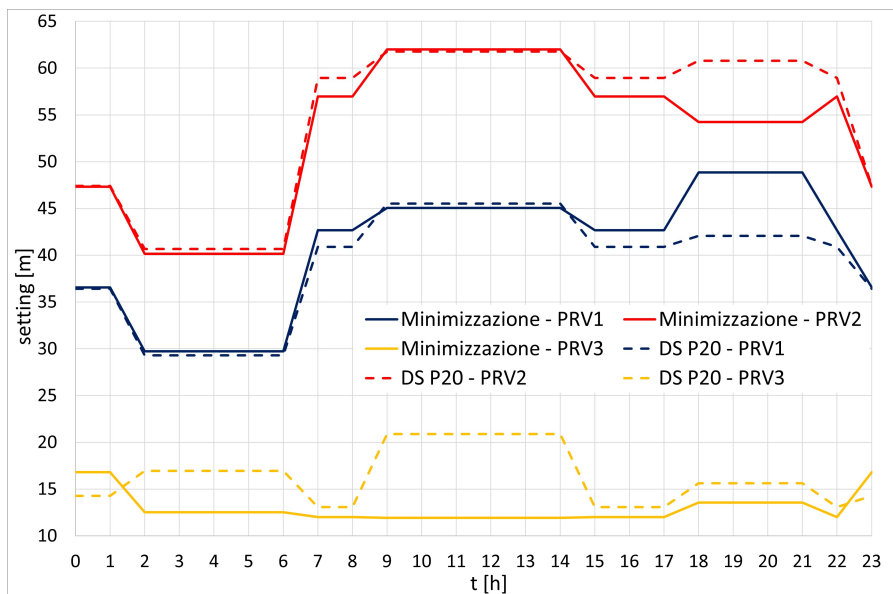


Figura 6.8: Andamento del setting delle valvole durante le 24 ore

I setting ottenuti con  $DS + Pmax$  sembrano più corretti in quanto il loro andamento nel tempo segue quello della domanda, adattando il lavoro delle valvole alla richiesta della rete. Nonostante le differenze tra i setting ottenuti con le due funzioni obiettivo, i risultati globali in termini di perdite e di deviazione standard sono pressoché uguali. Ciò è spiegabile dal fatto che quando il setting di PRV-1 risulta maggiore per una soluzione rispetto all'altra, il setting

di PRV-2 risulta minore. Le due valvole si compensano producendo lo stesso effetto sulla rete nelle due configurazioni.

Nel caso di PRV-3 il setting ottenuto con  $DS + Pmax$  segue la domanda, mentre quello ottenuto con *minimizzazione* è abbastanza costante con poche variazioni durante le 24 ore. Dato che PRV-3 regola la pressione di pochi nodi, il diverso effetto delle due configurazioni non è evidente sui risultati globali.

## Potenza

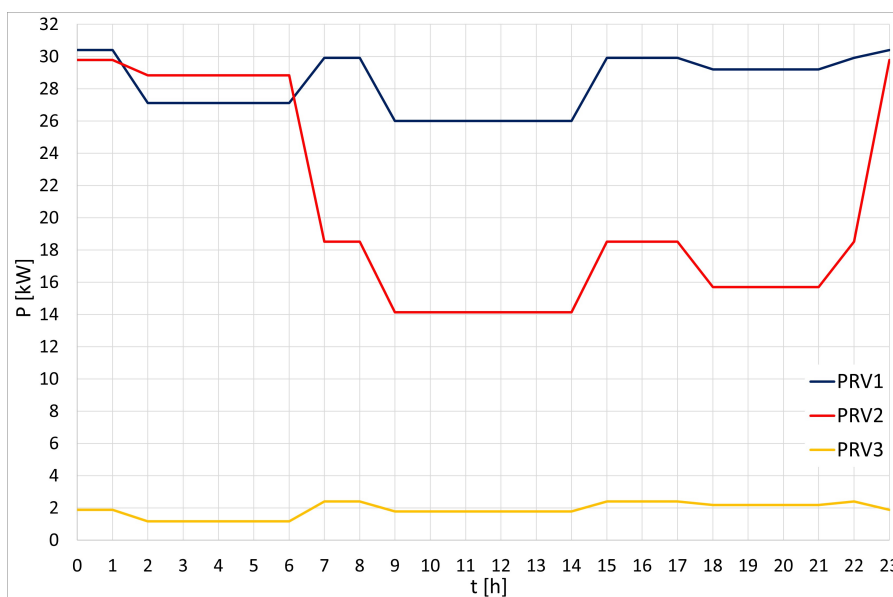


Figura 6.9: Andamento della potenza disponibile per le valvole durante le 24 ore

In figura 6.9 sono rappresentati gli andamenti delle potenze disponibili per le tre valvole ottenuti con la funzione obiettivo  $DS + Pmax$ .

Tutte e tre le valvole possono produrre molto più energia di quella necessaria a gestire le valvole (20 W). L'energia in eccesso può essere immessa in rete; per questa ragione per PRV-1 e PRV-2 è possibile dimensionare un dispositivo per il recupero di energia come un PAT o una microturbina, mentre per PRV-3 GreenValve può rappresentare una soluzione efficace.

## Perdita

Gli andamenti delle perdite seguono l'andamento della domanda durante le 24 ore. La soluzione ottenuta con *minimizzazione* risulta migliore di quella ottenuta con  $DS + Pmax$ , tranne che per tre ore tra le 23 e l'una. In termini di media giornaliera *minimizzazione* restituisce una soluzione minimamente migliore di  $DS + Pmax$  (0.23%).

Analizzando le perdite della sola regione R3, si osserva che esse diminuiscono del 83.84% con *minimizzazione* e del 79.29% con  $DS + Pmax$ . La differenza tra le due soluzioni (4.19%) è maggiore di quella che esiste per l'intera rete. Infatti i setting per PRV-3 ottenuti con le due soluzioni differiscono maggiormente e questo spiega la differenza nella diminuzione delle perdite. Essendo l'area R3 molto piccola il suo comportamento non influenza i risultati calcolati sull'intera rete che quindi risultano simili per le due soluzioni.

Essendo l'area Z4 fornita tramite il sistema di pompaggio, le pressioni di quei nodi non sono influenzate dalle valvole e le perdite presenti non subiscono variazioni ottimizzando i setting.

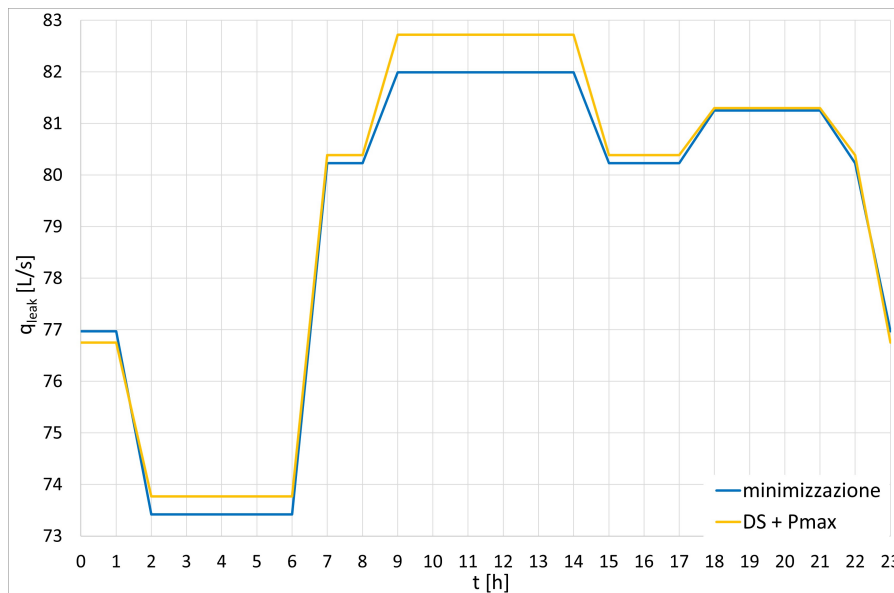


Figura 6.10: Andamento della perdita di rete durante le 24 ore

## Pressioni

In figura 6.11 sono rappresentate le distribuzioni delle pressioni per domanda minima e per domanda massima ottenuti con *minimizzazione* e *DS + Pmax*. A parità di domanda, le due soluzioni differiscono di poco. È però interessante confrontare i risultati con le pressioni che si hanno in rete quando le valvole sono completamente aperte e non lavorano (fig.6.7).

Per domanda minima inizialmente la maggior parte dei nodi della rete ha pressioni maggiori di 60 m, mentre quando le valvole lavorano con i setting ottimizzati la pressione della maggior parte dei nodi è minore di 40 metri.

Per domanda massima inizialmente la maggior parte dei nodi della rete ha pressioni maggiori di 45 m, mentre quando le valvole lavorano con i setting ottimizzati la pressione della maggior parte dei nodi è minore di 40 metri.

Confrontando la distribuzione delle pressioni a parità di soluzione, si vede che per domanda minima le pressioni sono più uniformi che per domanda massima. Infatti per domanda minima le perdite distribuite risultano minori, essendo minori le portate che passano nei tubi e i carichi ai nodi risultano più costanti nello spazio. Per domanda massima le pressioni sono maggiori nei nodi vicino alle sorgenti e diminuiscono allontanandosi da esse; i setting delle valvole PRV-1 e PRV-2 sono maggiori per domanda massima che per domanda minima per garantire il servizio a tutti gli utenti.

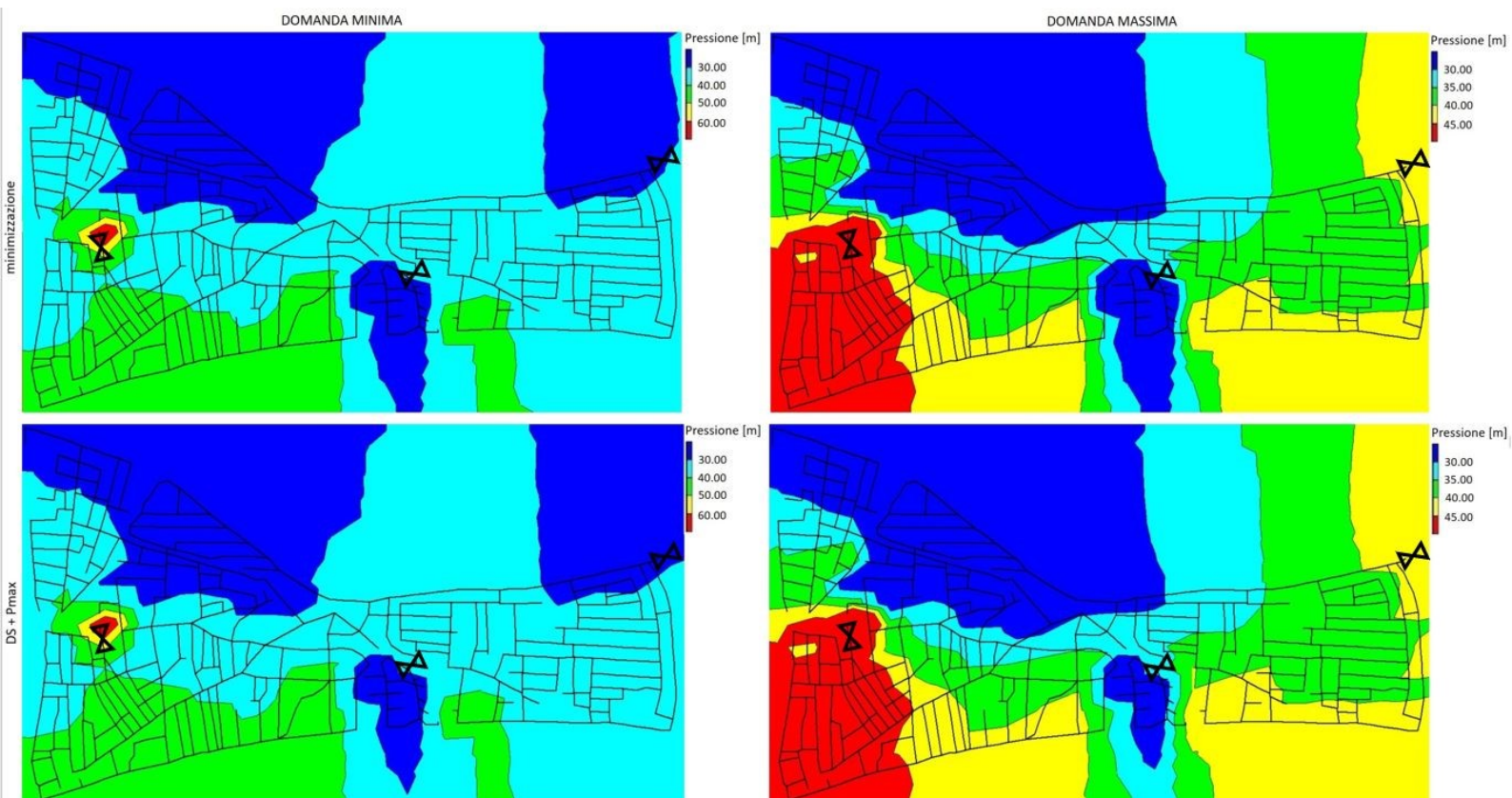


Figura 6.11: Distribuzione delle pressioni con valvole settate secondo  $DS + P_{max}$ , per domanda minima e domanda massima

## 6.5 Configurazione perdite LEAK2

La configurazione LEAK2 presenta 248 perdite. La perdita media giornaliera dell'intera rete è di 122.4 L/s (10577 m<sup>3</sup>), le singole perdite hanno quindi una portata media di 0.446 L/s. In figura 6.12 è riportato l'andamento della perdita complessiva durante le 24 ore.

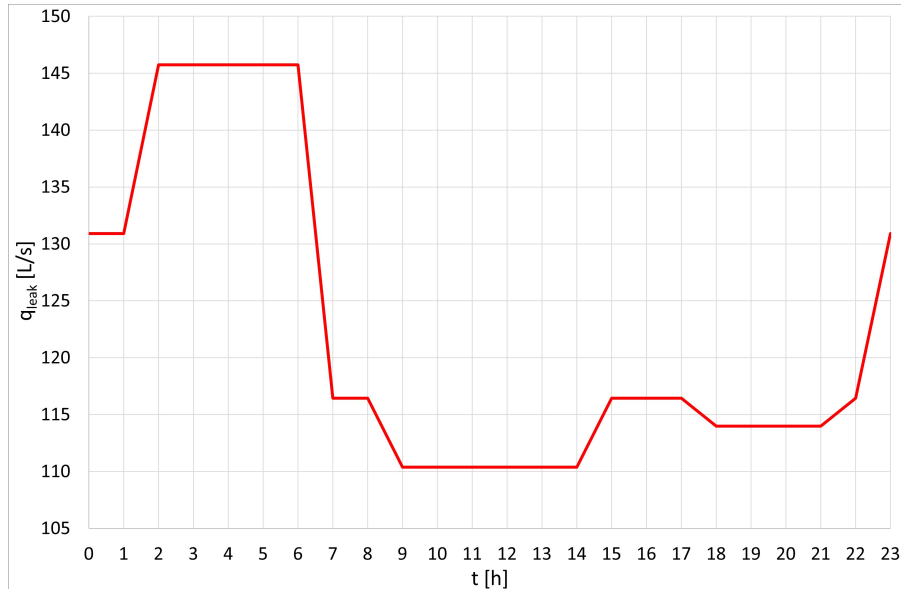


Figura 6.12: Andamento della perdita di rete con valvole aperte durante le 24 ore

La pressione media iniziale è di 48.88 metri con una deviazione nel tempo di 4.52 metri. La deviazione nello spazio (DS) ha un valore medio iniziale di 11.02 metri.

### 6.5.1 Risultati

#### Minimizzazione perdite

FD [-]	setting PRV-1 [m]	PRV-2 [m]	PRV-3 [m]
0.22	28.87	40.26	12.29
0.69	36.13	46.75	12.30
1.16	41.21	57.46	13.60
1.26	44.35	57.13	12.01
1.37	47.02	58.86	14.17

FD [-]	DS[m]	$\Delta DS$	q <sub>leak</sub> [ $\frac{L}{s}$ ]	$\Delta q_{leak}$
0.22	7.82	-34.09%	72.76	-50.07%
0.69	8.33	-25.37%	76.21	-41.78%
1.16	9.25	-14.00%	80.06	-31.24%
1.26	9.41	-12.38%	80.69	-29.20%
1.37	9.46	-11.44%	82.02	-25.70%

Tabella 6.3: Risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando *minimizzazione*

In tabella 6.3 sono riportati i risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando la funzione obiettivo *minimizzazione*.

Il setting di PRV-2 risulta maggiore di quello di PRV-1 come per LEAK1.

La diminuzione di deviazione standard media sulle 24 ore che si ottiene è del 19.07% con miglioramenti percentuali che peggiorano all'aumentare della domanda. Il miglioramento medio sulle 24 ore in termini di perdita è del 35.75%.

### Minimizzazione deviazione standard

FD [-]	setting PRV-1 [m]	PRV-2 [m]	PRV-3 [m]
0.22	29.07	40.10	14.08
0.69	33.30	49.80	15.29
1.16	40.18	58.79	17.28
1.26	44.35	57.13	12.01
1.37	45.58	60.45	17.83

FD [-]	$DS[m]$	$\Delta DS$	$q_{leak} [\frac{L}{s}]$	$\Delta q_{leak}$
0.22	7.66	-35.46%	72.96	-49.94%
0.69	8.38	-24.93%	76.42	-41.62%
1.16	9.14	-15.07%	80.51	-30.86%
1.26	9.40	-12.38%	80.69	-29.20%
1.37	9.31	-12.80%	82.35	-25.40%

Tabella 6.4: Risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando  $DS + Pmax$

In tabella 6.2 sono riportati i risultati ottenuti ottimizzando i setting delle tre valvole utilizzando la funzione obiettivo  $DS + Pmax$ .

Rispetto ai risultati ottenuti con *minimizzazione*, per PRV-1 si ottengono setting leggermente più bassi tranne che per domanda minima. Per FD=1.26 si ottengono esattamente gli stessi risultati. Per PRV-2 i setting ottenuti hanno variazione rispetto ai risultati ottenuti con *minimizzazione* opposti a quelli di PRV-1.

La diminuzione di deviazione standard media sulle 24 ore che si ottiene è del 19.91%, mentre in termini di perdite è del 35.54%.

## 6.5.2 Confronto risultati

### Setting

Anche per LEAK2 i setting ottenuti con  $DS + Pmax$  seguono maggiormente la domanda di quelli ottenuti con *minimizzazione*.

La differenza tra le due soluzioni è minore che per LEAK1 ma anche in questo caso quando il setting di PRV-1 risulta maggiore per una soluzione rispetto all'altra, il setting di PRV-2 risulta minore. Le due valvole si compensano producendo lo stesso effetto sulla rete nelle due configurazioni.



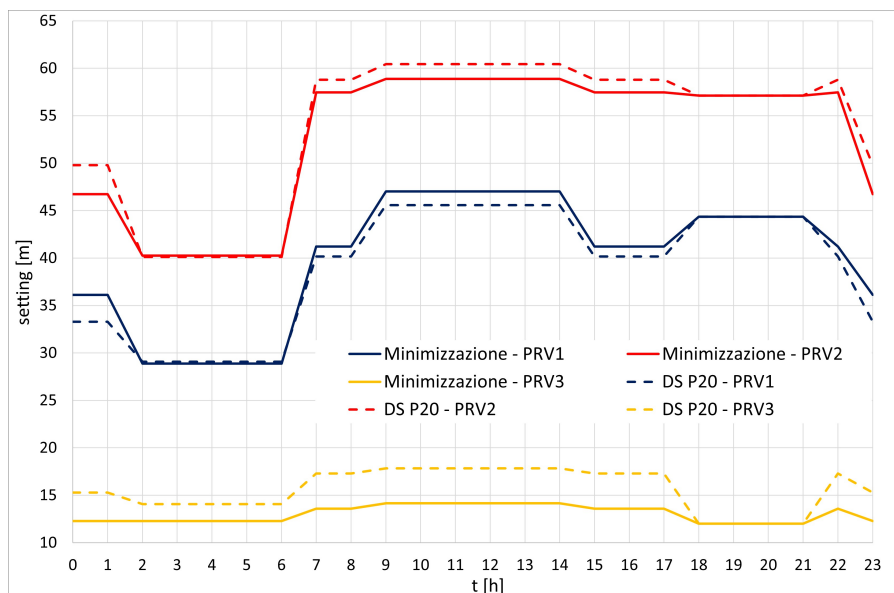


Figura 6.13: Andamento del setting delle valvole durante le 24 ore

## Potenza

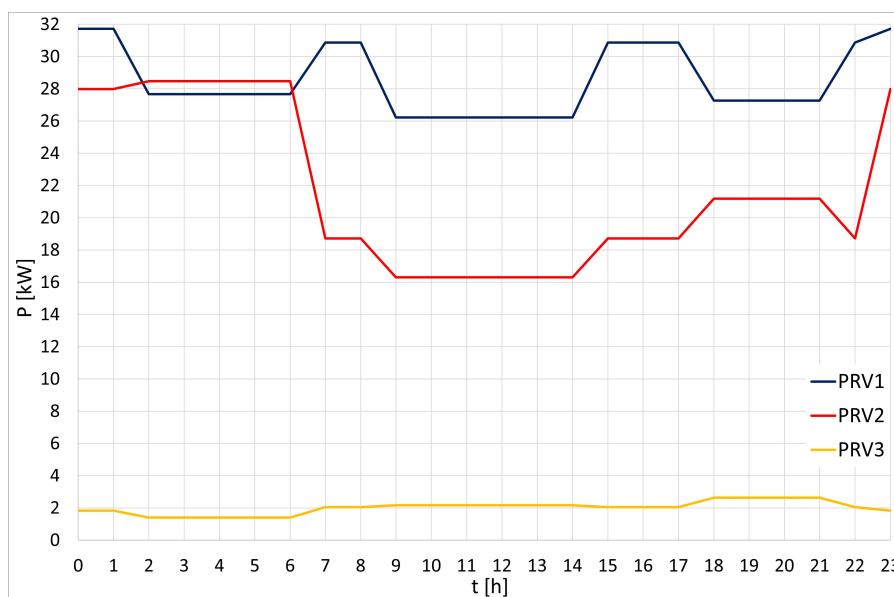


Figura 6.14: Andamento della potenza disponibile per le valvole durante le 24 ore

In figura 6.9 sono rappresentati gli andamenti delle potenze disponibili per le tre valvole ottenuti con la funzione obiettivo  $DS + P_{max}$ .

Tutte e tre le valvole possono produrre molto più energia di quella necessaria a gestire la valvole (20 W). L'energia in eccesso può essere immessa in rete dimensionando un dispositivo per il recupero di energia come un PAT o una microturbina per PRV-1 e PRV-2 e sostituendo PRV-3 con una GreenValve.

## Perdita

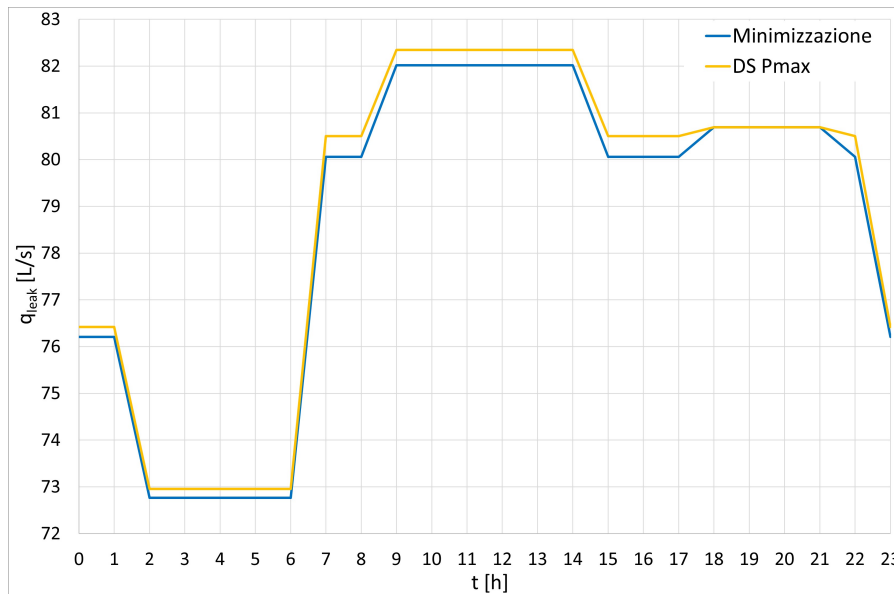


Figura 6.15: Andamento della perdita di rete durante le 24 ore

Gli andamenti delle perdite seguono l'andamento della domanda durante le 24 ore con risultati migliori per *minimizzazione* rispetto a  $DS + Pmax$ . In termini di media giornaliera *minimizzazione* restituisce una soluzione migliore di  $DS + Pmax$  del 0.21%. La differenza dei risultati ottenuti con le due funzioni obiettivo è minore del 0.02% rispetto a quella ottenuta per LEAK1.

## 6.6 Conclusioni

L'obiettivo posto all'inizio di questo capitolo era la verifica dei risultati ottenuti nel capitolo 5. Si voleva quindi valutare se la funzione obiettivo  $DS + Pmax$  potesse dare gli stessi risultati in termini di diminuzione di perdita della funzione obiettivo *minimizzazione* anche su una rete complessa.

Le funzioni obiettivo sono state applicate all'ottimizzazione dei setting di tre valvole già presenti in rete; alla rete sono state applicate due diverse configurazioni di perdite.

Nelle sottosezioni 6.4.1 e 6.5.1 sono riportati i risultati per le due configurazioni di perdite. La funzione obiettivo *minimizzazione* dà risultati che diminuiscono le perdite del 0.23% in più di  $DS + Pmax$  per LEAK1 e del 0.21% per LEAK2. Considerando il vantaggio pratico che ha  $DS + Pmax$  rispetto a *minimizzazione*, ossia la non necessità di conoscere la localizzazione e le caratteristiche delle perdite ma solo la distribuzione delle pressioni, questa differenza percentuale di efficacia è più che accettabile.

Come riportati in sezione 6.1 i nodi della rete possono essere raggruppati in quattro aree in base a delle caratteristiche che li accomunano.

Le aree Z1 e Z2 sono distinte in quanto i nodi nella prima sono forniti dalla sorgente R1 mentre quelli della seconda dalla sorgente R2; non esistono però valvole che le separino. Le aree di influenza delle due sorgenti sono definite solo dai loro carichi idraulici. Facendo parte di un'unica zona piezometrica i nodi delle due aree hanno carichi pressochè uguali anche se caratterizzati da

quote diverse, ciò implica che le pressioni di un'area sono maggiori di quelle dell'altra. Dovendo mantenere lo stesso carico in tutta la zona il setting della valvola PRV-2 risulta maggiore del setting di PRV-1 ma questo implica che le perdite in Z2 risultano meno regolate di quelle in Z1. Una soluzione potrebbe essere quella di zonizzare le due aree rendendole indipendenti, in questo modo i carichi che le due valvole dovrebbero gestire sarebbero indipendenti e le perdite potrebbero essere ottimizzate più efficacemente.



# Capitolo 7

## Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo lo sviluppo di una metodologia per il posizionamento di valvole di regolazione in una rete di distribuzione con obiettivo la massimizzazione dell'uniformità delle pressioni. L'utilizzo delle funzioni obiettivo proposte permette di aumentare l'uniformità delle pressioni migliorando la qualità del servizio agli utenti e riducendo le perdite idriche.

Le perdite idriche rappresentano un problema che gli enti gestori devono affrontare con sempre maggiore urgenza a causa di problemi di scarsità idrica legati alla siccità e all'aumento della popolazione. Dato che la localizzazione e riparazione delle perdite è un lavoro che richiede un certo periodo di tempo per limitare il volume perso nel breve-medio periodo si possono utilizzare valvole già presenti in rete o installarne di nuove per regolare più efficientemente le pressioni.

Per velocizzare la ricerca della soluzione di un problema di ottimizzazione si possono utilizzare gli algoritmi euristici che calcolano con una certa precisione la soluzione del problema. In questo lavoro l'ottimizzazione della rete è stata eseguita utilizzando un metodo basato sull'algoritmo Particle Swarm Optimization creato per contrastare i limiti che caratterizzano un algoritmo euristico.

La prima fase del lavoro consiste nell'implementazione del metodo di calcolo e nella verifica della metodologia scelta. Per fare ciò il metodo è stato applicato alla minimizzazione delle perdite in una rete benchmark molto utilizzata in letteratura e i risultati sono poi stati confrontati con quelli ottenuti nei precedenti studi con ottimi risultati. Infatti sia per l'installazione di una che di due valvole la soluzione differisce da quella di letteratura in termini di riduzione di perdite al massimo del 0.69%. Una volta verificato il metodo applicando una funzione obiettivo nota dagli studi precedenti, esso è stato applicato alla massimizzazione dell'uniformità delle pressioni di rete andando a definire una nuova funzione obiettivo.

La massimizzazione dell'uniformità delle pressioni ha richiesto lo sviluppo di quattro funzioni obiettivo: massimizzazione del coefficiente di uniformità; massimizzazione del coefficiente di uniformità, penalizzando i nodi con pressioni sopra un certo valore; minimizzazione della deviazione standard delle pressioni; minimizzazione della deviazione standard delle pressioni, penalizzando i nodi con pressioni sopra un certo valore.

Applicando le funzioni obiettivo all'ottimizzazione della rete benchmark, un primo risultato che è stato osservato è l'inadeguatezza del coefficiente di uniformità così come definito in [44] come parametro da massimizzare, in quanto esso è direttamente proporzionale alla pressione media di rete. È quindi stata proposta una modifica che potrebbe essere utilizzata in ambito di gestione delle pressioni in quanto elimina la dipendenza dalla pressione media.

In secondo luogo è stato osservato che il risultato in termini di diminuzione di perdita dato dalla funzione di minimizzazione delle perdite è uguale a quello ottenuto con la funzione obiettivo di

minimizzazione della deviazione standard con penalità sulle pressioni. Dato che l'utilizzo della prima necessita di conoscere l'entità delle perdite e la loro localizzazione, mentre per poter utilizzare la seconda è sufficiente conoscere la distribuzione delle pressioni in rete, l'uguaglianza dei risultati ottenuti nei due casi comporta un grosso vantaggio dal punto di vista pratico.

Le due funzioni obiettivo sono quindi state utilizzate su una rete di dimensioni maggiori considerando due configurazioni di perdite distribuite casualmente tra i nodi della rete. L'obiettivo era l'ottimizzazione dei setting di tre valvole già installate. I risultati sono stati confrontati in termini di minimizzazione di perdite e in entrambi i casi mostrano una differenza minore del 1% tra le due funzioni obiettivo. Si può quindi ipotizzare che l'efficacia anche su reti di dimensioni maggiori sia confrontabile nei due casi.

Le funzioni obiettivo utilizzate sono caratterizzate dalla stessa struttura: un parametro da minimizzare o massimizzare a cui vengono aggiunti o sottratti dei coefficienti di penalità caratterizzati da diversi pesi. In tabella 7.1 sono riportati i valori dei parametri di penalità.

	Rete benchmark		L-Town
	minimizzazione	DS, DS+Pmax, UC, UC+Pmax	minimizzazione, DS+Pmax
$PF_1$	$10^5$	1000	$10^{10}$
$PF_2$	/	10	1
$PF_3$	/	1	1
$PF_4$	/	1000	$10^{10}$

Tabella 7.1: Parametri di penalità utilizzati nelle diverse funzioni obiettivo

La scelta di utilizzare funzioni obiettivo basate su DS deriva dal voler uniformare le pressioni di rete per garantire un miglior servizio agli utenti. Dato che i risultati ottenuti con  $UC$  e  $UC + Pmax$  si sono rivelati non ottimali è stato scelto di minimizzare direttamente la deviazione standard.

In termini di diminuzione di perdita il risultato ottenuto con *minimizzazione* è ottenibile anche andando a minimizzare direttamente le pressioni. Come per  $DS + Pmax$  anche in questo caso non è necessario conoscere la localizzazione e le caratteristiche delle perdite stesse. Tuttavia la minimizzazione delle pressioni non ne garantisce l'uniformità spaziale.

Nonostante il PSO presenti dei limiti comuni a tutti gli algoritmi euristici, come l'impossibilità di verificare con assoluta certezza la globalità della soluzione ottenuta, il metodo proposto, basandosi anche sulla ripetizione delle simulazioni, garantisce una buona affidabilità della soluzione ottenuta. Inoltre ripetere la ricerca del setting ottimale una volta fissata la posizione della valvole permette un affinamento e la verifica della soluzione finale senza aumentare eccessivamente il costo computazionale.

Il metodo presentato può essere utilizzato dai gestori di servizi idrici per gestire le valvole già presenti in rete o per valutare su quali condotte può convenire installare delle nuove valvole. Il metodo, attraverso la definizione della funzione obiettivo, permette anche la valutazione della potenziale installazione di un dispositivo GreenValve al posto di valvole classiche permettendo l'installazione anche in luoghi difficilmente raggiungibili dalla rete elettrica. Infatti dato che la GreenValve produce sufficiente energia per autoregolarsi non è necessario il collegamento alla rete elettrica e la regolazione può essere controllata tramite sistemi di gestione a distanza.

# Bibliografia

- [1] Malavasi S. Valvola di regolazione a recupero di energia.
- [2] Temitayo Fagbola M. An optimized feature selection technique for email classification. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC and TECHNOLOGY RESEARCH*, 3, 2014.
- [3] Jowitt P.W. and Xu C. Optimal valve control in water-distribution networks, 1990.
- [4] Araujo Luiz S., Ramos Helena, and Coelho Sérgio Teixeira. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, pages 133–149, 4 2006.
- [5] Stelios G Vrachimis, Demetrios G Eliades, Riccardo Taormina, Avi Ostfeld, Zoran Kapelan, Shuming Liu, Marios S Kyriakou, Pavlos Pavlou, Mengning Qiu, and Marios Polycarpou. Dataset of battledim: Battle of the leakage detection and isolation methods, 9 2020.
- [6] Nicolini M. and Zovatto L. Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135:178–187, 2009.
- [7] United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development, 2022.
- [8] Istituto Nazionale di Statistica. Censimento delle acque per uso civile 2020, 2022.
- [9] Boyd S.P. and Vandenberghe L. *Convex optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [10] Fecarotta O. and McNabola A. Optimal location of pump as turbines (pats) in water distribution networks to recover energy and reduce leakage. *Water Resources Management*, 31:5043–5059, 12 2017.
- [11] Programmazione lineare, in enciclopedia della matematica, istituto dell'enciclopedia italiana, 2013.
- [12] Goldberg David E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [13] Algoritmo genetico, in lessico del xxi secolo, istituto dell'enciclopedia italiana, 2012.
- [14] Kennedy J. and Eberhart R.C. Particle swarm optimization. volume 4, pages 1942–1948. IEEE, 1995.
- [15] Ali M.E. Knowledge-based optimization model for control valve locations in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141, 1 2015.

- [16] Obradovic D. and Lonsdale P.B. *Public water supply models, data and operational management*. 1998.
- [17] Lambert A. What do we know about pressure:leakage relationships in distribution systems? IWA.
- [18] Deb K., Pratap A., Agarwal S., and Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii, 2002.
- [19] Reis L.F.R., Porto R.M., and Chaudhry F.H. Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123:317–326, 11 1997.
- [20] Covelli C., Cozzolino L., Cimorelli L., Della Morte R., and Pianese D. Optimal location and setting of prvs in wds for leakage minimization. *Water Resources Management*, 30:1803–1817, 3 2016.
- [21] Isaacs L.T. and Mills K.G. Linear theory methods for pipe network analysis. *ASCE J Hydraul Div*, 106:1191–1201, 1980.
- [22] De Paola F., Galdiero E., and Giugni M. Location and setting of valves in water distribution networks using a harmony search approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143, 6 2017.
- [23] Creaco E. and Pezzinga G. Embedding linear programming in multi objective genetic algorithms for reducing the size of the search space with application to leakage minimization in water distribution networks. *Environmental Modelling and Software*, 69:308–318, 7 2015.
- [24] Cimorelli L., D’Aniello A., Cozzolino L., and Pianese D. Leakage reduction in wdns through optimal setting of pats with a derivative-free optimizer. *Journal of Hydroinformatics*, 22:713–724, 7 2020.
- [25] UNESCO World Water Assessment Programme. *The United Nations world water development report 2019: leaving no one behind*. 2019.
- [26] McNabola A., Coughlan P., Corcoran L., Power C., Prysor Williams A., Harris I., Gallagher J., and Styles D. Energy recovery in the water industry using micro-hydropower: an opportunity to improve sustainability. *Water Policy*, 16:168–183, 2 2014.
- [27] Thoma D. and Kittredge C.P. Centrifugal pumps operated under abnormal conditions. *Power*, 73:881 – 884, 1931. Cited by: 28.
- [28] Ebrahimi S., Riasi A., and Kandi A. Selection optimization of variable speed pump as turbine (pat) for energy recovery and pressure management. *Energy Conversion and Management*, 227, 1 2021.
- [29] Corcoran L., McNabola A., and Coughlan P. Optimization of water distribution networks for combined hydropower energy recovery and leakage reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142, 2 2016.
- [30] Ferrarese G. and Malavasi S. Perspectives of water distribution networks with the greenvalve system. *Water (Switzerland)*, 12, 6 2020.
- [31] Malavasi S., Ferrarese G., and M.M.A. Rossi. A control valve for energy harvesting. volume 89, pages 588–594. Elsevier Ltd, 2014.



- [32] Wilson Edward O. *Sociobiology: The new synthesis*. Belknap Press, 1975.
- [33] Moore J., Chapman R., and Dozier G. Multiobjective particle swarm optimization, 2000.
- [34] Heppner F. and Grenander U. A stochastic nonlinear model for coordinate bird flocks, 1990.
- [35] Shi Y. and Eberhart R.C. Modified particle swarm optimizer. pages 69–73. IEEE, 1998.
- [36] Shi Y. and Eberhart R.C. Parameter selection in particle swarm optimization, 1998.
- [37] Eberhart R.C and Shi Y. Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization, 1998.
- [38] del Valle Y., Venayagamoorthy G.K., Mohagheghi S., Hernandez J.C., and Harley R.G. Particle swarm optimization: Basic concepts, variants and applications in power systems, 4 2008.
- [39] Yeniay Ö. Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms, 2005.
- [40] Lewis A Rossman. Epanet 2 users manual, 2000.
- [41] Gomes S.C., Vinga S., and Henriques R. Spatiotemporal correlation feature spaces to support anomaly detection in water distribution networks. *Water (Switzerland)*, 13, 9 2021.
- [42] Matlab version 9.11.0.2022996 (r2021b) update 4, 2021.
- [43] Eliades D.G., Kyriakou M., Vrachimis S., and Polycarpou M.M. Epanet-matlab toolkit: An open-source software for interfacing epanet with matlab, 2016.
- [44] Gottipati Prasad V.K.S.V. and Nanduri Umamahesh V. Equity in water supply in intermittent water distribution networks. *Water and Environment Journal*, 28:509–515, 12 2014.
- [45] S.M. Ross. *Introduzione alla statistica*. Maggioli Editore, seconda edizione edition, 2014.
- [46] Stelios G Vrachimis, Demetrios G Eliades, Riccardo Taormina, Zoran Kapelan, Avi Ostfeld, Shuming Liu, Marios Kyriakou, Pavlos Pavlou, Mengning Qiu, and Marios M Polycarpou. Battle of the leakage detection and isolation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148:4022068, 2022.



# Appendice A

## Codice Matlab

In questa sezione si riportano gli script di Matlab utilizzati nel lavoro di tesi.  
Si riporta lo script completo utilizzato per la funzione obiettivo 'minimizzazione'.

```
% Script per 'minimizzazione' in cui si possono runnare
    direttamente piu
% valori di domanda. Alla fine di ogni for (pat) salva i
    risultati finali
% delle run in una struttura.

domanda = [0.41 0.61 0.81 0.82 0.92 1.03 1.13 1.23];

N_valves = 1;          % numero di valvole da aggiungere

for pat = 1:size(domanda,2)

% Avvio il toolkit
start_toolkit;

% Importo il file .inp con la rete iniziale
filename = ['Rete benchmark PCC P0 = ' num2str(domanda(pat)) '.
    inp'];
d0 = epanet(filename); % rete senza PRV

% Durata della simulazione
hrs = 0;              % la simulazione dura hrs+1

% Coordinate dei nodi
Xcoord = cell2mat(d0.NodeCoordinates(1));
Ycoord = cell2mat(d0.NodeCoordinates(2));

%% SIMULAZIONE 0

% Conteggio numero valvole gia presenti
N_valves_0 = d0.LinkValveCount;

% Nodi che hanno effettivamente domanda
```

```

demandingnodes = d0.NodeIndex(strcmp(d0.NodeDemandPatternNameID
    {1,1}, 'P0'));
% Nodi con perdita
leakingnodes = d0.NodeIndex(not(d0.NodeEmitterCoeff==0));

% Modifica dell'esponente di perdita
d0.OptionsEmitterExponent = 1.18;

% Impostazioni temporali
d0.setTimeSimulationDuration(hrs*3600);
etstep = 3600;          % sec = 1 h
d0.setTimeReportingStep(etstep);
d0.setTimeHydraulicStep(etstep);
d0.setTimeReportingStep(etstep);
tstep = 1;

% Matrici in cui salvare i risultati
Pressure_0 = [];
Demand_0 = [];
Head_0 = [];
Flow_0 = [];

% Simulazione Idraulica
d0.openHydraulicAnalysis;    % opens the hydraulics analysis
    system
d0.initializeHydraulicAnalysis;    % initializes storage tank
    levels,
% link status and settings, and the simulation clock time prior
    to
% running a hydraulic analysis

while (tstep>0)
d0.runHydraulicAnalysis;
Pressure_0 = [Pressure_0; d0.getNodePressure];    % a ogni
    iterazione salva una
% nuova colonna contenente la pressione
% alla fine si avra una matrice con i nodi sulle colonne e il
    tempo
% sulle righe
Demand_0 = [Demand_0; d0.getNodeActualDemand];
Head_0 = [Head_0; d0.getNodeHydraulicHead];
Flow_0 = [Flow_0; d0.getLinkFlows];
tstep=d0.nextHydraulicAnalysisStep;
end
d0.closeHydraulicAnalysis;
d0.unload

% Perdita iniziale
q_leak_0 = d0.NodeEmitterCoeff(:,leakingnodes).*Pressure_0(:,
    leakingnodes).^d0.OptionsEmitterExponent;    % L/s

```

```

W_leak_0 = q_leak_0*3600/1000;          % m3

% Coefficiente di uniformita
AP_0 = mean(mean(Pressure_0(:,demandingnodes)));
ADEV_0 = mean(mean(abs(Pressure_0(:,demandingnodes)-AP_0)));
UC_0 = 1-ADEV_0/AP_0;

% Deviazione standard
DS_0 = std(Pressure_0(:,demandingnodes));

%% RIDUZIONE DELLO SPAZIO DI RICERCA
% I tubi su cui possono essere messe le valvole vanno studiati da
  rete
% a rete

% 0: non considera, 1: considera
Allpipes = 0;
Reservoirs = 1;      % escludo i tubi che si trovano tra due
  sorgenti
SIpipes = 0;      % considero i tubi con SI maggiori della mediana
Valves = 0;      % sono gia presenti delle valvole, quindi quel
  tubo va escluso

% % Tutti i tubi
if Allpipes
Pipes_sel = d.LinkIndex;
end

% Escludo tubi tra serbatoi
if Reservoirs
for l = 1:d.LinkCount
Node1Type = d.NodeType(d.NodesConnectingLinksIndex(l,1));
Node2Type = d.NodeType(d.NodesConnectingLinksIndex(l,2));
if and(contains(Node1Type, 'RESERVOIR'), contains(Node2Type, '
  RESERVOIR'))
excludepipe = d.LinkIndex(l);
end
end
Pipes_reservoir = d.LinkIndex(not(ismember(d.LinkIndex,
  excludepipe)));
Pipes_sel = Pipes_reservoir;
end

% % Significance Index (Arulraj e Rao, 1995)
if SIpipes
Qmean = mean(Flow_0(:,1:end));
SI = Qmean.*d.LinkLength./(d.LinkRoughnessCoeff.*d.LinkDiameter);
% Selezioni i tubi che hanno un valore di SI maggiore della
  mediana di SI
Pipes_SI = d.LinkIndex(find(SI>=median(SI, 'omitnan')));

```

```

Pipes_sel = Pipes_SI;
end

if Valves
% Escludo il tubo su cui e gia installata la valvola
existingvalvesIndex = find(d.LinkTypeIndex==3); % trovo gli
    indici delle valvole (PRV:3)
existingvalvesID = d.LinkNameID(existingvalvesIndex); % ID
    delle valvole
valvoleIndex = existingvalvesIndex; % salvo nel vettore i
    tubi su cui sono
% gia presenti valvole; inizio con i link PRV e poi nel ciclo for
    aggiungo
% i tubi a monte delle valvole
for k = 1:N_valves_0
nodoinizialeID = d.NodesConnectingLinksID(existingvalvesIndex(k))
    ; % ID
nodoinizialeIndex = d.NodesConnectingLinksIndex(
    existingvalvesIndex(k)); % index
tuboamonteIndex = find(d.NodesConnectingLinksIndex(:,2)==
    nodoinizialeIndex);
% cerco il tubo che ha come nodo finale il nodo iniziale della
% valvola
tuboamonteID = d.LinkNameID(tuboamonteIndex);
valvoleIndex = [valvoleIndex tuboamonteIndex];
end

% Escludo i tubi che hanno il nodo finale in comune con la
    valvola gia
% installata
node2index = d.NodesConnectingLinksIndex(existingvalvesIndex,2);
node2ID = d.NodesConnectingLinksID(existingvalvesIndex,2);
tubonodofinaleincomuneIndex = find(d.NodesConnectingLinksIndex
    (:,2)==node2index);
tubonodofinaleincomuneID = d.LinkNameID(
    tubonodofinaleincomuneIndex);
valvoleIndex = [valvoleIndex tubonodofinaleincomuneIndex'];

valvoleID = d.LinkNameID(valvoleIndex);

Pipes_valves = setdiff(d.LinkIndex, valvoleIndex);
% Prendo i tubi di d.LinkIndex non contenuti in valvoleIndex
end

if and(Reservoirs, SIpipes)
Pipes_sel = Pipes_SI(ismember(Pipes_SI, Pipes_reservoir));
end

if and(Reservoirs, Valves)
Pipes_sel = Pipes_valves(ismember(Pipes_valves, Pipes_reservoir));
end

```

```

end

%% PSO
% Definizione parametri e costanti
p1 = 10^5;      % coeff.di penalita per la funzione PF1
pmin = 30;      % [m] pressione minima da garantire ai nodi
pmax = 40;      % [m] pressione massima setting iniziale

N_particelle = 10;      % numero di particelle (uccelli) iniziali
N_iter_max = 20;      % numero massimo di iterazioni dell '
    algoritmo

c1 = 0.1;      % accelerazione particella
c2 = 0.2;      % accelerazione globale

for run = 1:10
% Inizializzo la matrice della location(tubo)
Xloc = [];

% Si deve controllare che le vavole non vengano installate sullo
    stesso
% tubo e si escludono i tubi compresi tra due serbatoi
for i = 1:N_particelle

x_i = [];      % vettore contenente pipes per la particella i
nodes2 = [];   % vettore che contiene i node2

for k = 1:N_valves
link(k) = randi(d.LinkCount,1);
node2 = d.NodesConnectingLinksIndex(link(k),2);      % nodo finale
% del tubo su cui si vuole installare la PRV

% Controllo che il tubo non sia gia stato scelto da questa
% particella, che le valvole non vengano installate su tubi con
    nodo
% finale in comune e che il tubo appartenga ai tubi selezionabili
.
while or(or(ismember(link(k),x_i),ismember(node2,nodes2)),not(
    ismember(link(k),Pipes_sel)))
link(k) = randi(d.LinkPipeCount,1);
% disp(['pipe changed: p=' num2str(i) ' k=' num2str(k)])

node2 = d.NodesConnectingLinksIndex(link(k),2);
end

x_i = [x_i link(k)];
nodes2 = [nodes2 node2];
end
Xloc = [Xloc;x_i];      % matrice in cui su ogni riga sono
    salvati pipes

```

```

clear link set
end

% Inizializzo i valori di setting
Xset = randi([pmin,pmax],N_particelle,N_valves);

% Inizializzo il vettore della velocita
Vloc = randn(N_particelle,N_valves)*0.1;
Vset = randn(N_particelle,N_valves)*0.1;

for it = 1:N_iter_max

for i = 1:N_particelle

% Salvo in una variabile a che particella e il ciclo
particella = ['Particella' num2str(i)];

%% Simulazione idraulica per la particella i
% Importazione del file .inp originale
d = epanet(filename);

% Modifica del file .inp originale

% Aggiunta delle valvole alla fine del tubo
% Aggiunta della valvola
for k = 1: N_valves

l = Xloc(i,k);
s = Xset(i,k);
Node1 = d.NodesConnectingLinksIndex(1,1);
Node2 = d.NodesConnectingLinksIndex(1,2);
Node1ID = d.NodesConnectingLinksID(1,1);
Node2ID = d.NodesConnectingLinksID(1,2);

nodes1ID(k) = Node1ID; % salvo i nodi in un unico vettore per
% dopo

% Creo nodo fittizio
junctionID = ['NJ_' num2str(N_valves_0+k)];
coord_x = Xcoord(Node2)+10;
coord_y = Ycoord(Node2)+10;
newjunctionCoords = [coord_x coord_y];
newjunctionElevation = d.NodeElevations(Node2);
newjunctionIndex = d.addNodeJunction(junctionID,
    newjunctionCoords, newjunctionElevation);

newjunctionsID(k) = {junctionID}; % salvo i nodi in un unico
% vettore per dopo

```



```

% Aggiungo la valvola tra il nuovo nodo e il nodo 2
valveID = ['PRV_' num2str(N_valves_0+k)];
fromNode = junctionID;
toNode = cell2mat(d.NodeNameID(Node2));
valveIndex = d.addLinkValvePRV(valveID, fromNode, toNode);
% d.setLinkTypeValvePRV(link); % aggiungo la valvola PRV al ramo
    X(i,1)
d.setLinkInitialSetting(valveIndex,s); % cambio il settaggio
% della valvola con il valore X(i,2)
d.setLinkDiameter(valveIndex,80); % cambio il diametro della
    valvola
% a 80 mm perche la GreenValve testata nell'articolo e
% da 3''
end

% Salvataggio nuovo file .inp
d.saveInputFile(['.\Rete_p=' num2str(i) '.inp']);
% Carico nuova rete
d = epanet(['.\Rete_p=' num2str(i) '.inp']);

% Cambio i nodi finali dei tubi
for k = 1:N_valves
% Il nodo finale del tubo link diventa il nuovo nodo fittizio
l = Xloc(i,k);
startnode = find(contains(d.NodeNameID,nodes1ID(k)));
endnode = find(contains(d.NodeNameID,newjunctionsID(k)));
d.setLinkNodesIndex(l, startnode(1), endnode(1));
end

% Salvataggio nuovo file .inp
d.saveInputFile(['.\Rete_p=' num2str(i) '.inp']);
% Carico nuova rete
d = epanet(['.\Rete_p=' num2str(i) '.inp']);

% Modifico l'esponente di perdita
d.OptionsEmitterExponent = 1.18;

% Impostazioni per la simulazione
etstep = 3600;
d.setTimeSimulationDuration(hrs*3600);
d.setTimeReportingStep(etstep);
d.setTimeHydraulicStep(etstep);
d.setTimeReportingStep(etstep);

% Inizializzazione matrici
P = []; % pressioni ai nodi
F = []; % portata nei tubi

% Analisi idraulica
tstep = 1;

```

```

d.openHydraulicAnalysis;
d.initializeHydraulicAnalysis;
while (tstep>0)
d.runHydraulicAnalysis;
P = [P; d.getNodePressure];      % a ogni iterazione
% nuova colonna contenente la pressione
% salva una alla fine si avra una matrice con i nodi sulle
% colonne e il tempo sulle righe
F = [F; d.getLinkFlows];
tstep = d.nextHydraulicAnalysisStep;
end
d.closeHydraulicAnalysis;

% Salvo i risultati della simulazione in una struttura
risultato.(particella) = struct('Pressure',P,'Flow',F);

% Fine simulazione idraulica

%% Calcolo e salvataggio FF per la particella i

% Conto i nodi che hanno effettivamente domanda
demandingnodes = d.NodeIndex(strcmp(d.NodeDemandPatternNameID
    {1,1},'P0'));
% Conto i nodi con perdita
leakingnodes = d.NodeIndex(not(d.NodeEmitterCoeff==0));

% Calcolo Penalty function 1
PF1_nt = zeros(hrs+1,size(demandingnodes,2));
% escludo i serbatoi e i nodi creati per aggiungere la
% valvola

for t = 1:hrs+1
for n = 1:size(demandingnodes,2)    % considero solo i nodi con
    domanda
PF1_nt(t,n) = max(0,pmin-P(t,n));
end
end
PF1(i) = p1*sum(sum(PF1_nt));

% Perdita
q_leak = d.NodeEmitterCoeff(:,leakingnodes).*P(:,leakingnodes).^d
    .OptionsEmitterExponent;    % L/s
W_leak = q_leak*3600/1000;      % m3

% Funzione obiettivo (da minimizzare)
%
PF1(i) = 0;
FF(i) = sum(sum(W_leak))+PF1(i);

% Fine calcolo FF
% Chiusura particella i

```

```

d.unload
end          % Fine delle simulazioni idrauliche, si ha i valori
            di FF
% per tutte le particelle dell'iterazione it

%% Aggiornamento posizione e velocita della particella

% pbest: migliore posizione della particella i
% gbest: migliore posizione tra tutte le particelle
% Trovo il valore massimo di FF (ottimizzazione) e il suo indice
[FF_min,M] = min(FF);    % M: indice della particella con FF_min

% LOCATION
if it == 1
% pbest
pbest_loc = Xloc;
FF_pbest_loc = FF;

% gbest
gbest_loc = Xloc(M,:);
FF_gbest_loc = FF_min;
else
% pbest
for i = 1:N_particelle
if FF(i) <= FF_pbest_loc(i)
pbest_loc(i,:) = Xloc(i,:);
FF_pbest_loc(i) = FF(i);
end
end

% gbest
if FF_min <= FF_gbest_loc
gbest_loc = Xloc(M,:);
FF_gbest_loc = FF_min;
end
end

% parametri dell'algorithmo
r1 = rand(1);
r2 = rand(1);

% inerzia
if and(it>=1,it<=7)
w = 1;
elseif and(it>7,it<=14)
w = 0.8;
else
w = 0.6;
end

```

```

% Velocita
Vloc = w*Vloc + c1*r1.*(pbest_loc-Xloc) + c2*r2.*(gbest_loc-Xloc)
;

% Posizione
Xloc = round(Xloc+Vloc);          % tubo

% SETTING
if it == 1
% pbest
pbest_set = Xset;
FF_pbest_set = FF;

% gbest
gbest_set = Xset(M,:);
FF_gbest_set = FF_min;
else
% pbest
for i = 1:N_particelle
if FF(i) <= FF_pbest_set(i)
pbest_set(i,:) = Xset(i,:);
FF_pbest_set(i) = FF(i);
end
end

% gbest
if FF_min <= FF_gbest_set
gbest_set = Xset(M,:);
FF_gbest_set = FF_min;
end
end

% parametri dell'algorithmo
r1 = rand(1);
r2 = rand(1);

% Velocita
Vset = w*Vset + c1*r1.*(pbest_set-Xset) + c2*r2.*(gbest_set-Xset)
;

% Posizione
Xset = Xset+Vset;                % setting

% I tubi devono appartenere all'elenco di quelli selezionabili
for i = 1:N_particelle
for k = 1:N_valves
link = Xloc(i,k);
while not(ismember(link,Pipes_sel))
[val,m] = min(abs(Pipes_sel-Xloc(i,k)));

```

```

% val = differenza minima
% m = indice a cui si trova il minimo
% (in Pipes_sel-X(i,1)) quindi in Pipe_sel
Xloc(i,k) = Pipes_sel(m);
%           Xloc(i,k) = randi(d.LinkCount,1);
link = Xloc(i,k);
end
end
end

% I tubi su cui installare le valvole non devono essere uguali,
% non
% devono avere il nodo finale in comune e devono appartenere alla
% lista
% di tubi selezionabili
for i = 1:N_particelle
nodes2 = []; % vettore che contiene i node2
for k = 1:N_valves

link = Xloc(i,k);
set = Xset(i,k);
node2 = d.NodesConnectingLinksIndex(link,2);

% Controllo che le PRV non siano installate sullo stesso tubo
condizione1 = or(ismember(link,Xloc(i,1:k-1)),ismember(link,Xloc(
i,k+1:end)));

% Controllo che il tubo su cui viene installata la PRV appartenga
% all'elenco dei tubi permessi e che le PRV non abbiano il nodo
% finale in comune
condizione2 = or(not(ismember(link,Pipes_sel)),ismember(node2,
nodes2));

while or(condizione1,condizione2)
% In caso un tubo andasse cambiato perche non rispetta le
% condizioni, si sceglie a caso il tubo prima o dopo
% (indice)
r = [-2 -1 1 2];
r = randsample(r, 1);
Xloc(i,k) = Xloc(i,k)+r;
%           Xloc(i,1) = randi(d.LinkCount,1);

if Xloc(i,k)<1
Xloc(i,k) = 1;
elseif Xloc(i,k)>37
Xloc(i,k) = 37;
end

% Salvo i dati del nuovo tubo
link = Xloc(i,k);

```

```
node2 = d.NodesConnectingLinksIndex(link,2);

% Ricalcolo le condizioni
condizione1 = or(ismember(link,Xloc(i,1:k-1)),ismember(link,Xloc(i,k+1:end)));
condizione2 = or(not(ismember(link,Pipes_sel)),ismember(node2,nodes2));
end
nodes2 = [nodes2 node2];

% Setting minimo delle valvole
condizione3 = set<pmin;
if condizione3
Xset(i,k) = pmin;
end
end
end

end

Location(run,1:N_valves) = gbest_loc;
Setting (run,1:N_valves) = gbest_set;
FFr(run,1) = FF_gbest_loc;

end

risultati.(pattern) = struct('Location',Location,'Setting',
    Setting,'FF',FFr);
end
```

Volendo utilizzare lo script per le altre funzioni obiettivo è necessario modificare il valore dei parametri di penalità, il calcolo della funzione obiettivo e il procedimento iterativo del PSO quando si considera un problema di massimizzazione.

```

%% DEFINIZIONE DEI PARAMETRI
p1 = 1000;      % coeff.di penalita per la funzione PF1
pmin = 30;     % [m] pressione minima da garantire ai nodi
pmax = 40;     % [m] pressione iniziale massima

p2 = 10;      % coeff.di penalita per la funzione PF2
Wmin = 150;   % [W] potenza minima della corrente

p3 = 10;      % coeff.di penalita per la funzione PF3
pmin_PF3 = 30; % m, pressione sotto al quale non si attiva
              PF3 (pnt = 0)
pmax_PF3 = 35; % m, pressione oltre il quale pnt e uguale a
              1

p4 = 1000;    % coeff.di penalita per la funzione PF4

%% CALCOLO E SALVATAGGIO FF PER LA PARTICELLA i

% Conto i nodi che hanno effettivamente domanda
DemandCount = sum(strcmp(d.NodeDemandPatternNameID{1,1}, 'P0'));

% Calcolo Penalty function 1: nodi con pressione > pmin
PF1_nt = zeros(hrs+1, DemandCount);

for t = 1:hrs+1
for n = 1: DemandCount % considero solo i nodi con domanda
PF1_nt(t,n) = max(0, pmin - P(t,n));
end
end
PF1(i) = p1 * sum(sum(PF1_nt));

% Calcolo penalty function 2: potenza della valvola > Wmin
PF2_k = zeros(1, d.LinkValveCount);
W_kt = zeros(hrs+1, d.LinkValveCount); % W[W] = Q[m3/s]*
    deltaP[Pa]

% DeltaP
for k = 1:d.LinkValveCount
for t = 1:hrs+1
Q = F(t, d.LinkValveIndex(k))/1000; % [m3/s]
P1 = P(t, d.NodesConnectingLinksIndex(d.LinkValveIndex(k), 1))
    *10^4; % [Pa]
P2 = P(t, d.NodesConnectingLinksIndex(d.LinkValveIndex(k), 2))
    *10^4; % [Pa]
W_kt(t, k) = abs(Q) * abs(P1 - P2);

```

```

end
W_kt_mean(1,k) = mean(W_kt(:,k));      % vettore riga contenente
    in ogni
% colonna la potenza meccanica media giornaliera
% della corrente attraverso la valvola k
PF2_k(1,k) = max(0,Wmin-W_kt_mean(1,k));
end

W(i,:) = W_kt_mean;
PF2(i) = p2*sum(PF2_k);
%      W = [W W_kt];

% Calcolo Penalty function 3: nodi con pressione > pmin_PF3
PF3_nt = zeros(hrs+1,DemandCount);

for t = 1:hrs+1
for n = 1:DemandCount      % considero solo i nodi con domanda
if P(t,n)<=pmin_PF3
PF3_nt(t,n) = 0;
elseif and(P(t,n)>pmin_PF3,P(t,n)<pmax_PF3)
PF3_nt(t,n) = (P(t,n)-pmin_PF3)/(pmax_PF3-pmin_PF3); % p_nt
    varia linearmente
else
PF3_nt(t,n) = 1;
end
end
end
PF3(i) = p3*sum(sum(PF3_nt));

% Deviazione standard
DS(i) = std(P(:,1:DemandCount));      % Deviazione standard

% Calcolo Penalty function 4: DS < DS_0
PF4(i) = p4*max(0,DS(i)-DS_0);

% Funzione obiettivo (da minimizzare)
%      PF1(i) = 0;
%      PF2(i) = 0;
FF(i) = DS(i)+PF1(i)+PF2(i)+PF3(i)+PF4(i);

% Fine calcolo FF

% Uniformity coefficient
AP = mean(mean(P(:,1:DemandCount)));
% pressione media
ADEV = mean(mean(abs(P(:,1:DemandCount)-AP)));
UC(i) = 1-ADEV/AP;

% Portata persa
q_leak(i) = sum(d.NodeEmitterCoeff(:,1:DemandCount).*P(:,1:

```



```

    DemandCount).^d.OptionsEmitterExponent);    % L/s

% Chiusura particella i

%% AGGIORNAMENTO POSIZIONE E VELOCITA DELLA PARTICELLA

% pbest: migliore posizione della particella i
% gbest: migliore posizione tra tutte le particelle
% Trovo il valore massimo di FF (ottimizzazione) e il suo indice
[FF_max,M] = max(FF);    % M: indice della particella con FF_max

% LOCATION
if it == 1
% pbest
pbest_loc = Xloc;
FF_pbest_loc = FF;

% gbest
gbest_loc = Xloc(M,:);
FF_gbest_loc = FF_max;
else
% pbest
for i = 1:N_particelle
if FF(i) >= FF_pbest_loc(i)
pbest_loc(i,:) = Xloc(i,:);
FF_pbest_loc(i) = FF(i);
end
end

% gbest
if FF_max >= FF_gbest_loc
gbest_loc = Xloc(M,:);
FF_gbest_loc = FF_max;
end
end

% parametri dell'algorithmo
r1 = rand(1);
r2 = rand(1);

% inerzia
if and(it>=1,it<=7)
w = 1;
elseif and(it>7,it<=14)
w = 0.8;
else
w = 0.6;
end
end

```

```

% Velocita
Vloc = w*Vloc + c1*r1.*(pbest_loc-Xloc) + c2*r2.*(gbest_loc-Xloc)
;

% Posizione
Xloc = round(Xloc+Vloc);          % tubo

% SETTING
if it == 1
% pbest
pbest_set = Xset;
FF_pbest_set = FF;

% gbest
gbest_set = Xset(M,:);
FF_gbest_set = FF_max;
else
% pbest
for i = 1:N_particelle
if FF(i) >= FF_pbest_set(i)
pbest_set(i,:) = Xset(i,:);
FF_pbest_set(i) = FF(i);
end
end

% gbest
if FF_max >= FF_gbest_set
gbest_set = Xset(M,:);
FF_gbest_set = FF_max;
end
end

% parametri dell'algorithmo
r1 = rand(1);
r2 = rand(1);

% Velocita
Vset = w*Vset + c1*r1.*(pbest_set-Xset) + c2*r2.*(gbest_set-Xset)
;

% Posizione
Xset = Xset+Vset;                % setting

```

# Appendice B

## Risultati completi

In questa sezione si riportano i risultati ottenuti dall'algoritmo nelle 10 simulazioni eseguite per ogni fattore di domanda nella prima fase di ottimizzazione. Nelle tabelle sono riportati i valori di tubo, setting e funzione obiettivo della particella che ha ottenuto il risultato migliore.

### Minimizzazione perdite

#### 1 valvola

FD = 0.41				FD = 0.61			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	22	33.5163	90.0285	1	17	35.8612	94.3013
2	22	34.1674	91.4639	2	22	35.0304	92.2483
3	22	32.4679	87.7148	3	22	32.1598	86.0705
4	22	31.0196	84.5165	4	22	31.0010	83.5684
5	22	31.2139	84.9457	5	22	31.2139	84.0276
6	22	30.4231	83.1982	6	22	31.1456	83.8802
7	22	31.4516	85.4708	7	22	31.1845	83.9641
8	22	33.5981	90.2089	8	22	32.3232	86.4233
9	22	34.8892	93.0540	9	22	31.7423	85.1685
10	22	35.9080	95.2948	10	22	35.3480	92.9275
FD = 0.81				FD = 0.82			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	22	31.7802	83.9418	1	17	30	85.6935
2	22	31.8677	84.1263	2	22	31.9190	84.1594
3	22	31.8817	84.1559	3	17	31.1719	85.6935
4	22	35.0129	90.7339	4	28	30	92.0398
5	22	32.2252	84.8800	5	22	31.9094	84.1392
6	22	31.7847	83.9513	6	22	31.8380	83.9888
7	22	31.9819	84.3671	7	22	31.8251	83.9616
8	22	31.8287	84.0441	8	22	31.8420	83.9972
9	22	31.8835	84.1596	9	22	31.8393	83.9915
10	22	32.0756	84.5646	10	22	31.9983	84.3264
FD = 0.92				FD = 1.03			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]

1	22	32.3651	84.2917	1	22	32.9908	84.5980
2	22	32.4250	84.4164	2	17	32.4742	85.8551
3	22	32.3478	84.2557	3	22	33.1761	84.9786
4	22	32.3926	84.3489	4	17	32.1557	85.3004
5	22	32.4848	84.5408	5	14	30.7228	88.5304
6	22	32.7471	85.0865	6	22	33.0514	84.7225
7	22	33.6973	87.0604	7	22	32.9567	84.5279
8	17	31.7213	85.2504	8	22	33.0638	84.7480
9	14	36.1056	91.0037	9	22	34.2650	87.2114
10	22	32.3221	84.2022	10	22	33.5798	85.8072
FD = 1.13							
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	14	30.1943	86.1484	1	14	33.0584	85.6840
2	28	30	89.6459	2	14	32.5455	85.2229
3	22	33.5712	84.7940	3	33	30.7908	86.7903
4	14	32.2360	86.1484	4	26	30	87.8299
5	22	33.8762	85.4128	5	14	32.5952	85.2674
6	14	32.2183	86.1484	6	33	31.0166	86.7903
7	14	30	86.1484	7	14	32.5173	85.1976
8	14	31.5821	86.1484	8	33	30.0900	86.7903
9	14	30.3487	86.1484	9	14	32.8967	85.5383
10	14	32.7041	86.2284	10	13	30.1119	86.7129

## 2 valvole

FD = 0.41					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	32	34.5154	22	30.4140	83.1781
2	22	35.1305	33	30	92.9924
3	28	35.9639	22	31.1627	84.8326
4	2	38.5208	22	30.4161	83.1827
5	18	33.8589	22	30.5453	82.4317
6	22	32.0216	14	32.4909	85.7860
7	22	30.8999	15	33.9366	83.3993
8	22	30.5997	10	35.9630	83.5884
9	28	30.8035	22	33.8586	88.8914
10	22	30.5635	37	35.5459	83.5084
FD = 0.61					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	29	34.2458	22	31.4479	84.5345
2	22	33.8360	14	34.3625	87.4608
3	8	34.6262	22	30.8266	82.9023
4	22	30.9692	21	40.1107	83.4998
5	8	32.2643	22	31.0176	83.3079
6	22	31.0957	18	35.1876	83.2248

7	21	35.6311	22	33.1867	86.9286
8	22	31.9058	14	36.3927	84.3142
9	13	35.6253	22	30.9684	83.4981
10	22	31.0484	16	30.8213	83.6310
FD = 0.81					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	30	33.0915	22	31.7896	83.9447
2	22	31.8079	20	36.0682	83.8576
3	22	32.1368	23	36.1095	84.6936
4	18	30.7379	22	32.2183	82.6211
5	20	31.6488	22	32.2589	83.5478
6	13	33.2246	17	30.2526	86.0342
7	30	30.0006	22	31.8017	83.9702
8	36	32.0881	17	30	85.4247
9	22	31.7854	2	38.1804	83.9528
10	17	30.0362	18	30.1007	83.1215
FD = 0.82					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	13	35.8685	22	31.9143	84.1495
2	22	31.8476	37	40.7128	84.0090
3	22	32.0295	24	36.3970	84.3921
4	8	30.3687	22	31.6374	83.0331
5	22	32.0326	2	37.0173	84.3986
6	22	31.8738	29	30.4144	84.0677
7	22	32.0656	2	35.0716	84.4681
8	22	32.0489	5	38.6465	84.5162
9	23	36.7067	22	32.2073	84.7665
10	22	31.8164	35	30.0331	83.7901
FD = 0.92					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	22	33.2080	26	39.0132	86.0446
2	32	31.9868	17	33.0537	87.4355
3	37	36.3625	22	32.7168	85.0235
4	16	33.6046	22	32.4390	84.3765
5	22	32.8940	6	40.2541	85.3920
6	22	32.7299	18	34.0025	84.0446
7	22	32.3336	37	33.8309	84.2232
8	22	33.1968	17	32.6006	84.4385
9	20	32.7532	22	32.4356	83.3477
10	14	37.2372	17	32.8306	86.3856
FD = 1.03					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	33	35.1434	22	33.3242	85.2827
2	16	37.3614	17	32.7376	86.3161
3	18	36.5341	17	32.2211	85.3826
4	18	32.3896	17	32.4006	84.1232

5	20	31.2342	17	32.2818	84.0190
6	17	32.1929	7	36.6476	85.3650
7	7	39.7663	22	33.2930	85.2186
8	20	35.5153	22	32.9968	84.3137
9	29	33.2702	22	33.0822	84.7889
10	22	33.0166	24	30	84.7189
FD = 1.13					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	18	32.3025	22	34.0885	84.1694
2	17	32.8356	37	37.5391	85.7744
3	14	30	18	33.5626	84.8799
4	30	30.0166	22	33.6207	84.8530
5	22	33.5684	20	35.0996	84.3729
6	13	30.3165	14	34.1260	84.1417
7	19	37.9951	14	32.3363	85.3852
8	13	32.0266	14	33.5470	84.8478
9	8	33.8176	22	33.6142	83.9152
10	13	35.3097	22	33.6019	84.8563
FD = 1.23					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	32	32.5650	33	32.4996	86.1956
2	22	34.2911	18	37.3188	85.1699
3	33	31.4793	19	34.8104	85.4267
4	21	39.3377	17	33.9315	86.7298
5	26	30	18	30.1099	85.1247
6	25	30.4836	14	32.8797	85.3342
7	14	32.5870	21	35.4613	85.2601
8	20	33.5247	22	34.4409	84.5926
9	12	34.9798	14	32.7906	85.4429
10	14	34.0497	13	32.4103	85.0910

## Massimizzazione *UC*

### 1 valvola

FD = 0.41				FD = 0.61			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	22	34.4505	0.8297	1	28	35.7025	0.8356
2	22	34.3417	0.8297	2	28	34.2102	0.8427
3	22	34.3685	0.8297	3	28	34.3496	0.8422
4	22	35.3682	0.8289	4	22	35.1250	0.8336
5	22	34.4229	0.8297	5	22	34.8922	0.8337
6	22	37.0425	0.8277	6	28	34.4942	0.8417
7	22	36.5244	0.8280	7	28	34.1875	0.8428
8	22	38.1523	0.8265	8	28	34.3052	0.8424

9	22	36.7505	0.8279	9	28	34.1739	0.8428
10	22	34.4624	0.8297	10	22	34.9115	0.8337
FD = 0.81				FD = 0.82			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	28	33.6975	0.8444	1	28	33.69753727	0.8443
2	28	32.6391	0.8480	2	28	32.6391	0.8481
3	28	33.4212	0.8457	3	28	33.4212	0.8456
4	28	33.6634	0.8445	4	28	32.9714	0.8474
5	22	36.0099	0.8387	5	22	36.0099	0.8390
6	28	32.7961	0.8479	6	28	32.7961	0.8480
7	28	32.6157	0.8480	7	28	32.6056	0.8481
8	28	32.6752	0.8480	8	28	32.5832	0.8481
9	28	33.6830	0.8444	9	22	35.6150	0.8393
10	22	35.6694	0.8390	10	22	35.6694	0.8393
FD = 0.92				FD = 1.03			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	14	39.1843	0.8454	1	14	38.1382	0.8469
2	28	32.3257	0.8492	2	28	31.4130	0.8503
3	11	35.7239	0.8411	3	11	35.1630	0.8445
4	14	38.9281	0.8455	4	22	36.5640	0.8461
5	28	33.0010	0.8469	5	14	38.3132	0.8469
6	28	32.7961	0.8479	6	20	35.1674	0.8425
7	28	32.2920	0.8492	7	28	31.4733	0.8502
8	28	32.2311	0.8492	8	22	36.5391	0.8460
9	14	38.9369	0.8455	9	14	37.7571	0.8464
10	14	38.9360	0.8455	10	14	38.1574	0.8469
FD = 1.13				FD = 1.23			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	21	37.3244	0.8493	1	11	34.8538	0.8497
2	28	31.3438	0.8495	2	18	35.5797	0.8496
3	21	37.2433	0.8494	3	20	35.3083	0.8495
4	11	34.8467	0.8480	4	18	35.6910	0.8498
5	21	37.2780	0.8494	5	18	35.7822	0.8500
6	21	37.0718	0.8493	6	26	34.4078	0.8483
7	28	31.5927	0.8494	7	21	36.7835	0.8494
8	11	34.8089	0.8480	8	11	34.7298	0.8496
9	21	36.8158	0.8491	9	17	36.2741	0.8495
10	14	38.5193	0.8481	10	14	38.0768	0.8484

## 2 valvole

FD = 0.41					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	22	33.4673	18	30.6366	0.9269

2	18	35.4111	22	35.7514	-89.765
3	22	32.9422	26	33.1222	-1323.8
4	3	37.2184	22	38.1155	-1499.1
5	8	31.8505	22	34.5508	-1499.1
6	18	33.4017	22	35.0631	0.9300
7	14	32.1649	28	34.8233	-1499.0
8	22	35.9013	28	33.9906	-615.07
9	22	34.3465	37	30	-1499.1
10	11	38.6086	22	34.3333	-1499.1
FD = 0.61					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	22	33.6681	20	35.2649	0.9415
2	21	39.3805	2	34.2534	-1499.0
3	36	33.8390	35	30	-698.08
4	11	35.1499	22	35.4669	-730.13
5	17	38.3479	13	36.6544	-289.54
6	33	34.1919	17	34.6200	0.9315
7	18	33.0078	22	33.5240	0.9376
8	18	35.4970	28	34.1345	0.9476
9	13	36.5404	20	31.0784	0.9272
10	22	33.7952	28	30.9050	0.9514
FD = 0.81					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	29	38.7532	21	39.9400	-1380.2
2	17	35.9183	15	38.1618	0.9439
3	34	38.9749	35	30.6071	-1435.3
4	28	32.5337	35	30.7968	0.9577
5	18	35.0248	22	34.0978	0.9480
6	28	31.8114	20	33.8420	0.9520
7	11	35.9871	33	37.0006	0.9455
8	20	34.6650	26	35.8117	0.9399
9	28	35.0458	20	32.6251	0.9421
10	14	36.0313	17	35.1740	0.9581
FD = 0.82					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	33	36.8228	20	35.3328	0.9430
2	14	38.4068	13	36.4261	0.9614
3	18	33.0050	22	35.9843	0.9402
4	22	32.4434	18	35.0533	0.9467
5	20	32.1076	22	37.7977	0.9399
6	20	32.6643	22	35.6876	0.9440
7	33	36.5728	17	37.4504	0.9432
8	14	39.7339	15	37.6134	0.9607
9	14	37.3530	22	36.3161	0.9653
10	27	37.5870	14	38.8602	-1417.9
FD = 0.92					



RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	36	33.7985	20	33.6337	0.9445
2	14	36.2179	22	35.9258	0.9643
3	22	35.1797	20	31.2159	0.9454
4	26	33.7596	22	36.4526	0.9501
5	18	35.7338	28	32.6708	0.9561
6	11	36.7065	28	30.8129	0.9576
7	15	38.3431	36	33.8375	0.9527
8	18	30.9012	21	38.8445	-27.444
9	22	37.4380	20	35.0984	0.9479
10	14	37.4634	35	30	0.9626
FD = 1.03					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	21	35.2344	22	35.4064	0.9632
2	26	35.5126	14	38.5815	0.9616
3	18	34.0175	22	34.5027	0.9544
4	18	35.4589	28	32.4473	0.9567
5	14	37.4048	20	32.1364	0.9573
6	14	35.1317	17	35.1030	0.9585
7	14	35.5774	26	35.0878	0.9580
8	14	34.9604	22	36.6022	0.9600
9	11	35.6982	14	36.6995	0.9618
10	13	35.6583	21	37.1587	0.9622
FD = 1.13					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	21	36.1641	14	37.2958	0.9627
2	15	35.9858	20	35.5187	0.9616
3	35	30	18	32.9091	0.9480
4	22	36.0310	28	30.3388	0.9602
5	15	36.7549	21	37.6873	0.9639
6	22	35.4357	21	36.3210	0.9628
7	21	36.1123	14	37.6794	0.9634
8	15	34.6534	22	36.0282	0.9617
9	6	36.4216	15	35.7161	0.9604
10	22	34.3122	11	31.5638	0.9540
FD = 1.23					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	33	34.4237	20	34.5896	0.9571
2	22	34.4279	18	34.3266	0.9630
3	21	37.1717	36	33.9036	0.9618
4	11	34.0551	15	35.1421	0.9599
5	15	34.4554	20	32.0988	0.9576
6	15	33.0596	22	35.3543	0.9603
7	24	33.2266	11	31.2565	0.9538
8	21	35.6090	3	30	0.9618
9	15	34.5059	18	35.7456	0.9630
10	21	35.9672	15	34.9398	0.9628

## Massimizzazione $UC + Pmax$

### 1 valvola

FD = 0.41				FD = 0.61			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	22	35.6143	-0.5340	1	22	35.2903	-0.2402
2	22	35.1179	-0.3587	2	22	32.3893	0.3653
3	22	32.0174	0.3084	3	22	32.7030	0.3109
4	22	34.4254	-0.1549	4	22	34.8954	-0.1205
5	22	31.3053	0.4106	5	22	31.9096	0.4398
6	22	30.8060	0.4808	6	22	31.4031	0.5089
7	22	30.8102	0.4802	7	22	31.5772	0.4851
8	22	33.6442	0.0117	8	22	31.4286	0.5054
9	22	31.2311	0.4210	9	22	32.5462	0.3392
10	17	37.7212	-1.1818	10	22	31.4468	0.5029
FD = 0.81				FD = 0.82			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	22	32.8462	0.4504	1	22	35.38630497	-0.0287
2	22	32.3349	0.5285	2	22	33.4415	0.3584
3	22	32.2813	0.5357	3	22	33.1957	0.4013
4	22	34.0471	0.2435	4	22	32.6150	0.4950
5	22	32.3311	0.5290	5	22	34.2857	0.2119
6	22	32.3063	0.5323	6	22	32.3606	0.5325
7	22	32.7196	0.4700	7	22	35.6622	-0.1122
8	22	33.0540	0.4166	8	22	32.3299	0.5365
9	22	34.3645	0.1885	9	22	32.3318	0.5363
10	22	33.0271	0.4213	10	22	32.3123	0.4668
FD = 0.92				FD = 1.03			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	14	36.8781	-0.0241	1	22	35.0777	0.3017
2	22	33.1515	0.5066	2	22	33.8551	0.5100
3	22	33.5097	0.4479	3	22	33.9118	0.5015
4	22	34.0471	0.3558	4	22	35.5041	0.2072
5	22	34.5380	0.2721	5	14	36.0554	0.1701
6	22	33.2120	0.4974	6	22	33.7248	0.5291
7	22	33.0707	0.5182	7	22	33.3963	0.5614
8	22	35.0643	0.1722	8	22	33.6204	0.5407
9	14	36.8084	-0.0178	9	14	35.6296	0.2078
10	14	36.7924	-0.0163	10	22	33.6112	0.5415
FD = 1.13				FD = 1.23			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	22	33.9282	0.5803	1	22	34.7308	0.5745
2	22	33.9941	0.5743	2	28	30	0.3213

3	22	35.0259	0.4373	3	22	34.3812	0.6109
4	22	35.4653	0.3492	4	22	34.3848	0.6105
5	22	34.0222	0.5717	5	22	34.3399	0.6145
6	33	34.7543	0.1773	6	22	34.3366	0.6148
7	22	33.9485	0.5784	7	22	34.9825	0.5468
8	22	33.9673	0.5767	8	22	34.3599	0.6128
9	22	33.9425	0.5790	9	22	34.7112	0.5766
10	22	33.9444	0.5788	10	14	36.1121	0.3971

## 2 valvole

FD = 0.41					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	18	34.0791	22	32.4363	0.4196
2	20	31.1545	22	30.4211	-0.9059
3	17	38.2308	18	36.1179	-914.50
4	18	33.8689	22	35.6237	-0.7910
5	22	31.0838	20	30	-1.2116
6	19	39.3124	17	36.8263	-1.3736
7	19	38.5169	17	36.1249	-789.36
8	2	31.5002	22	32.2026	-1499.6
9	22	34.3738	32	37.9620	-1500.0
10	20	32.1585	28	36.4919	-364.27
FD = 0.61					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	13	37.7230	28	33.5937	-375.96
2	26	36.6147	22	37.6611	-620.29
3	18	34.9526	22	34.1847	0.2264
4	26	37.2789	18	30	-290.51
5	22	31.1990	18	35.6043	0.6937
6	22	38.2874	13	36.9333	-2.0813
7	20	33.8450	13	37.5897	-659.50
8	22	31.6293	31	30.0031	-1499.4
9	22	37.0134	9	39.9929	-1455.3
10	11	37.7168	28	33.7149	-0.7983
FD = 0.81					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	36	33.8405	18	33.1049	-92.717
2	22	36.5808	17	34.7771	-1.1572
3	3	30.5771	26	36.1385	-150.89
4	18	33.2136	22	34.1072	0.4155
5	14	35.5837	17	33.4368	0.6413
6	22	34.8779	17	34.3297	0.3316
7	22	31.9041	18	34.8808	0.7559
8	21	38.6389	22	36.3161	-366.90

9	28	33.2311	18	32.7355	-1.0169
10	18	34.7755	22	33.3729	0.5484
FD = 0.82					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	22	32.2450	18	33.2560	0.7341
2	14	38.2744	18	31.8118	-0.1187
3	14	38.5376	22	36.1947	0.1485
4	22	35.5249	26	34.0798	0.0899
5	22	34.1092	18	34.8625	0.4272
6	17	35.0785	22	35.4668	0.2014
7	18	33.0179	22	32.0041	0.7546
8	22	32.7352	20	34.7329	0.6259
9	22	33.7706	15	35.1191	0.5990
10	20	35.0254	22	32.3096	0.6870
FD = 0.92					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	13	33.8477	14	37.4676	0.2500
2	17	35.5842	14	35.7819	0.5645
3	22	33.3102	18	33.8548	0.6702
4	18	35.4809	22	34.8665	0.3775
5	20	30.1711	17	37.6475	-9.1498
6	28	30	35	41.4729	-1500.0
7	36	33.7310	28	31.0317	-0.0642
8	22	34.9718	14	36.4705	0.6423
9	18	32.4709	14	37.8176	0.0536
10	20	34.8646	33	36.2182	-2.3534
FD = 1.03					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	22	34.6815	14	34.8375	0.8035
2	14	34.4403	22	34.6546	0.8226
3	21	35.4439	28	32.4301	0.1840
4	22	35.7978	14	35.8523	0.6448
5	18	33.8211	28	31.4510	0.0408
6	14	36.8370	17	34.6064	0.5371
7	21	35.5446	22	33.9940	0.7634
8	13	34.3584	28	32.0622	0.0644
9	11	35.4426	14	37.0380	0.2476
10	11	33.0910	22	34.6371	0.5238
FD = 1.13					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	26	34.3727	14	35.2651	0.5366
2	22	36.5560	21	35.0826	0.5135
3	14	34.7297	17	35.9604	0.6402
4	21	35.1253	33	34.5652	0.6175
5	14	35.1414	22	36.2059	0.6895
6	22	33.7118	21	34.9712	0.8347

7	14	36.2151	22	36.1846	0.5949
8	14	35.1988	13	34.4857	0.5547
9	14	35.2969	22	35.0177	0.7743
10	21	35.6793	28	32.1872	0.3279
FD = 1.23					
RUN	Tubo 1	Setting 1 [m]	Tubo 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	33	34.3248	20	34.4230	-2.5036
2	22	34.8389	20	34.3298	0.7126
3	22	34.7501	21	35.7927	0.7791
4	26	34.5592	14	36.6775	0.4759
5	15	33.2213	33	33.7865	-0.8593
6	11	33.7404	14	35.0524	-1.9165
7	20	31.6412	28	30.1883	-4.9223
8	20	30.0680	21	35.9720	-3.7613
9	26	34.2467	14	35.7004	-0.5543
10	15	35.0905	11	32.7751	-2.8956

## Minimizzazione $DS$

### 1 valvola

FD = 0.41				FD = 0.61			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	22	32.6345	2.6451	1	22	35.0687	2.6020
2	22	35.6139	2.9109	2	22	34.7696	2.5687
3	22	32.3309	2.6428	3	22	32.6662	2.4608
4	22	35.5585	2.9024	4	22	35.1616	2.6131
5	22	32.3169	2.6428	5	22	35.0687	2.6020
6	22	32.3358	2.6428	6	22	34.7696	2.5687
7	22	32.3498	2.6428	7	22	32.6662	2.4608
8	22	32.9576	2.6530	8	22	32.7786	2.4605
9	22	33.1673	2.6609	9	22	35.3258	2.6336
10	22	37.4292	3.2427	10	22	32.7748	2.4605
FD = 0.81				FD = 0.82			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	22	35.8808	2.4369	1	22	34.2956	2.2729
2	22	33.2981	2.2574	2	22	33.3692	2.2471
3	22	33.3055	2.2574	3	22	33.3271	2.2471
4	22	35.2007	2.3566	4	22	35.2007	2.3434
5	22	33.3692	2.2575	5	22	33.3692	2.2471
6	22	33.3005	2.2574	6	22	33.3469	2.2471
7	22	34.1987	2.2797	7	22	34.1987	2.2679
8	22	33.3777	2.2575	8	22	33.3777	2.2471
9	22	34.3905	2.2904	9	22	34.3905	2.2783
10	22	33.6892	2.2614	10	22	33.6892	2.2505

FD = 0.92				FD = 1.03			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	14	37.3613	1.9669	1	22	34.0736	2.0412
2	22	33.7259	2.1455	2	14	37.0892	1.9123
3	22	33.6867	2.1454	3	14	37.1081	1.9123
4	22	34.6151	2.1715	4	14	37.5909	1.9257
5	14	37.5065	1.9671	5	14	37.0733	1.9123
6	22	32.9052	2.1631	6	21	37.6885	2.0258
7	22	33.9256	2.1473	7	14	37.2681	1.9140
8	22	33.6912	2.1454	8	21	37.3251	2.0334
9	14	37.4279	1.9667	9	28	31.4449	2.1903
10	14	37.4508	1.9668	10	14	37.5129	1.9218

FD = 1.13				FD = 1.23			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	14	36.8016	1.8764	1	28	31.2362	2.0143
2	14	36.6204	1.8775	2	28	31.2422	2.0143
3	21	37.3154	1.9213	3	21	36.8477	1.8473
4	22	34.5180	1.9610	4	14	36.6606	1.8598
5	14	36.8949	1.8771	5	14	36.1442	1.8617
6	22	34.4519	1.9608	6	22	34.8389	1.9024
7	28	31.4619	2.1003	7	21	36.8693	1.8473
8	14	37.3349	1.8935	8	15	34.3727	1.8434
9	14	36.7505	1.8763	9	21	36.3710	1.8564
10	22	34.4885	1.9608	10	21	36.8563	1.8473

## 2 valvole

FD = 0.41					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	30	35.5984	22	32.4141	1502.6
2	22	34.8380	15	38.7189	2.6838
3	17	37.7347	20	33.4776	3.5023
4	22	35.0343	20	34.4763	2.8841
5	22	36.0874	7	36.4167	1503.0
6	20	34.4485	22	36.1245	3.0769
7	22	37.9933	20	33.7140	3.5275
8	13	36.8376	28	35.8535	722.50
9	20	33.3473	22	33.2571	2.7090
10	22	33.3169	15	37.0150	123.18

FD = 0.61					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	33	33.9632	17	34.7610	2.9206
2	14	39.1475	17	35.6687	2.2815
3	22	33.5313	18	34.9218	2.4643

4	14	38.7974	28	33.2513	2.3499
5	19	35.8186	17	33.5393	2.9820
6	19	37.1699	17	34.5984	2.9181
7	17	33.3516	22	34.6365	2.5935
8	22	36.4954	17	34.0805	2.6993
9	20	33.8007	22	34.1770	2.5623
10	18	33.1391	20	30.0000	3.9320
FD = 0.81					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	36	33.8405	18	33.1049	86.784
2	36	36.0698	22	34.0400	1502.3
3	22	36.1071	17	34.9035	2.4562
4	18	35.7033	22	33.2317	2.2086
5	18	34.6502	22	33.2676	2.1947
6	17	34.5541	19	37.3745	2.6884
7	28	34.6615	36	33.7195	260.80
8	14	38.1044	22	37.0165	1.8739
9	20	32.9955	22	35.7609	2.5534
10	28	33.4861	17	36.6738	2.5279
FD = 0.82					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	36	33.8252	18	33.1150	45.064
2	26	36.8529	28	32.3744	2.3614
3	20	34.8567	22	35.6162	2.4206
4	14	37.5625	17	35.7004	1.9590
5	18	35.5769	17	34.0551	2.7140
6	22	32.4573	15	34.1993	2.0445
7	18	35.6236	22	36.1258	2.4901
8	18	35.1172	22	33.3720	2.1886
9	20	34.2940	28	33.8767	2.6371
10	33	37.2924	28	34.2419	2.5830
FD = 0.92					
RUN	Tubo 1	Setting 1 [m]	Tubo 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	36	33.7985	20	33.6337	2.7744
2	14	38.4387	17	37.1447	1.9952
3	22	35.5544	14	35.7429	1.6625
4	35	30.6530	28	32.4005	2.3203
5	14	35.4936	22	34.5882	1.6524
6	18	34.3046	22	34.2856	2.1397
7	14	37.1834	26	35.3319	1.9414
8	13	33.1898	21	38.7020	22.701
9	14	36.1989	28	31.9458	2.1520
10	18	34.0359	22	33.4058	2.0682
FD = 1.03					
RUN	Tubo 1	Setting 1 [m]	Tubo 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	21	35.2344	22	35.4064	1.7865

2	22	34.8867	14	36.0524	1.7156
3	13	34.0274	14	34.7769	2.0912
4	22	36.9878	21	38.6008	1.9722
5	22	34.8554	11	32.5954	2.1104
6	17	33.0103	22	34.4219	2.2039
7	15	33.8220	22	34.1626	1.7711
8	22	35.7631	21	36.7936	1.7687
9	21	34.7720	22	34.6916	1.7613
10	22	35.2861	14	35.7134	1.6876
FD = 1.13					
RUN	Tubo 1	Setting 1 [m]	Tubo 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	22	35.4357	21	36.3210	1.7275
2	21	36.4531	14	37.9896	1.8527
3	2	35.1275	21	36.8360	1004.5
4	18	33.5442	14	36.0437	1.9573
5	28	31.4448	20	33.9431	2.1540
6	15	34.7360	14	37.0013	1.8593
7	28	32.5797	20	31.4514	2.4074
8	18	34.7791	14	36.9203	1.8903
9	15	33.7666	22	35.1033	1.7436
10	17	36.4455	21	37.2469	1.8943
FD = 1.23					
RUN	Tubo 1	Setting 1 [m]	Tubo 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	33	33.6482	20	33.4299	2.0352
2	22	34.8872	15	33.8609	1.8167
3	22	35.0480	21	35.4894	1.7291
4	15	34.1517	22	36.2515	1.8032
5	22	34.6698	21	35.3211	1.7377
6	26	34.4155	21	36.4149	1.8641
7	26	34.3483	21	36.6483	1.8633
8	21	36.8505	11	34.1012	1.8637
9	21	36.4336	18	31.7891	2.1244
10	35	30.0000	14	34.7501	1.9794

## Minimizzazione $DS + Pmax$

### 1 valvola

FD = 0.41				FD = 0.61			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	22	30.8246	789.42	1	17	35.1601	176.73
2	22	35.0598	1277.0	2	22	34.2928	2426.2
3	22	32.1356	1095.7	3	22	32.2479	2830.4
4	22	35.5205	1233.8	4	22	34.8944	2232.3
5	22	34.9146	1286.2	5	22	31.2455	2897.3



6	22	30.4228	669.79	6	22	30.9883	2901.9
7	22	30.5642	713.23	7	22	30.9876	2901.9
8	22	32.9220	1215.6	8	22	32.6983	2773.3
9	22	32.0225	1074.5	9	17	35.4877	306.23
10	22	37.6499	713.53	10	22	36.2171	1670.2
FD = 0.81				FD = 0.82			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	28	30.4510	150.15	1	28	30.3025	156.20
2	17	34.4856	1122.5	2	22	36.4182	1767.6
3	22	31.8545	4457.9	3	22	31.9469	4493.3
4	17	34.5632	1137.8	4	17	34.5632	1191.1
5	22	31.8899	4444.6	5	22	31.8899	4515.7
6	17	32.9615	615.30	6	17	32.9615	696.66
7	17	32.7741	526.41	7	17	32.9659	698.60
8	17	32.8951	584.35	8	17	32.8951	667.01
9	22	31.8700	4452.1	9	22	31.8206	4542.7
10	17	32.8040	540.90	10	22	32.8036	4121.7
FD = 0.92				FD = 1.03			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	14	36.7974	154.01	1	17	34.9234	1880.4
2	22	33.0917	4463.4	2	22	33.0178	4946.6
3	22	32.3635	4913.4	3	22	33.7227	4348.7
4	17	33.7566	1615.3	4	22	34.4160	3712.8
5	22	32.3311	4932.3	5	22	33.6702	4394.9
6	28	30	467.94	6	22	32.9351	5013.7
7	22	32.3336	4930.9	7	22	32.9509	5000.9
8	17	33.7702	1617.0	8	22	33.8998	4190.9
9	14	36.8084	156.50	9	22	34.7499	3388.7
10	17	35.4772	1533.6	10	14	35.5193	296.92
FD = 1.13				FD = 1.23			
RUN	tubo	setting [m]	FF [-]	RUN	tubo	setting [m]	FF [-]
1	14	34.6564	522.35	1	22	34.3889	3780.8
2	22	33.5832	4672.8	2	22	34.4081	3756.5
3	22	33.8000	4448.2	3	14	34.8864	866.54
4	22	34.2771	3937.3	4	28	30.1504	901.12
5	22	33.6248	4630.0	5	22	35.8494	1817.2
6	22	33.6380	4616.4	6	22	34.7558	3309.7
7	22	34.3860	3817.4	7	33	33.7003	158.82
8	14	35.0844	596.96	8	22	34.9812	3013.1
9	22	33.9968	4240.2	9	14	34.5484	846.80
10	14	35.9389	696.93	10	14	34.5202	844.61

2 valvole

FD = 0.41					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	31	35.6990	22	31.7609	1503.1
2	20	33.7114	17	38.1479	5.6499
3	22	35.7250	18	34.5273	4.3909
4	22	36.7919	18	34.4889	5.0193
5	18	36.2791	22	32.1297	1033.3
6	22	30.9944	15	34.5609	1247.0
7	18	34.3118	22	37.1359	5.2440
8	28	34.3630	22	36.6842	721.59
9	18	34.4622	22	31.6167	2.9507
10	22	32.0621	20	32.6571	3.1430
FD = 0.61					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	33	33.9462	17	34.6820	3.9434
2	35	30.7199	22	37.9659	19.733
3	22	31.1429	2	34.0685	1502.8
4	17	34.9286	19	37.2664	3.9664
5	13	30.0699	22	32.0069	584.14
6	18	35.1728	22	35.1984	3.6433
7	22	34.5652	18	31.5825	3.7052
8	18	34.5659	22	34.2886	3.2994
9	22	31.2985	33	31.2761	2.8367
10	14	37.0649	17	33.6132	2.7713
FD = 0.81					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	36	33.8252	18	33.1150	446.29
2	17	35.0326	13	33.1671	3.6852
3	17	33.2225	19	36.4783	3.4559
4	13	31.0362	22	34.5100	3.2836
5	28	31.2589	17	34.7635	3.0667
6	21	32.7761	2	33.1083	1300.9
7	22	37.7008	20	35.7675	490.80
8	20	34.6485	3	30.9418	934.35
9	22	37.3012	14	38.6527	3.0231
10	28	30.9924	21	36.6892	291.619
FD = 0.82					
RUN	tubo 1	setting 1 [m]	tubo 2	setting 2 [m]	FF [-]
1	36	33.8119	18	33.1237	401.58
2	26	36.8529	28	32.3744	3.7102
3	20	34.6211	22	35.2611	3.1734
4	28	33.6905	17	38.2813	4.0328
5	2	35.0957	21	34.8214	441.59
6	22	33.9788	13	30.8432	3.1177
7	28	30.6941	17	36.9703	3.0721
8	20	30.1369	21	39.7905	323.35

9	22	35.5887	17	33.9164	3.0356
10	22	34.8586	15	36.2260	2.6043
FD = 0.92					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	36	33.7985	20	33.6337	153.32
2	36	33.5803	18	33.2135	323.86
3	14	38.4909	20	32.0236	3.3041
4	18	33.8181	22	33.8430	2.4864
5	11	35.7472	28	32.8361	3.5933
6	17	34.9078	14	35.1535	2.2420
7	22	33.0683	20	33.4084	2.4011
8	22	32.6204	15	34.5102	2.3669
9	15	36.4702	17	33.8344	3.1891
10	22	32.3212	4	38.0390	1502.4
FD = 1.03					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	22	35.4357	21	36.3210	2.1268
2	22	35.0963	14	35.4634	1.9055
3	21	34.4004	22	33.0220	1.9231
4	21	35.5955	22	33.8702	1.9294
5	2	36.1599	21	36.2079	889.00
6	14	35.6710	13	33.6802	2.4710
7	14	35.5328	22	36.2052	2.0857
8	17	35.1645	14	35.1336	2.2117
9	18	33.7848	14	35.2703	2.6182
10	22	34.1209	20	35.4833	2.3632
FD = 1.13					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	22	35.4024	21	36.2878	2.0391
2	22	33.6942	18	33.2266	2.0106
3	3	30	21	37.1720	2.5490
4	35	30	36	33.9745	21.645
5	18	34.7439	14	37.3528	2.5411
6	22	35.9432	28	30.7784	2.4130
7	20	30.4870	22	34.0506	2.3267
8	6	36.1463	18	33.2070	259.59
9	22	35.1351	18	34.9197	2.2877
10	22	34.5180	21	35.4222	1.9063
FD = 1.23					
RUN	Tube 1	Setting 1 [m]	Tube 2	Setting 2 [m]	FF [-]
1	36	33.2907	18	33.4665	141.42
2	21	35.8992	22	34.7436	1.9347
3	14	36.0288	20	32.5434	2.3157
4	14	36.4094	26	32.4798	2.4677
5	17	35.9356	28	31.6241	2.6303
6	18	35.1171	22	34.4385	1.9638

7	22	36.0636	14	36.6827	2.1992
8	6	35.8529	21	35.1220	2.4809
9	22	35.3513	14	35.0620	1.9529
10	22	34.6899	18	32.9260	2.0302