

**IL CONTROLLO IN TEMPO REALE
DELLE PRESSIONI NELLE RETI DI ACQUEDOTTO
AI FINI DELLA RIDUZIONE DELLE PERDITE IDRICHE**

Tesi per il conseguimento del titolo
di Dottore di Ricerca

Lorenzo Vetrano



UNIVERSITÀ DI CATANIA
Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale

Tesi per il conseguimento del titolo

**IL CONTROLLO IN TEMPO REALE
DELLE PRESSIONI
NELLE RETI DI ACQUEDOTTO
AI FINI DELLA RIDUZIONE
DELLE PERDITE IDRICHE**

Lorenzo VETRANO

Tutor:

Prof. Ing. Carlo MODICA

Coordinatore del Dottorato:

Prof. Ing. Giuseppe PEZZINGA

Sede consorziata:



Institute National des Sciences
Appliquées
(INSA) de Lyon

Catania, Dicembre 2011

*Spendiamo milioni e milioni
per cercare acqua su Marte
e non facciamo niente
per conservarla qui
e per cercarne di più
per quelli che hanno sete.*

José Luis Sampedro

INDICE

Abstract	1
Sommario	5
1 Introduzione	7
1.1 Premessa.....	7
1.2 Obiettivi	8
1.3 Contenuti	9
2 Le perdite idriche negli acquedotti	11
2.1 Classificazione e stima delle perdite idriche	12
2.2 Strategie di intervento	17
2.3 Limiti economici nella gestione delle perdite	19
2.4 L'individuazione delle perdite	21
3 La gestione del cielo piezometrico nelle reti di acquedotto	29
3.1 Relazione tra perdite idriche e pressioni di esercizio	30
3.1.1 Considerazioni sulle singole perdite da orifici	30
3.1.2 Relazione perdite-pressioni nei distretti o nelle reti.....	31
3.2 Il posizionamento e la taratura delle valvole di riduzione di pressione.....	33
3.2.1 La taratura con metodi classici di ottimizzazione	33
3.2.2 Gli algoritmi genetici	34
3.2.3 Disposizione ottimale delle valvole	37
3.3 Tecniche di controllo continuo delle pressioni.....	39
4 Tecniche per il controllo in tempo reale dei sistemi acquedottistici	41
4.1 Aspetti generali	41
4.2 Tecniche e strategie di controllo dei sistemi idrici	42
4.2.1 Tecniche fondamentali di controllo	42
4.2.2 Livelli di informazione e controllo	43
4.2.3 Livelli di automazione	45
4.3 I dispositivi e la rete hardware	46
4.3.1 Misuratori	48
4.3.2 Regolatori	53
4.3.3 Unità di controllo	58
4.3.4 Trasmissione delle informazioni	59
4.3.5 Il centro operativo e il sistema di controllo globale	60

5	La calibrazione dell'unità P: una strategia "numerica"	65
5.1	Le unità logiche di controllo PID.....	65
5.1.1	Generalità.....	65
5.1.2	Regole di Ziegler-Nichols.....	68
5.2	Strategia numerica di calibrazione dell'unità P.....	69
5.2.1	L'unità logica proporzionale P.....	70
5.2.2	Le equazioni.....	70
5.2.3	La calibrazione per il sistema idrico elementare (SHS).....	72
5.2.4	Applicabilità alle reti di acquedotto (WDN).....	74
5.2.5	Il parametro proporzionale per più valvole in rete.....	76
5.3	I risultati della calibrazione.....	77
5.3.1	Quadro delle simulazioni.....	77
5.3.2	L'equazione di regressione.....	78
5.3.3	Estensione ai casi di portata variabile.....	80
6	La calibrazione dell'unità P: una strategia "analitica"	83
6.1	Generalità.....	83
6.1.1	Le curve di previsione nel controllo dei sistemi idrici.....	83
6.1.2	L'equazione analitica per la calibrazione dell'unità P.....	86
6.2	Confronto tra strategia numerica ed analitica.....	88
6.3	La strategia analitica per portate variabili.....	89
6.3.1	Generalità.....	89
6.3.2	Unico valore di K_p per la regolazione.....	90
6.3.3	K_p auto-adattativo.....	91
7	Applicazione ad una rete di letteratura	95
7.1	Il modello di simulazione idraulica.....	95
7.2	La rete di Jowitt and Xu.....	97
7.2.1	Le caratteristiche.....	97
7.2.2	La calibrazione con le regole di Ziegler-Nichols.....	100
7.3	Applicazione della strategia di calibrazione numerica.....	102
7.3.1	Determinazione del valore K_p^*	102
7.3.2	Risultati delle simulazioni della rete a portata variabile.....	103
7.3.3	La regolazione di più valvole in rete.....	106
7.3.4	RTC della rete in differenti condizioni di erogazione.....	110
7.4	Applicazione della procedura di auto-calibrazione "analitica".....	113
7.4.1	Implementazione della procedura "analitica".....	113
7.4.2	La procedura "analitica" nel caso di più valvole in rete.....	114
7.5	Gli effetti sul RTC del "rumore" nei segnali di pressione.....	117
7.6	Confronto tra gli effetti di un'idro-valvola stabilizzatrice della pressione di valle e una in RTC.....	119
8	Conclusioni	123
	Ringraziamenti	127
	Elenco delle tabelle	129
	Elenco delle figure	131
	Bibliografia	135

Abstract

Water losses today are the main problem in correct distribution networks management, causing severe economic, social and environmental imbalances, like rising prices for users, exacerbation of conditions of water deficit and worsening water supply environmental conditions.

Today, in Italy, the volume of water required by users is increasing, but at the same time the available flow of potable water tends to decrease, due to pollution and overexploitation of sources as well as the rise of the standards of quality required for drinking use water - that reduce the status of sources nowadays usually used.

In order to adequately protect potable resources - considering that more than a third of the volume of water get lost in the distribution networks - appropriate strategies for concrete and effective reduction of water losses must be carried out.

The containment of losses has been conducted, until now, by searching and repairing individual points of loss, that is an effective technique - especially for huge losses - but is characterized by extremely high costs in terms of specialized figures. Moreover, in this kind of strategies, the increase of actions in water losses research do not give similar impacts in terms of saving water.

On the contrary, nowadays, strategies for containing losses allow to obtain distributed results throughout the whole network. These strategies use the direct relationship between water losses and pressures in distribution networks to develop methodologies that allow obtaining a considerable saving of water in the whole network. The use of pressure reduction valves in distribution network specific points allows both big water leakage detection and background losses - that are very difficult to identify and significantly effective in the whole volume of lost water. Such measures are distinguished by cost-effectiveness and efficiency. In addition, the valves contain pressures ensuring a minimum level of stress and wear of water distribution equipment, reducing the chance of breakage and increasing their life.

Placement and optimal adjustment of pressure reduction valves have to be carefully taken into account. Various optimization methods can be used in pressure reduction valves placement and calibration to minimize network water losses, in compliance with minimum pressures condition. These optimization techniques require knowledge about distribution rules over time, spatial and temporal flow distribution and reservoirs water levels.

Optimal valves placement is low influenced by distribution condition variability so it allows using optimization models in real networks too. Optimal adjustment, instead, is

hard influenced by distribution condition variability so it does not allow optimization models use in real networks, where distribution condition are unknown.

In optimal pressure reduction valves adjustment real-time control techniques can be used. They can continuously and automatically set devices - only based on pressure measurements - guaranteeing desired values of piezometric load maintenance in network control nodes, varying the conditions of distribution.

The real-time control techniques (RTC) use high technological specific solutions, based on the process characteristics that have to be controlled. It is necessary, therefore, to a priori plan the hardware and software components. The main step in an RTC system implementation is the choice of logical control units.

The proportional logical units - characterized by intrinsic qualities of reliability and ease of use – are appropriate for control of pressure reduction valves in water distribution networks. The logical units calibration, as a function of the characteristics of the system to be controlled, is necessary to ensure effective adjustment of the control process.

Two calibration strategies for proportional logical unit calibration - as a function of the specific characteristics of the water system to be controlled - are proposed and tested in the present PhD Thesis.

The first strategy is based on the results of a numerical survey carried out taking into account an elementary water distribution system. This analysis allowed highlighting the relationship between the optimal value of the parameter and the main features of the system. An a-dimensional approach has been used for results generalization, taking into account real word values.

Therefore, a regression function between the proportional parameter and system characteristics to control was developed. Also, a simple procedure for regression relationship application to real distribution networks was proposed.

The second calibration strategy is based, conversely, on physical-analytical considerations, that have allowed calculating – through a direct relationship - the correct value of the proportional parameter as a function of the network's response to the action of the valve. This relationship is very easy to use and so is suitable in auto-adaptive calibration procedure. This procedure enables to recalculate the correct value of the proportional parameter whenever a variation of the hydraulic behaviour of the system is detected.

Both calibration strategies were applied to the control of a network well known in the literature. For these applications, a simulation model of hydraulic networks, specially modified to take into account the effect of real-time control of valves, was used.

Hydraulic simulations have been done in one or more pressure reduction valves control. The obtained results show that both strategies allowed to calculate proportional parameter values for extremely effective valve adjustments - in achieving and maintaining the desired pressure at the control nodes in the distribution network. The auto-calibration procedure returns extremely satisfactory results, insofar as the continuously auto-determined values of the proportional parameter during the simulation reflect exactly the changes of system distribution conditions.

Finally, the comparison between the results obtained from a hydro-valve for stabilization of pressure on the downward flow and a real time controlled valve have been presented, and it show the reasons why the latter ones have to be preferred.

Sommario

Le perdite idriche rappresentano oggi il principale problema da affrontare per una corretta gestione delle reti di acquedotto. Ingenti perdite provocano infatti, nei sistemi acquedottistici, forti squilibri in termini economici, sociali e ambientali. Tra le conseguenze inevitabili di tali squilibri è possibile citare l'aumento delle tariffe per gli utenti, causato dall'incidenza dei costi di produzione sui volumi d'acqua effettivamente consegnati, l'inasprimento delle condizioni di deficit idrico e il peggioramento delle condizioni ambientali delle fonti di approvvigionamento.

Bisogna inoltre considerare che oggi, in Italia, a fronte di un aumento dei volumi idrici domandati dalle utenze, le portate disponibili d'acqua per uso idropotabile tendono a diminuire a causa dell'inquinamento e del sovrasfruttamento delle fonti nonché dell'innalzamento degli standard qualitativi richiesti per le acque ad uso potabile che provoca il declassamento di fonti fino ad oggi normalmente utilizzate.

In tale contesto ben si comprende come, tenuto conto che oggi più di un terzo dei volumi idrici immessi in rete vengono persi nelle reti di distribuzione, al fine di tutelare adeguatamente le risorse potabili, sia necessario mettere in atto strategie idonee per una concreta ed efficace riduzione delle perdite idriche.

In passato il contenimento delle perdite veniva condotto tramite strategie puntuali, ovvero ricercando e riparando i singoli punti di perdita; tale approccio, sicuramente efficace soprattutto per le perdite ingenti, risulta caratterizzato da costi estremamente elevati, in quanto la fase di individuazione puntuale delle perdite, seppur condotta con le più moderne tecnologie, deve essere estesa globalmente a tutta la rete, comportando l'impiego di personale specializzato per tempi molto lunghi. Inoltre le strategie puntuali di ricerca perdite seguono la legge dei rendimenti decrescenti, secondo la quale all'aumentare delle azioni intraprese diminuisce l'impatto in termini di risparmio idrico.

Alle tecniche tradizionali è possibile associare strategie di contenimento delle perdite che consentono di ottenere risultati distribuiti su tutta la rete. Sfruttando la relazione diretta esistente tra le perdite idriche e le pressioni di esercizio nelle reti di acquedotto, è possibile mettere a punto metodologie che consentono di ottenere un notevole risparmio idrico diffuso su tutta la rete, mediante l'inserimento, in alcuni tratti, di apposite valvole di riduzione di pressione. Tali interventi si distinguono per economicità ed efficacia in quanto hanno un effetto di riduzione non solo delle perdite ingenti, che devono essere comunque individuate e riparate, ma anche delle perdite di sottofondo diffuse, difficilmente individuabili in maniera puntuale; tali perdite diffuse, seppur prese singolarmente risultino di modesta entità in termini di portata, nel complesso incidono notevolmente sui volumi idrici perduti. Inoltre, la possibilità di contenere le pressioni di

esercizio consente di garantire un minor livello di sollecitazioni e usura degli impianti delle reti di distribuzione idrica, riducendo così le probabilità di rottura e aumentandone la vita utile.

Nelle tecniche di contenimento delle pressioni particolare attenzione va posta in merito al posizionamento ed alla regolazione ottimale delle valvole di riduzione della pressione. A tal fine sono stati utilizzati metodi di ottimizzazione, di varia natura, ed è stato mostrato come sia possibile determinare la posizione, ovvero il ramo di inserimento, e la taratura delle valvole di riduzione di pressione, tali da minimizzare le perdite idriche in rete, nel rispetto dei vincoli sulle pressioni minime di esercizio.

Tali tecniche di ottimizzazione sono però basate sull'ipotesi di conoscenza delle condizioni di erogazione del sistema nel tempo, ovvero della distribuzione spaziale e temporale delle portate ai nodi e delle variazioni dei livelli idrici nei serbatoi, condizione non soddisfatta nei sistemi idrici reali.

Per quanto riguarda il posizionamento ottimale è stato osservato come l'influenza della variabilità delle condizioni di erogazione del sistema abbia scarsa rilevanza sulla definizione dei tratti ottimali in cui inserire le valvole, confermando la possibilità di utilizzare i risultati dei modelli di ottimizzazione anche nei sistemi reali.

Relativamente al problema della regolazione, invece, l'ipotesi di conoscenza delle condizioni di erogazione della rete non viene soddisfatta nei sistemi idrici reali, per cui i risultati dei metodi di ottimizzazione, seppur conservino una valenza teorica, ai fini pratici risultano avere una scarsa utilità.

Al fine di risolvere il problema della regolazione delle valvole di riduzione di pressione, è possibile adottare tecniche di controllo in tempo reale che consentano di settare i dispositivi in maniera continua e automatica, sulla base di sole misure di pressione, garantendo così, al variare delle condizioni di erogazione, il mantenimento dei valori desiderati del carico piezometrico nei nodi di controllo della rete.

Le tecniche di controllo in tempo reale (RTC) prevedono l'implementazione di soluzioni specifiche, dall'alto contenuto tecnologico, in funzione delle caratteristiche del processo che si intende controllare; risulta necessaria, pertanto, una preventiva progettazione dei componenti hardware e software.

Tra queste la scelta delle unità logiche di controllo costituisce il principale passo nell'implementazione di un sistema di RTC. Le unità logiche proporzionali, grazie alle intrinseche qualità di affidabilità e di semplicità d'uso, si prestano bene al controllo delle valvole di riduzione di pressione nelle reti di acquedotto. Per garantire regolazioni efficaci del processo di controllo, è necessaria una preventiva calibrazione delle unità logiche in funzione delle caratteristiche del sistema da controllare.

Nella presente lavoro di tesi vengono proposte e testate due strategie di calibrazione che consentono di tarare il parametro dell'unità logica proporzionale in funzione delle caratteristiche specifiche dalla rete idrica da controllare.

La prima strategia è basata sui risultati di un'indagine numerica effettuata prendendo in considerazione un sistema idrico elementare; tale analisi ha consentito di mettere in evidenza la relazione tra il valore ottimo del parametro e le principali caratteristiche del sistema. Per la generalizzazione dei risultati, si è utilizzato un approccio adimensionale, considerando campi delle grandezze adimensionali utili per le pratiche applicazioni; è stata dunque messa a punto una relazione di regressione che lega, tramite grandezze

adimensionali, il valore corretto del parametro proporzionale alle caratteristiche del sistema da controllare. Inoltre viene proposta una semplice procedura per l'applicazione della relazione di regressione anche alle reti di distribuzione reale.

La seconda strategia di calibrazione è invece basata su delle considerazioni fisico-analitiche che hanno consentito di ottenere una relazione per il calcolo diretto del valore corretto del parametro proporzionale, in funzione della misura della risposta della rete all'azione della valvola. Grazie alla sua semplicità d'uso tale relazione ben si presta ad essere utilizzata per implementare una procedura di calibrazione auto-adattiva; tale procedura consente di ricalcolare il valore corretto del parametro proporzionale ogni qual volta nella rete idrica venga rilevato una variazione del comportamento idraulico del sistema.

Entrambe le strategie di calibrazione sono state applicate per il controllo di una rete ben nota in letteratura. Per l'applicazione è stato adoperato un modello di simulazione idraulica delle reti appositamente modificato per tenere conto dell'effetto del controllo in tempo reale delle valvole.

Le simulazioni idrauliche sono state condotte nel caso di controllo di una o più valvole inserite in rete; i risultati hanno mostrato come entrambe le strategie abbiano consentito di calcolare valori del parametro proporzionale tali da restituire regolazioni della valvola estremamente efficaci in termini di raggiungimento e mantenimento della pressione desiderata ai nodi di controllo della rete. In particolare la procedura di auto-calibrazione restituisce risultati estremamente soddisfacenti in quanto i valori del parametro proporzionale auto-determinati in continuo, durante la simulazione, rispecchiano pedissequamente le variazioni delle condizioni di erogazione del sistema.

Infine viene mostrato il confronto tra i risultati ottenibili da un'idro-valvola per la stabilizzazione della pressione di valle e una valvola controllata in tempo reale, mettendo così in luce le motivazioni per cui tale seconda ipotesi è da preferire.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Premessa

Le perdite d'acqua rappresentano uno dei principali problemi nella gestione delle reti acquedottistiche. E' oramai ben noto il legame esistente tra tali perdite e le pressioni di esercizio delle reti di distribuzione; in particolare, pressioni di esercizio eccessive possono provocare, non solo l'aumento dei volumi idrici persi, ma anche un più rapido deterioramento degli impianti di distribuzione.

Al fine di mitigare gli effetti di tale problema è possibile adoperare opportune valvole di regolazione che consentano di mantenere i valori delle pressioni vicini a quelli minimi necessari per il soddisfacimento della domanda idrica delle utenze in ogni condizione di esercizio della rete.

In letteratura sono presenti diversi studi riguardanti il posizionamento e la regolazione ottimale di valvole riduttrici di pressione atte a minimizzare le perdite idriche in acquedotto. In particolare, per quanto riguarda il posizionamento ottimale delle valvole, sono stati adottati metodi basati sia su procedure euristiche (Pezzinga & Gueli, 1999) sia su algoritmi genetici (Reis et al., 1997). Per quanto attiene al problema della regolazione delle valvole, la ricerca delle aperture ottimali nel rispetto dei vincoli sulle altezze piezometriche è stata effettuata mediante algoritmi di ottimizzazione di diverso tipo (Jowitt & Xu, 1990; Vairavamoorthy & Lumbers, 1998; Araujo et al. 2006).

Da un punto di vista applicativo, tali studi hanno mostrato come sia possibile ridurre apprezzabilmente le perdite in rete utilizzando i risultati di modelli numerici per l'ottimizzazione del posizionamento delle valvole riduttrici di pressione e della loro regolazione a intervalli di tempo prefissati, sulla base dell'andamento giornaliero medio della domanda e dei carichi nei serbatoi.

Tali modelli di ottimizzazione sono però basati sull'ipotesi di conoscenza della distribuzione spaziale e dell'andamento temporale delle portate erogate; nel caso in cui, come accade nelle situazioni reali, le distribuzioni spaziali e gli andamenti temporali si discostino da quelli ipotizzati, la soluzione ottimale trovata potrebbe risultare solamente "teorica" e di scarsa utilità ai fini pratici.

Sembra quindi opportuno utilizzare sistemi che consentano di regolare il cielo piezometrico, nelle reti di acquedotto, intervenendo automaticamente e in maniera continua sulle valvole di regolazione al variare delle condizioni idrauliche della rete.

Un possibile approccio, tecnologicamente avanzato, è basato sull'adozione di tecniche di controllo in tempo reale (RTC) (Campisano et al., 2010) e, in particolare, sull'utilizzo

di unità logiche di controllo, quali le unità proporzionali P , (Schütze et al., 2004) che consentono la regolazione delle valvole sulla base di misure di pressione in rete.

Per l'utilizzo di tali unità logiche però, è necessaria una preventiva calibrazione dell'unità proporzionale, in funzione delle caratteristiche del sistema, al fine di ottenere regolazioni efficaci.

1.2 Obiettivi

Obiettivo del presente lavoro di tesi è lo studio delle tecniche e delle strategie per il controllo in tempo reale delle pressioni nelle reti di acquedotto, al fine di ridurre le perdite idriche mediante l'utilizzo di apposite valvole di regolazione.

Tali valvole vengono appositamente inserite in modo da provocare perdite di carico concentrate e ridurre così le pressioni in rete.

Le tecniche di controllo in tempo reale consentono di regolare, in maniera automatica e continua, le valvole di regolazione di pressione, in modo da garantire in rete valori desiderati di pressione pressoché costanti, a prescindere dalle variazioni delle condizioni di erogazione del sistema, con conseguente minimizzazione delle perdite idriche e delle sollecitazioni sugli impianti di distribuzione.

I benefici apportati dai sistemi di RTC sono tanto più significativi quanto più la rete idrica subisce variazioni orarie, giornaliere o stagionali in termini di condizioni di erogazione.

Nell'implementazione di un sistema di RTC, oltre alle soluzioni tecnologiche, è necessario stabilire quale logica di controllo adottare; l'unità logica proporzionale P si distingue per la semplicità d'uso e per l'affidabilità del controllo effettuato.

Tali unità logiche, al fine di garantire regolazioni efficaci, necessitano di una preventiva calibrazione in funzione delle specifiche caratteristiche del sistema da controllare. In tale contesto è possibile adoperare tecniche di calibrazione *try&error*, che risultano però di complessa applicazione nelle reti di acquedotto.

Nell'ambito del presente lavoro di tesi sono state messe a punto due strategie di calibrazione dell'unità logica proporzionale, basate su considerazioni fisiche del problema in esame e che, di conseguenza, consentono di tenere conto delle caratteristiche specifiche della rete idrica da controllare.

In particolare la prima strategia è basata su un'indagine numerica, la quale ha consentito di ottenere una relazione di regressione che lega il valore del parametro proporzionale a grandezze adimensionali che descrivono le caratteristiche fisiche del sistema da controllare.

La seconda strategia invece è basata su considerazioni fisico-analitico, e consente di calibrare il parametro proporzionale in continuo, al varare delle condizioni di erogazione del sistema.

Viene mostrato come, adoperando tarature corrette per l'unità logica di controllo, sia possibile ottenere regolazioni ottimali in termini di pressione ai nodi di controllo.

Le due strategie sono state testate su una rete ben nota in letteratura (Jowitt & Xu, 1990) nel caso di una o più valvole, tenendo anche in considerazione variazioni temporali delle portate erogate differenti da quelle di riferimento.

Viene inoltre mostrata la differenza, in termini di regolazione del cielo piezometrico della rete, tra i risultati ottenibili tramite una valvola per la stabilizzazione della pressione di valle, soluzione di più semplice implementazione ma dalle performance ridotte, e quelli ottenibili tramite una valvola controllata in tempo reale.

1.3 Contenuti

Il presente studio è stato articolato in tre parti.

Nella prima parte (capitoli 2, 3 e 4) vengono prese in esame le perdite idriche, le relative tecniche di riduzione, con particolare riguardo alle strategie legate al contenimento delle pressioni, e le tecniche di controllo delle reti di acquedotto. In particolare, il *capitolo 2* è dedicato alle perdite idriche; per una migliore comprensione del fenomeno, viene posta l'attenzione sulla classificazione delle varie componenti delle perdite, mostrando i principali criteri di stima. Vengono inoltre passati in rassegna le principali strategie di riduzione, ivi comprese le tecniche di individuazione, con particolare attenzione ai limiti economici di cui si deve tener conto quando si intraprendono strategie di riduzione delle perdite. Nel *capitolo 3* invece, dopo aver preso in esame le relazioni che legano le pressioni di esercizio delle reti alle perdite idriche, vengono esaminate le modalità e le tecniche per una corretta ed efficace gestione del cielo piezometrico nelle reti di distribuzione idrica; in particolare viene posta l'attenzione sugli studi, proposti da vari autori, in merito ai metodi di ottimizzazione per il corretto posizionamento e regolazione delle valvole di riduzione di pressione. Nel *capitolo 4* vengono esaminate le tecniche di controllo delle reti di acquedotto; in particolare l'attenzione è stata focalizzata sulle possibili strutture e strategie con cui è possibile effettuare il controllo di un sistema idrico, in funzione delle caratteristiche del sistema, delle grandezze che si desidera controllare e del livello di automazione desiderato, ma anche con riguardo ai dispositivi tecnologici quali misuratori, attuatori, reti di trasmissione e controller.

Nella seconda parte (capitoli 5 e 6) viene posta l'attenzione sull'unità logica di controllo proporzionale e vengono proposte due strategie di calibrazione del relativo parametro. In particolare nel *capitolo 5*, dopo una breve descrizione delle unità logiche di controllo di tipo PID (Proportional Integrative Derivative) e dei relativi metodi classici di calibrazione, viene proposta una strategia di calibrazione dell'unità logica proporzionale P da utilizzare appositamente per il controllo delle valvole di regolazione nelle reti di acquedotto; la strategia, basata sui risultati di un'indagine numerica operata su un sistema idrico elementare, fornisce una relazione di regressione adimensionale che consente di determinare il valore del parametro proporzionale in funzione delle caratteristiche specifiche della rete di acquedotto da controllare. Nel *capitolo 6* viene presentata un'altra strategia di calibrazione dell'unità logica proporzionale per il controllo delle valvole di regolazione della pressione; questa seconda strategia è basata su delle considerazioni di carattere fisico-analitico, ed è caratterizzata da una grande semplicità d'uso; nel capitolo viene mostrato come tale strategia possa anche essere implementata per la calibrazione auto-adattativa del parametro proporzionale, ovvero come, durante la regolazione, sia possibile determinare automaticamente il valore del parametro proporzionale al variare delle condizioni di erogazione della rete, aumentando così le già notevoli doti di

adattabilità del sistema di controllo, anche in condizioni di estrema variabilità delle portate.

Infine nella terza parte (capitolo 8) dopo una breve descrizione del modello di simulazione idraulica utilizzato e delle caratteristiche della rete di letteratura, viene mostrata l'efficacia delle due strategie di calibrazione dell'unità logica proporzionale. In particolare, tramite i risultati di apposite simulazioni idrauliche, viene mostrato come i valori determinati per il parametro proporzionale restituiscano regolazioni estremamente efficaci in termini di pressione ai nodi di interesse. Viene inoltre mostrata l'affidabilità e l'adattabilità del sistema di RTC a condizioni di erogazione del tutto differenti da quelle imposte per la calibrazione del parametro, tenendo anche in considerazione possibili disturbi nei segnali di pressione ai nodi. Infine viene testata l'efficacia del sistema di auto-calibrazione relativamente alla rete in esame e viene mostrato un confronto tra i risultati ottenibili con l'RTC di una valvola di regolazione e quelli relativi ad una idrovalvola di stabilizzazione del carico di valle.

Capitolo 2

Le perdite idriche negli acquedotti

La questione delle perdite idriche costituisce oggi uno dei principali nodi da affrontare nella gestione degli acquedotti. Fino a qualche anno fa le tecniche di contenimento delle perdite venivano attuate esclusivamente da soggetti particolarmente virtuosi o in specifiche condizioni di criticità, mentre in generale ci si limitava a riparare le perdite a vista o quelle particolarmente ingenti.

Oggi invece, se si pensa che mediamente l'entità delle perdite è superiore ad un terzo dell'acqua potabile complessivamente immessa in rete, si comprende come il problema delle perdite idriche sempre più spesso assuma il carattere dell'emergenza; infatti di fronte ad una continua espansione dei consumi, le risorse disponibili, in termini di acque di buona qualità, restano immutate o addirittura diminuiscono a causa delle contaminazioni ambientali, del sovrasfruttamento delle falde nonché dell'aumento degli standard qualitativi richiesti per le utenze idropotabili, secondo i quali vengono classificate come non idonee fonti da sempre utilizzate.

Le perdite idriche possono dunque avere sulla società impatti con implicazioni di varia natura, che possono essere così riassunti e classificati:

- *economico-finanziarie*: un elevato livello di perdite idriche provoca un deficit tra i costi, sostenuti per la captazione e l'adduzione delle acque, e i ricavi, dovuti all'effettiva fornitura del servizio idrico alle utenze. Nell'ottica di determinare le tariffe (Legge 36/94) in modo da remunerare i costi del servizio idrico, ivi compresi i capitali impiegati per la realizzazione delle infrastrutture, tale circostanza ha l'effetto di provocare un aumento dei prezzi dell'acqua nonché una diminuzione della disponibilità di fondi per effettuare nuovi investimenti.
- *etico-sociali*: ingenti perdite dei sistemi acquedottistici possono determinare condizioni di deficit idrico nelle reti di distribuzione nonché, come già accennato, un aumento delle tariffe del servizio; in generale un elevato livello di perdite idriche provoca una diminuzione, per le utenze, del rapporto livello di servizio/tariffe. Tale circostanza risulta in contrasto con il principio di *solidarietà* è necessario affrontare la gestione del servizio idrico, come per altro sancito nella legge 36/94.

- *ambientali*: le perdite idriche provocano inevitabilmente un aumento dello sfruttamento delle fonti di approvvigionamento, in quanto non può essere ridotto il livello di soddisfacimento della domanda. Spesso accade addirittura che, a parità di utenze servite, si renda necessaria l'individuazione di nuove fonti di approvvigionamento o, in alternativa, il sovrasfruttamento prolungato di quelle disponibili. Tale circostanza risulta chiaramente in contrasto con il principio di sostenibilità di uso della risorsa, sancito nella legge 36/94.

Un grande passo in avanti nello sviluppo dei metodi di best-practice di analisi e predizione delle perdite idriche si è avuto tra il 1999 e il 2000 grazie alla pubblicazione di un manuale ad opera della Task Force della International Water Association (IWA) relativo a "Water Losses" e "Performance Indicators". L'approccio pratico proposto per il controllo delle perdite nei sistemi di distribuzione, ponendo l'accento sulla fondamentale importanza del controllo delle pressioni e sulla necessità di distinguere le differenti componenti delle perdite fisiche, ha rappresentato per molti paesi un'importante stimolo a migliorare le loro performance nella gestione delle perdite idriche. I nuovi indicatori di performance, proposti dalla IWA, hanno consentito più razionali confronti in termini di controllo delle perdite fra gestori di sistemi di caratteristiche differenti e operanti in paesi diversi.

Le principali indicazioni fornite nelle esperienze dell'IWA sono state recepite in Italia anche a livello normativo nel D.P.C.M. 04/03/1996 e in particolare nel decreto ministeriale 99/97.

2.1 Classificazione e stima delle perdite idriche

I problemi connessi alla presenza delle perdite sono dovuti in parte al fatto che non tutta l'acqua immessa in rete raggiunge le utenze, in parte al mancato pagamento di tutta l'acqua consumata e, infine, alla difficoltà di fornire definizioni standard e univoche per le perdite. E' molto importante infatti disporre di una terminologia universalmente accettata, soprattutto al fine di poter confrontare dati di realtà diverse a livello sia nazionale che internazionale.

Prima di tutto è necessario distinguere le perdite dagli **sprechi**; quest'ultima quantità può essere definita come quel volume d'acqua di cui non si fruisce in maniera corretta. Il concetto di spreco è fortemente legato alla sensibilità di ogni singolo individuo e, di conseguenza, una sua quantificazione risulta complessa e comunque relativa.

Tra gli sprechi è sicuramente possibile inserire le **perdite idriche reali** o fisiche; l'IWA ha definito le perdite reali come "i volumi annuali persi dai sistemi di distribuzione e di adduzione attraverso tutti i tipi di rotture, perdite e sfiori presenti sulle condotte, sui serbatoi e sui collegamenti di servizio, fino al contatore del singolo utente". Anche tale quantità può risultare di difficile stima, ma verrà mostrato come specifiche tecniche ne consentano una quantificazione.

Le **perdite amministrative** invece sono le perdite calcolate come la differenza tra i volumi immessi in rete e quelli contabilizzati alle utenze. Tale quantità risulta di facile misurazione ma si discosta dal concetto di perdita idrica reale.

Per comprendere meglio è possibile fare riferimento alle definizioni sintetiche fornite dalla IWA:

- *volume immesso in rete*: è il volume annuo complessivamente immesso in rete;
- *consumi autorizzati*: è il volume annuo, misurato e/o non misurato, prelevato dai clienti autorizzati. Comprende l'acqua esportata verso altri sistemi idrici, l'acqua utilizzata dal gestore per motivi di servizio e le perdite a valle dei contatori dei clienti;
- *acqua non fatturata* (NRW-Non Revenue Water): è la differenza tra volume immesso in rete e consumi autorizzati fatturabili. NRW è costituito da consumi autorizzati non fatturati e da perdite idriche;
- *perdite idriche*: sono la differenza tra il volume immesso in rete e i consumi autorizzati, e sono costituite da perdite apparenti e perdite reali;
- *perdite apparenti*: sono costituite da consumi non autorizzati e da tutti i tipi di errori di misura
- *perdite reali*: sono il volume annuo perso da tutti i tipi di perdita della rete, compresi i serbatoi e le prese fino al contatore del cliente.

Le definizioni soprariportate possono essere adottate per la costruzione del **bilancio idrico annuale top-down IWA**, secondo lo schema riportato in Tabella 2.I.

Tabella 2.I: Componenti del bilancio idrico standard proposto dall'IWA

Volume immesso nella rete	Consumo autorizzato	Consumo autorizzato fatturato	Consumo fatturato misurato (inclusa l'acqua esportata)	Acqua Fatturata	
			Consumo fatturato non misurato		
	Consumo autorizzato non fatturato	Consumo autorizzato non fatturato	Consumo misurato non fatturato	Acqua non Fatturata (NRW)	
			Consumo non misurato non fatturato		
	Perdite Idriche	Perdite apparenti	Perdite apparenti		Consumo non autorizzato
					Errori di misura
		Perdite reali	Perdite reali		Perdite nelle condotte di adduzione e/o di distribuzione
					Perdite e sfiori ai serbatoi
	Perdite reali	Perdite sulle prese fino al contatore di utenza			

Il bilancio idrico annuale top-down, proposto dalla IWA, è uno dei principali metodi standardizzati per la stima delle perdite idriche e viene raccomandato in varie pubblicazioni (Thornton & al., 2002; Farley & Trow, 2003). Anche in Italia, con il Decreto Ministeriale 99/97, è stata adottata una metodologia per il bilancio idrico molto simile a quella proposta da IWA ed è stata imposta la redazione dei bilanci idrici da parte degli enti gestori.

Per la corretta definizione di un bilancio idrico è fondamentale che vengano misurati in modo affidabile tutti i volumi di acqua e in particolare il volume di acqua immesso in rete; anche le perdite apparenti, costituite dai consumi non autorizzati e da tutti i tipi di

errore di misura, sebbene di complessa valutazione, hanno una grande rilevanza per una corretta redazione del bilancio idrico.

Un'organizzazione efficiente dovrebbe dare la necessaria importanza alla scelta ed installazione corretta dei contatori, all'affidabilità dei misuratori alle basse portate, alla manutenzione e sostituzione programmata dei misuratori e ad un'adeguata gestione dei dati di misura. E' inoltre importante documentare e stimare gli usi autorizzati, ma non fatturati, al fine di ridurne l'entità, qualora possibile.

Chiaramente, a prescindere dalle metodologie di stima adottate, tutti i dati di input del bilancio idrico misurati e stimati sono soggetti ad errori ed incertezze più o meno rilevanti; per tale motivo può essere opportuno adottare metodi pratici per la riduzione di tali incertezze quale ad esempio l'imposizione di adeguati limiti di confidenza. I software più aggiornati per il calcolo del bilancio idrico consentono di valutare tutte le componenti dell'acqua non fatturata e gli indicatori di performance IWA con i limiti di confidenza, aumentando così la complessiva affidabilità dei calcoli (Lambert, 2001; Fantozzi, 2008). Il bilancio annuale top-down consente di determinare il volume totale delle perdite reali (CARL-Current Annual Real Losses), ma non fornisce alcuna informazione sulle componenti di questo volume totale di perdita.

Infatti esso non distingue tra il volume di perdita reale dovuto alle rotture rilevabili (potenzialmente limitabile attraverso la tempestività e la qualità degli interventi e il controllo attivo delle perdite) e il volume di perdite reali dovuto alle perdite di sottofondo (riducibile solo attraverso la gestione della pressione o il rinnovamento costante della rete).

Per integrare tale lacuna è possibile affiancare al bilancio idrico altre tecniche di stima delle perdite.

Tra queste l'analisi delle portate notturne (*bottom-up*) può essere messa in atto in sistemi suddivisi in distretti con misurazioni in continuo delle portate; tale tecnica consente di verificare, in modo indipendente, il volume di perdite reali, ma anche in tali casi i calcoli sono soggetti ad errori ed imprecisioni.

Un altro approccio, proposto da Lambert, è l'applicazione del metodo BABE (Background And Bursts Estimates) il quale, tramite l'analisi delle diverse componenti delle perdite reali, consente di predire con ragionevole accuratezza, per ogni sistema, quale è il livello di perdita inevitabile per ogni singola componente del sistema idrico, ad ogni livello di pressione; tale livello è indicato come *perdite annuali inevitabili* (UARL - Unavoidable Annual Real Losses) e rappresenta il più basso volume tecnicamente raggiungibile di perdite reali nei sistemi ben gestiti.

Il metodo BABE, utilizzato con successo in numerosi studi in vari paesi del mondo, considera le perdite reali suddivise in tre diverse tipologie:

- *perdite di sottofondo*, ovvero le perdite generalmente localizzate nelle giunzioni e agli allacci alle utenze, troppo piccole per essere localizzate e solitamente inferiori a 0.25 l/s;
- *perdite da rotture segnalate*, ovvero le perdite affioranti in superficie generalmente di breve durata, in quanto riparate in tempi brevi, e spesso causa di deficienze distributive;
- *perdite da rotture non segnalate*, ovvero le perdite nascoste, generalmente intense e di lunga durata che possono essere localizzate solo tramite apposita ricerca.



Figura 2.1: Immagini di tre tipologie di perdite a) perdite di sottofondo b) perdite da rotture non segnalate c) perdite da rotture segnalate

I valori specifici di sistema di UARL (in litri/giorno) possono essere calcolati utilizzando la formula sviluppata dalla IWA (Lambert, 2000):

$$UARL = (18l_{pl} + 0.8N_{all} + 25l_{pr})H \quad 2.1$$

dove l_{pl} è la lunghezza delle condotte principali pubbliche in km, N_{all} è il numero di allacci, l_{pr} è la lunghezza delle condotte private in km e H è il carico piezometrico medio in metri. Tale equazione, basata sull'analisi delle componenti delle perdite reali per sistemi ben gestiti e con buone infrastrutture, si è dimostrata valida in diverse condizioni (McKenzie & Lambert, 2002) e rappresenta il più affidabile indicatore delle perdite reali inevitabili. La formula è stata validata per sistemi con le seguenti caratteristiche:

- $(N_{all} + 20l_{pl}) > 3000$
- $H > 25 \text{ m}$
- numero di prese per Km in condotta superiori a 20.

L'approccio dell'IWA prevede anche l'utilizzo di diversi indicatori di prestazione da adoperare sia per le analisi di base che per quelle di dettaglio; in Tabella 2.II vengono riportati gli indicatori di prestazione (PI-Performance Indicator) per le perdite reali e per l'acqua non fatturata (Alegre et al., 2000).

Tabella 2.II: Indicatori di performance IWA per le perdite e l'acqua non fatturata (Fantozzi, 2008)

Componente	Tipo	PI di base	PI di dettaglio
Acqua non fatturata (NRW)	Finanziario	Volume di NRW come percentuale del volume in ingresso nel sistema	Valore di NRW come percentuale del costo di esercizio del sistema
Perdite reali	Risorse idriche	Volume di perdite reali come percentuale del volume in ingresso del sistema	
Perdite reali (questo PI è calcolato per i giorni in cui il sistema è in pressione per tenere in conto gli eventuali effetti della fornitura discontinua)	Operativo del sistema	litri/presa/giorno (per sistemi con più di 20 prese/km) ----- m ³ /km/giorno (per sistemi con meno di 20 prese/km)	Indice di perdita infrastrutturale ILI=CARL/UARL
Perdite apparenti	Operativo		m ³ /presa/anno
Perdite idriche	Operativo	m ³ /presa/anno	

Il rapporto, in valore, tra l'acqua fatturata e quella complessivamente immessa in rete viene raccomandato dall'IWA come un indicatore di prestazione di tipo finanziario relativamente ai volumi idrici che non vengono fatturati a causa delle perdite reali e delle perdite apparenti.

Per quanto riguarda le perdite reali, viene tradizionalmente utilizzato come indicatore tecnico di performance il rapporto in volume tra l'acqua persa e quella complessivamente immessa in rete. Tale indicatore però non tiene conto di una serie di parametri necessari per una precisa valutazione del problema nello specifico acquedotto e per la definizione della strategia e delle tecnologie più appropriate di intervento; tra questi il numero di prese, la lunghezza della rete di distribuzione, la lunghezza delle prese tra lo stacco dalla rete e il contatore, la percentuale di tempo durante l'anno in cui la rete è in pressione, la pressione operativa media, le condizioni delle condotte, i materiali che le costituiscono, la frequenza delle rotture, ecc.

Al fine di superare tali deficienze è stato sviluppato un indicatore di prestazione operativo di dettaglio per le perdite reali chiamato ILI (Infrastructure Leakage Index) o *indice di perdita infrastrutturale*, definito come:

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \quad 2.2$$

e discusso in maggiore dettaglio in Lambert (2000). L'ILI misura quanto efficacemente vengano gestite le perdite reali con un dato regime di pressioni di esercizio; tale indice pertanto non tiene conto delle strategie di diminuzione delle perdite legate al controllo delle pressioni, che verranno meglio esaminate in seguito.

Identificati il livello di efficienza, utilizzando gli indicatori di performance, è possibile analizzare i dati ed identificare le priorità di strategia.

In questa attività può essere utile fare riferimento alle raccomandazioni del World Bank Institute – WBI (Seago et al, 2005); in Tabella 2.III si riporta una matrice obiettivo,

introdotta dal WBI, per classificare le performance nella gestione delle perdite reali in funzione dei valori dell'indice ILI, con un elenco a bande da A a D, nell'ipotesi che i contatori dei clienti siano posti al limite di proprietà e che la densità media delle prese sia di circa 40 prese/km di rete.

Tabella 2.III: Allocazione dei valori di ILI nel sistema di classificazione del WBI (Fantozzi, 2008)

Range del valore di ILI nei paesi in via di sviluppo	Range del valore di ILI nei paesi sviluppati	Banda	Descrizione generale delle categorie di performance delle perdite reali per paesi sviluppati e in via di sviluppo
ILI < 4	ILI < 2	A	Ulteriori riduzioni delle perdite possono essere economiche a meno di carenza idrica; è necessaria un'analisi dettagliata per identificare miglioramenti cost-effective.
4 ≤ ILI < 8	2 ≤ ILI < 4	B	Potenziati e significativi miglioramenti; considerare la gestione della pressione, migliori modalità per il controllo attivo della pressione e migliore manutenzione della rete
8 ≤ ILI < 16	4 ≤ ILI < 8	C	Scarsa gestione delle perdite; tollerabile solo se la risorsa è abbondante e poco costosa. Analizzare comunque il livello delle perdite ed intensificare gli sforzi per la riduzione delle perdite.
ILI ≥ 16	ILI ≥ 8	D	Uso molto inefficiente della risorsa; i programmi di riduzione delle perdite sono imperativi e rappresentano una priorità assoluta.

2.2 Strategie di intervento

In alternativa ad importanti e costosi adeguamenti delle infrastrutture acquedottistiche, la gestione delle perdite idriche rappresenta una metodologia per ridurre il divario potenziale tra i futuri fabbisogni idrici in un'area e la disponibilità di risorsa idrica, al fine di diminuire il rischio di disservizi e periodi di carenza idrica (Mazzola & Bazzurro, 2008).

La gestione delle perdite idriche può essere perseguita programmando ed attuando diversi interventi (Figura 2.2), quali:

- il controllo attivo delle perdite;
- la gestione delle pressioni di esercizio;
- la velocità e qualità delle riparazioni delle perdite;
- la gestione delle infrastrutture.

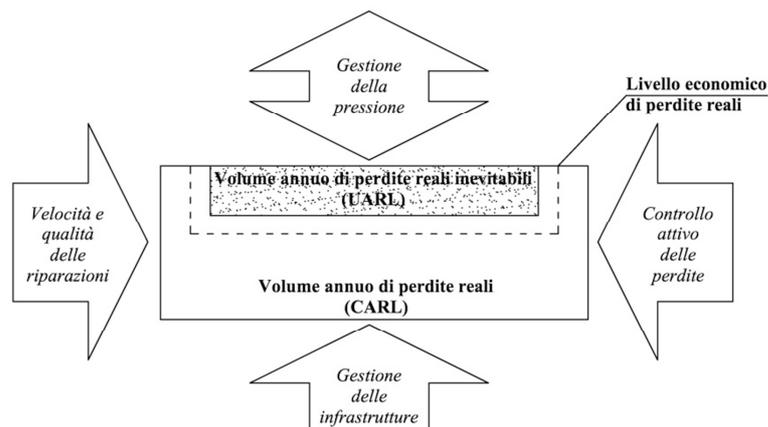


Figura 2.2: Modalità di gestione delle perdite idriche reali (modificato da Farley e Trow, 2003)

Il *controllo attivo delle perdite* consiste nell'individuazione e riparazione puntuale delle perdite idriche occulte ovvero di quelle non segnalate da terzi; come verrà mostrato nel §2.4, è possibile adottare varie tecniche di individuazione delle perdite occulte da adottare in alternativa o, più spesso, in combinazione tra loro. L'attività di individuazione delle perdite occulte risulta spesso molto dispendiosa in quanto necessita di personale specializzato e di molto tempo per la ricerca. In particolare quando si intraprendono attività di controllo attivo delle perdite, di solito è relativamente facile, all'inizio, individuare le perdite, anche perché in alcune circostanze può essere presente un arretrato da smaltire dovuto a investimenti modesti negli anni precedenti. Tuttavia, dopo aver individuato e riparato le perdite più evidenti, per le perdite residue occorre un impegno sempre maggiore a parità di riduzione percentuale.

La *gestione della pressione* rappresenta uno degli aspetti fondamentali per un'efficace strategia di gestione delle perdite. Normalmente le reti idriche vengono dimensionate per assicurare una pressione di servizio adeguata anche in condizioni di massima erogazione. Di conseguenza le reti sono mediamente sottoposte ad una pressione superiore a quella desiderata. Tramite lo studio e la comprensione delle variazioni della pressione in rete, è possibile programmare una riduzione selettiva della pressione, diminuendo così il volume delle perdite di sottofondo e le sollecitazioni sulle infrastrutture idriche, ed estendendo di fatto la vita utile della rete. Tale risultato può essere ottenuto installando apposite valvole di regolazione della pressione in determinati rami della rete al fine di ottenere un impatto significativo sulle pressioni medie di esercizio, rispettando comunque le condizioni minime di pressione e garantendo così sempre un servizio adeguato. Nei capitoli che seguono verrà dato ampio spazio alle tecniche di gestione e riduzione delle pressioni nelle reti di distribuzione idrica. Il grande vantaggio delle tecniche di gestione della pressione sono riconducibili ai modesti costi di intervento, in particolare se commisurati ai notevoli vantaggi ottenibili; infatti tali interventi risultano spesso localizzati in determinati punti della rete, mentre i benefici vengono osservati su larghe porzioni del sistema. In Thornton & Lambert (2005) vengono proposte delle tecniche per effettuare delle previsioni di carattere generale sulle opportunità di gestione della pressione e sulle possibili variazioni della portata delle perdite, della frequenza delle rotture e dei consumi residenziali.

La *velocità nelle riparazioni* consente di contenere il volume complessivo perso in quanto riduce la durata delle perdite. Infatti il volume complessivamente disperso a causa di una perdita è pari al prodotto della portata per il tempo che intercorre tra la formazione e la riparazione della perdita. Tale intervallo di tempo è costituito da tre componenti (Fantozzi, 2008):

- *Tempo di conoscenza*: il tempo che intercorre tra la nascita e la consapevolezza della presenza della perdita; è influenzato dal metodo di raccolta delle informazioni. In particolare può essere notevolmente ridotto tramite, in ordine di efficacia, controlli sistematici delle perdite, misure mensili delle portate notturne o tramite l'utilizzo della telemetria in continuo.
- *Tempo di localizzazione*: è il tempo necessario per localizzare la posizione della perdita; dipende principalmente dal numero di tecnici specializzati, dalle attrezzature e dalle tecniche per il monitoraggio e la localizzazione.
- *Tempo di riparazione*: è il tempo necessario per riparare la perdita. E' funzione della complessità della riparazione da effettuare e dei livelli gestionali del gestore.

La *gestione delle infrastrutture* viene condotta fundamentalmente tramite tecniche di distrettualizzazione della rete e tramite il rinnovo delle reti. La *distrettualizzazione* consiste nel suddividere la rete in distretti omogenei, territorialmente raccolti e con caratteristiche idrauliche simili, al fine di migliorare la gestione e la manutenzione della rete; risulta molto utile per individuare e delimitare zone con livelli piezometrici differenti, definire punti di misura per ottimizzare la ricerca delle perdite, facilitare la determinazione del bilancio idrico e isolare porzioni di rete nel caso di rotture o di inquinamento per cause esterne. La distrettualizzazione può provocare una riduzione nell'elasticità idraulica delle reti, caratteristica molto ricercata nei criteri di gestione tradizionali, ma consente di ottenere una capacità di controllo del sistema notevolmente superiore, caratteristica oggi invece molto più gradita considerando anche lo sviluppo della tecnologia nei campi della telemetria e del telecontrollo.

Il *rinnovo delle condotte* è una strategia estremamente costosa che deve necessariamente essere considerata come un'attività a lungo termine; infatti, al contrario delle altre attività, i costi da sostenere per il rinnovo delle condotte sono estremamente superiori ai ricavi ottenibili dal recupero d'acqua in termini di perdite, se non considerando intervalli temporali molto lunghi. Inoltre il regime di maggiori pressioni, che si viene ad instaurare nella rete, in genere induce un effetto contrario sul livello di perdite che tende a bilanciare o ad annullare gli effetti positivi della sostituzione. In tale ottica il rinnovo delle condotte va considerata come un'attività da affiancare alle altre attività con finalità connesse al mantenimento dell'efficienza del sistema e al soddisfacimento dell'evoluzione della domanda. E' importante comunque che il gestore possa avere a disposizione dati in merito alle condizioni operative della rete (ad esempio mappe di accadimento delle perdite) in modo da poter fare proiezioni sugli investimenti necessari per l'esercizio, la manutenzione, il rinnovamento e l'ottimizzazione delle infrastrutture idriche.

2.3 Limiti economici nella gestione delle perdite

La completa eliminazione delle perdite dalle reti di acquedotto risulta impossibile in quanto comporterebbe un insostenibile incremento dei costi per la produzione e la

distribuzione delle risorse; in tal senso si è già fatto riferimento al UARL ovvero al volume annuo di perdite inevitabili.

Nelle attività di contenimento delle perdite non è dunque possibile trascurare la rilevanza economica delle varie misure da adottare; è necessario infatti effettuare delle considerazioni preliminari tese all'individuazione del *limite economico di perdite idriche* che può essere tollerato ovvero del livello di perdite idriche al di sotto del quale non risulta economicamente sostenibile intraprendere attività di contenimento delle perdite.

Il *livello economico ottimale di perdite* (ELL-Economic Level of Leakage) può essere definito come il livello in cui il costo marginale degli interventi per il loro contenimento è pari al costo dell'acqua persa; in altre parole il livello ottimale delle perdite idriche si ottiene quando i costi dovuti alla riduzione delle perdite per metro cubo sono pari al costo del metro cubo d'acqua immesso in rete. In tale contesto è da tenere in considerazione come ogni azione finalizzata alla riduzione delle perdite sia governata dalla *legge dei rendimenti decrescenti* sulla base dei quali più azioni si perseguono, minore è l'impatto in termini di risparmio idrico (Mazzola & Bazzurro, 2008).

Per comprendere il concetto di livello economico di perdite, in Figura 2.3 viene mostrata graficamente la comparazione dei costi legati al controllo delle perdite con quelli dovuti alla perdita di volumi idrici, in funzione del livello di perdita.

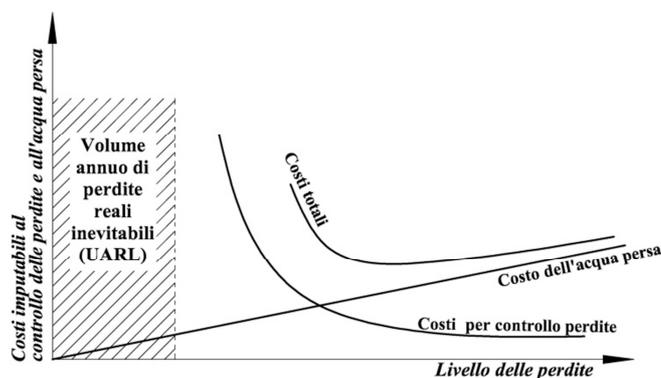


Figura 2.3: Rappresentazione grafica dei costi totali connessi al livello di perdite (Farley & Trow, 2003)

Dalla Figura 2.3 si può evincere come, riducendo i volumi idrici persi, da una parte si registri una diminuzione lineare del valore economico dell'acqua persa, dall'altra come i costi per il controllo delle perdite aumentino esponenzialmente, in particolare all'avvicinarsi del livello di perdite inevitabili (UARL). La sommatoria delle due curve consente di identificare il livello ottimale di perdita come minimo della curva dei costi totali.

Nella valutazione del livello ottimale di perdita è però necessario stabilire se far riferimento ad un'analisi di breve o di lungo termine.

In un'analisi di breve termine infatti vengono considerati invariati i parametri legati alla pressione media in rete, le condizioni degli impianti di adduzione e di distribuzione, le metodologie in uso per la raccolta dei dati; di conseguenza vengono tenuti in

considerazione solo i costi relativi al controllo attivo delle perdite ovvero del personale impiegato per l'individuazione e la riparazione. Il livello economico ottimale a breve termine è definito quindi da una condizione di stabilità in cui il costo marginale del controllo attivo delle perdite è pari al costo marginale dell'acqua risparmiata adottando strategie di controllo attivo. In un'analisi a lungo termine invece vengono considerati gli effetti di investimenti in interventi quali distrettualizzazione, telemetria, gestione delle pressioni e rinnovo delle condotte; tali interventi dovrebbero anche ridurre il livello economico calcolato nel breve termine. In queste ipotesi i risparmi e i costi associati al cambiamento possono essere confrontati con i costi relativi agli interventi per ottenere questo risultato.

Oltre ai costi di produzione e di distribuzione, nelle analisi di economicità vanno sicuramente tenuti in adeguata considerazione i costi ambientali e i costi sociali legati alle perdite. Fra gli effetti ambientali vanno valutati i costi connessi alla riduzione del deflusso nei corpi idrici, del livello di qualità per motivi sanitari, della possibilità degli usi ricreativi; bisogna anche tenere conto del rischio di sovrasfruttamento ed inquinamento delle risorse sotterranee nonché dei costi indotti dalla necessità di incrementare le riserve nei periodi siccitosi. In merito alle metodologie di stima dei costi ambientali è possibile fare riferimento a Ortolano (1996), Pearce et al. (2006), Turner et al. (2003) e Young (1996). Per quanto riguarda i costi sociali è necessario tenere conto della pressione dell'opinione pubblica e, conseguentemente, della politica per la riduzione delle perdite idriche anche oltre i valori economici ottimali, in particolare se si aggiungono condizioni di deficit idrico in determinate condizioni di erogazione (Mazzola & Bazzurro, 2008).

2.4 L'individuazione delle perdite

Per l'individuazione delle perdite idriche è possibile adoperare varie tecniche di rilievo basate su differenti tecnologie; tutti gli approcci di individuazione delle perdite però hanno una caratteristica in comune ovvero la puntualità della ricerca e la necessità dell'operatore di affidarsi alla propria sensibilità ed esperienza. Entrambe tali caratteristiche determinano l'onere di impiegare per lungo tempo personale specializzato nell'uso delle attrezzature e con una profonda conoscenza degli impianti; tutto ciò si traduce in costi elevatissimi delle attività di ricerca perdite.

Al fine di razionalizzare i costi, prima di affrontare una campagna di ricerca perdite, è necessario effettuare una preventiva programmazione delle attività. Tale programmazione deve tenere conto di tutte le caratteristiche specifiche della rete in esame.

Prima di tutto è necessario conoscere, nel dettaglio, l'esatto posizionamento degli impianti di tutta la rete, ivi comprese valvole di sezionamento, valvole di regolazione, valvole di sfiato, pozzetti di ispezione, ecc.

In secondo luogo è necessario individuare i principali fattori che, nel caso specifico in esame, influiscono sull'insorgenza delle perdite; tra le cause più consueti è possibile prendere in considerazione:

- materiali difettosi o inadatti: un difetto di fabbrica può anche rivelarsi dopo la messa in opera, per cui si rendono necessarie delle verifiche prima dell'installazione;

- pressioni di esercizio eccessive, oltre all'aumento delle perdite idriche, provocano un più rapido deterioramento dei materiali e un aumento delle probabilità di accadimento di dannosi fenomeni di moto vario;
- sollecitazioni e vibrazioni dovuti al traffico veicolare;
- elevata età degli impianti;
- corrosione;
- correnti vaganti, nel caso di tubazioni in metallo;
- basse temperature;
- smottamenti del terreno.

Note tali caratteristiche degli impianti, è possibile servirsi di tecniche di mappatura GIS (Geographic Information System) che, tramite l'utilizzo di apposite banche dati interfacciate con le informazioni geografiche (geodatabase), consentano di visualizzare le informazioni della rete mettendone in luce le caratteristiche di interesse fino alla redazione di mappe di vulnerabilità degli impianti.

Se si utilizzano tecniche di distrettualizzazione, altre informazioni possono essere desunte dai bilanci idrici, dalle misure delle portate notturne e dai registri delle riparazioni già effettuate; anche in questo caso le tecniche di mappatura GIS possono risultare molto utili al fine di ottenere una visione di insieme.

Individuate le zone più vulnerabili, per quanto riguarda le rotture e conseguentemente le perdite, è possibile avviare la ricerca puntuale. Quest'ultima può essere affrontata adoperando varie tecniche.

Il metodo classico per l'individuazione delle perdite idriche è il *metodo acustico*, costituito da tecniche basate sul rilievo delle onde sonore prodotte dall'acqua in uscita da una rottura

Per localizzare le perdite idriche sono stati sviluppati diversi strumenti che sfruttano le proprietà delle onde sonore generate da una rottura. Classici strumenti acustici sono i **geofoni**, usati quando i rumori sono trasmessi dal terreno (Figura 2.4) e i **correlatori**, strumenti che misurano le differenze nel tempo di percorrenza del rumore dal punto di fuga sino a due sensori posti alle estremità del tratto di condotta preso in esame (Figura 2.5).



Figura 2.4: Operatore con geofono per la ricerca perdite idriche (TecnoMB s.r.l.)

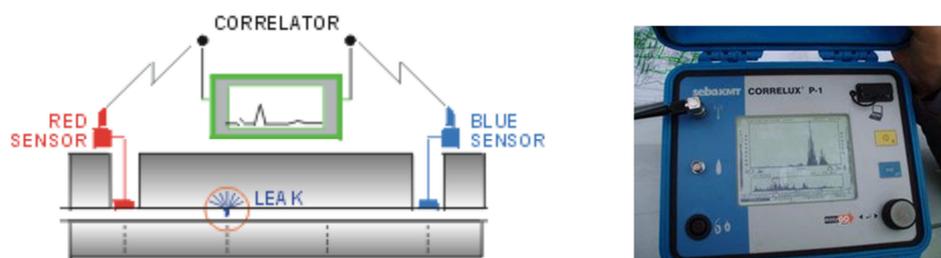


Figura 2.5: Correlatore acustico per l'individuazione delle perdite (TecnoMB s.r.l.)

Un tempo venivano usate aste d'ascolto, per captare rumori provenienti dalle tubazioni, o geofoni meccanici; oggi vengono adoperati **geofoni elettroacustici** che consentono di amplificare e filtrare il rumore di perdita adoperando vari range di frequenza; in tal modo è possibile esaltare i rumori provocati dalle perdite escludendo quelli ambientali, di fondo e anche i fruscii dello strumento (Brand, 2008). I geofoni sono costituiti da microfoni, oggi soprattutto piezoelettrici, inseriti in sonde a puntale, per l'auscultazione dei fitting, e in sonde a campana per il terreno. Le sonde a campana si differenziano per la tipologia in funzione del terreno sul quale devono essere adoperate. Alcuni geofoni, al fine di effettuare analisi più precise, offrono la possibilità di visualizzare l'intensità e lo spettro in frequenza del rumore rilevato, nonché di immagazzinare i dati ottenuti. Chiaramente tramite i geofoni elettroacustici viene effettuata un'analisi puntuale che deve essere estesa a tutti i tratti di interesse della rete e che necessita di tempi lunghi e grande abilità da parte dell'operatore.

Il correlatore si basa sempre sul principio della propagazione del rumore, ma in maniera differente rispetto al geofono: due microfoni vengono posizionati su un tratto di condotta, uno a monte e l'altro a valle della perdita (Figura 2.5). Il rumore della perdita si trasmette lungo la tubazione fino a raggiungere prima il microfono più vicino, poi quello più lontano. Questa differenza di tempo è alla base del calcolo della distanza del punto di perdita da uno dei due microfoni. E' facile comprendere come, rispetto al geofono, l'analisi di un correlatore non sia più puntuale ma può interessare un intero tratto di tubazione, chiaramente entro i limiti fisici dello strumento. I dati di rumore vengono convertiti in valori digitali, che non possono riprodurre fedelmente i segnali in ingresso, ma ne danno una rappresentazione approssimata; essa è tanto più precisa quanto più numerosi sono i livelli di discretizzazione, ovvero il numero di bit utilizzati. E' possibile distinguere la correlazione di polarità, più semplice e fatta con un solo bit, dalla correlazione in ampiezza, con più bit a disposizione per la rappresentazione del segnale. Con lo sviluppo dei microprocessori, i più moderni correlatori offrono vari elementi aggiuntivi in termini di analisi dei dati, tra cui la possibilità di costruire, tramite la trasformata rapida di Fourier, lo spettro del segnale. I tipici componenti di un correlatore sono i sensori (accelerometri o idrofoni), amplificatori/trasmittitori e l'unità centrale (completa di ricevitori). Un tempo per la trasmissione dei dati venivano usati cavi molto lunghi e l'unità centrale gestiva due ricevitori per volta. Oggi sono reperibili sul mercato correlatori con unità centrale che gestiscono più ricevitori, costituiti da strumenti molto compatti dotati di sistemi integrati di trasmissione via radio (Bluetooth, WiFi). I dati

possono essere anche trasmessi a computer o smartphone a distanza per la visualizzazione e la post-elaborazione (Figura 2.6). E' possibile anche implementare sistemi che operano in continuo o solo nelle ore notturne. Grande rilevanza, ai fini della precisione dei rilievi, sono le fasi di impostazione e di settaggio dei dispositivi, anche in termini di filtri da adoperare.

Le tecniche acustiche vengono utilizzate anche per la *prelocalizzazione delle perdite idriche*; in particolare i sistemi **noise logger** prevedono l'installazione di sensori (accelerometri piezoresistivi o idrofoni) in vari punti della rete per il monitoraggio continuo dei rumori; tali dispositivi si contraddistinguono per la loro compattezza, per l'integrazione con sistemi di alimentazione e trasmissione dati, per l'economicità e la facilità di installazione. La prelocalizzazione viene effettuata, monitorando in continuo il rumore in determinati punti della rete, al fine di isolare i rumori dovuti alle perdite rispetto a quelli provenienti dall'ambiente esterno. Il segnale del rumore monitorato nel tempo infatti risulterà tanto più alto e uniforme quanto più vicina è la perdita; in tal modo è possibile identificare specifiche zone della rete in cui sono presenti le perdite, e ridurre drasticamente l'attività di ricerca puntuale. Tale tecnica, se attuata in continuo, può anche consentire di identificare l'insorgere delle perdite in tempi estremamente contenuti.

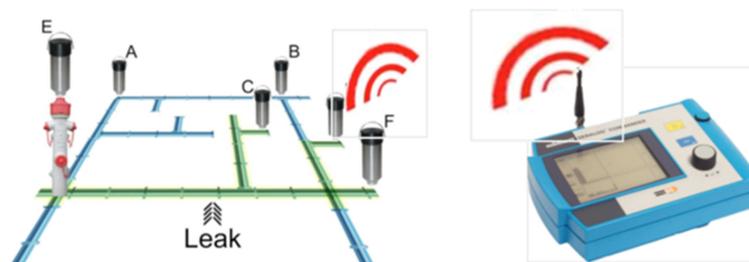


Figura 2.6: Schema di rete di correlatori in comunicazione WiFi per l'individuazione delle perdite (TecnoMB s.r.l.)

Recentemente sono state messe a punto, dal Water Research Center (WRC), delle tecniche (Sahara®) che consentono di inserire, direttamente nelle condotte in pressione di medio ed elevato diametro, appositi dispositivi dotati di idrofono che, muovendosi lungo la condotta, vengono portati sino alla perdita; in tal modo vengono eliminate tutte le problematiche connesse alla trasmissione del suono dovute, ad esempio, al materiale e al diametro della tubazione, alla profondità di posa e al terreno che la ricopre. Il dispositivo, o testa, equipaggiato oltre che con l'idrofono anche con un trasmettitore per consentire la precisa localizzazione dalla superficie del terreno, è collegato con le strumentazioni mediante un sottile cavo lungo fino a 1000 metri, e viene inserito nella tubazione in pressione attraverso una valvola da 2" (Figura 2.7). Individuato un rumore di perdita, si ferma la testa e, aiutandosi con la localizzazione del trasmettitore inserito al suo interno e misurando la lunghezza del cavo introdotto, si può localizzare con precisione la rottura. Il sistema risulta essere molto costoso.



Figura 2.7: Sistema elettroacustico di individuazione delle perdite Sahara® (WRc - Water Research Centre)

Una tecnologia simile è stata messa a punto dalla Pure Technologies (Figura 2.8); viene chiamata SmartBall® e può essere usata per il controllo di tubazioni con diametro superiore a DN200. Una sfera in gommapiuma, che contiene al suo interno una seconda sfera in alluminio ospitante il sistema di misura, viene introdotta nella tubazione tramite una valvola da 4"; la sfera, trasportata dall'acqua (con velocità di 0.5 m/s si possono controllare oltre 20 km di condotta), raccoglie informazioni acustiche lungo il suo cammino. Se ben dimensionata la sfera riesce ad attraversare con facilità valvole, curve e persino superare dislivelli. Il recupero della sfera avviene poi a valle per mezzo di un retino monitorato da una videocamera. La successiva elaborazione dei dati acquisiti permette di visualizzare i rumori rilevati in relazione alla distanza percorsa.



Figura 2.8: Sistema di individuazione acustico delle perdite SmartBall®: a) schema di funzionamento, b) sfera in gommapiuma con componenti all'interno, c) strumento di inserimento in condotta, d) strumento di recupero della sfera (Pure Technologies)

L'individuazione delle perdite idriche può avvenire anche tramite tecniche differenti da quelle acustiche.

In particolare è possibile adoperare tecniche basate sui **gas traccianti** (tracer gas); il principio si basa sull'immissione di una miscela di gas inerte, non esplosivo e atossico, con una componente più leggera dell'aria. Uscendo dalla tubazione ed essendo più leggero dell'aria, il gas sale attraverso il terreno e, giunto in superficie, può venir rilevato con opportune apparecchiature. Questa tecnica può essere consigliabile per perdite di minima entità, riscontrabili per esempio nel corso dei collaudi di tubazioni in pressione e sicuramente non localizzabili con metodi acustici. Oggi a tale scopo, in campo acquedottistico, vengono utilizzate miscele di idrogeno in azoto, anche se le concentrazioni di idrogeno devono essere inferiori al suo limite di esplosività. Essendo necessario rilevare minime presenze di gas sulla superficie del terreno, servono strumenti che, mediante specifiche sonde, aspirino campioni di aria, li analizzino per determinare la presenza di infinitesimali concentrazioni di gas, dell'ordine di alcune ppm. I moderni rilevatori hanno detettori per l'idrogeno a semiconduttori altamente selettivi nel campo del ppm, mentre per concentrazioni superiori possono anche essere utilizzati sensori a conducibilità termica (Brand, 2008).

Anche i **georadar** possono essere impiegati nella ricerca delle perdite; la tecnica georadar (GPR – Ground Penetrating Radar) trae la sua origine dalle prospezioni geologiche e ha similitudini con le indagini sismiche e ultrasoniche. Tale tecnologia viene molto adoperata per l'individuazione delle tubazioni interrate sotto-strada e dei sottoservizi in generale (Figura 2.9). E' un'apparecchiatura composta da una parte trasmittente ed una ricevente, e viene posizionata sulla superficie del terreno sopra la tubazione. L'antenna trasmittente invia nel suolo un breve impulso di onde elettromagnetiche in alta frequenza; tali onde vengono parzialmente riflesse verso la superficie da oggetti interrati, da cavità o da stratificazione di terreno con differenti proprietà dielettriche, e quindi acquisite da un'antenna ricevente. La differenza di tempo tra l'impulso inviato e quello riflesso consente di calcolare la profondità della superficie riflettente. Tramite scansioni perpendicolari del terreno è possibile ricostruire una mappa del sottosuolo adiacente la condotta (Figura 2.10).



Figura 2.9: Operatore con Georadar multiantenna (IDS - Ingegneria Di Sistemi S.p.A.)

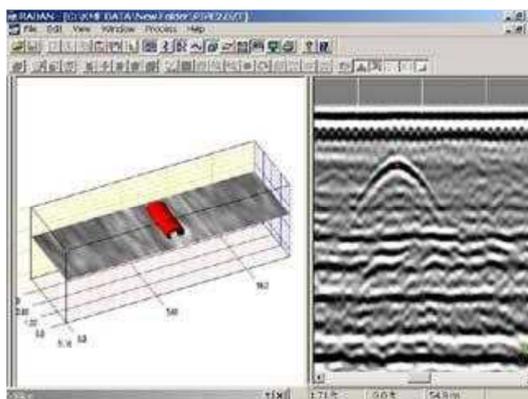


Figura 2.10: Visualizzazione della scansione di una tubazione nel terreno tramite Georadar (IDS - Ingegneria Di Sistemi S.p.A.)

Le perdite idriche possono essere identificate tramite la tecnica georadar secondo due metodologie: evidenziando le cavità prodotte dall'acqua fuoriuscente che dilava il terreno in prossimità della perdita, oppure rilevando le zone nelle quali la condotta appare più profonda rispetto al tracciato previsto. Il terreno saturo, infatti, ha una costante dielettrica maggiore rispetto a quello vicino a minor contenuto d'acqua e, rallentando le onde elettromagnetiche, indica una distanza maggiore rispetto a quella reale. I Georadar in commercio si differenziano in particolare per il numero e la tipologia di antenne, in particolare per quanto riguarda la frequenza dell'impulso: tramite frequenze maggiori si ottengono dettagli più definiti ma inferiore penetrazione in profondità nel terreno, ovvero è possibile ottenere una risoluzione elevata, catturando così elementi più piccoli, ma sino ad una modesta profondità. Al contrario le frequenze basse garantiscono una buona penetrazione in profondità, ma uno scarso livello di dettaglio. E' necessario dunque effettuare considerazioni preliminari per definire il range di frequenze utili per l'applicazione che si vuole condurre (tenendo quindi conto della dimensione della condotta, della sua profondità, delle caratteristiche del terreno, ecc) o in alternativa utilizzare strumenti georadar con più antenne con diversi range di frequenza in modo da coprire tutto lo spettro desiderato. L'interpretazione dei risultati richiede una profonda conoscenza della tecnologia, della strumentazione e una buona dose di esperienza, anche se oggi appositi software possono aiutare notevolmente l'operatore in tale fase. Tale tecnologia può risultare molto utile, nella ricerca delle perdite difficili, in particolare per quelle che non generano un rumore identificabile o che si trovano su tubazioni in materiale plastico.

Al fine di individuare le perdite idriche è anche possibile utilizzare tecnologie basate sulla **termografia**; misure in alta definizione che evidenziano differenze di temperatura del terreno possono essere utilizzate anche per l'individuazione delle perdite idriche, nell'ipotesi che l'acqua che fuoriesce sia differente da quella del terreno adiacente. Inoltre il terreno saturo d'acqua ha una differente capacità termica di quello asciutto, con conseguente modifica della temperatura in superficie. A tale scopo vengono utilizzate delle termocamere che rilevano le radiazioni nella gamma degli infrarossi e che riportano su uno schermo i gradi di calore rilevati, associando ad ogni temperatura un colore differente. Tale tecnologia è molto utilizzata per l'individuazione delle perdite dagli

impianti di riscaldamento, in quanto l'acqua calda è facile da rilevare avendo una temperatura molto differente rispetto all'ambiente circostante. Per rilevare invece l'acqua fredda è necessario che il terreno abbia una temperatura significativamente superiore; per tale motivo è consigliabile avviare tale tipologia di rilievi negli acquedotti in giornate e orari caldi, ossia nei mesi estivi e nelle ore pomeridiane.

Infine si intende mettere in evidenza la possibilità di utilizzare tecniche per la diagnosi dei sistemi di condotte in pressione basate sull'esecuzione di **prove in moto vario** (si vedano tra gli altri: Brunone, 1989, 1999; Brunone & Ferrante, 2001; Covas & Ramos, 2001; Lee et al., 2005; Ligget & Chen, 1994; Mpesha et al., 2001; Vitkovsky et al., 2000; Wang et al., 2002). Tali tecniche prevedono la generazione di micro fenomeni di moto vario e lo studio della propagazione delle conseguenti onde di pressione; le onde di pressione vengono in parte riflesse dalle perdite; sfruttando tale principio, è sufficiente esaminare l'andamento delle pressioni, conseguenti ad un fenomeno di moto vario appositamente generato, per individuare l'esatto posizionamento delle perdite (per ulteriori dettagli si rimanda a Brunone et al., 2008). I vantaggi del metodo possono essere principalmente individuati nella rapidità delle prove, in particolare se confrontate con le tecniche classiche di individuazione puntuale, nonché per l'economicità delle strumentazioni da utilizzare, in quanto sono sufficienti solo i trasduttori di pressione e, al più, appositi dispositivi per la generazione del moto vario (PPWM-Portable Pressure Wave Maker). Inoltre non sono da trascurare la modesta interferenza con il regolare esercizio del sistema e la possibilità di effettuare la verifica di integrità ogni qualvolta lo si desidera. Infine la possibilità di confrontare prove effettuate in tempi diversi consente di diagnosticare precocemente inattesi cambiamenti dello stato del sistema, associati all'insorgere di malfunzionamenti.

Capitolo 3

La gestione del cielo piezometrico nelle reti di acquedotto

E' già stato messo in evidenza, come le pressioni eccessive, nelle reti acquedottistiche, possano provocare un aumento delle perdite idriche nonché un più rapido deterioramento degli impianti di distribuzione.

Infatti all'interno delle reti esistenti non adeguatamente ripartite in distretti e in caso di sviluppo plano-altimetrico sfavorevole, le pressioni elevate possono determinare dei danni *diretti*, quali l'incremento delle rotture delle tubazioni, dei giunti e dei pezzi speciali, l'incremento delle perdite idriche e dei consumi energetici, e *indiretti*, come gli aumenti dei costi di gestione e dei disservizi; d'altronde anche le pressioni basse, se non opportunamente gestite, possono causare l'inefficienza nel servizio di distribuzione (Liberatore & Sechi, 2006).

Si è anche visto come in realtà il controllo delle pressioni nelle reti acquedottistiche risulti essere la strategia di intervento, per la riduzione delle perdite, più conveniente da un punto di vista economico; infatti a fronte di investimenti contenuti, vista la puntualità degli interventi, si ottengono notevoli ed estesi vantaggi che non si riducono alla sola di riduzione della pressione ma possono anche essere estesi a:

- riduzione dei consumi, conseguente alla riduzione delle perdite negli impianti privati delle utenze;
- riduzione della frequenza di rottura delle tubazioni;
- omogeneizzazione delle pressioni in rete, con conseguente ripartizione più equa delle portate tra le diverse zone;
- riduzione dell'entità dei fenomeni di moto vario in rete.

Nel presente capitolo, oltre a fornire alcuni concetti e alcuni dati di letteratura utili per una migliore comprensione della relazione tra perdite idriche e pressione nelle reti acquedottistiche, vengono riportate le modalità proposte in alcuni studi per il corretto posizionamento e l'adeguata regolazione di valvole di regolazione della pressione.

Verrà mostrato come, da un punto di vista applicativo, sia possibile ridurre apprezzabilmente le perdite in rete utilizzando i risultati di modelli numerici per l'ottimizzazione del posizionamento delle valvole e delle loro regolazioni a intervalli di

tempo prefissati, sulla base dell'andamento giornaliero medio della domanda e dei carichi nei serbatoi.

Verrà inoltre mostrato come l'adozione di tecniche di controllo in tempo reale consenta di regolare le valvole in modo automatico e continuo al variare delle condizioni di erogazione della rete.

3.1 Relazione tra perdite idriche e pressioni di esercizio

3.1.1 Considerazioni sulle singole perdite da orifizi

Solitamente le perdite reali vengono studiate tramite i principi della foronomia, ovvero come l'efflusso di un fluido da una luce sotto battente; tale studio, attraverso il principio di conservazione dell'energia, porta alla ben nota legge:

$$Q = C_d \cdot \sigma \cdot \sqrt{2g(h_m - h_{GC})} \quad 3.1$$

dove:

- $C_d = C_v \cdot C_c$: è detto *coefficiente di efflusso* e tiene conto degli effetti dissipativi dell'energia per fluidi reali (C_v) e del fenomeno di contrazione della vena fluida (C_c);
- σ : è l'area della sezione di passaggio della luce;
- h_m : è il carico totale all'ingresso della sezione di efflusso;
- h_{GC} : è la quota del baricentro della sezione di efflusso.

Nel passato si è assunto, sulla base di tale relazione, che la perdita nei sistemi di distribuzione variasse con la radice quadrata della pressione. Studi ed esperienze sviluppati in campo internazionale, soprattutto in Inghilterra e Giappone, hanno portato alla conclusione che la relazione delle perdite in funzione della pressione nelle reti di distribuzione si discosta, a volte anche notevolmente, dall'equazione classica della foronomia (Artina et al., 2003). Le cause di questo comportamento (Lambert, 2000) sono da imputarsi principalmente ai seguenti aspetti:

- l'assunzione della costanza del coefficiente di efflusso è lecita solo in un contenuto intervallo di valori di velocità;
- per alcune tipologie di perdita ed in funzione del materiale si è riscontrata la possibilità che la dimensione dell'area dell'apertura possa variare in funzione della pressione.

L'assunzione della costanza del coefficiente C_d non è sempre valida in quanto esperimenti di laboratorio (Lambert, 2000) riportano che, per una singola luce di efflusso, C_d può cambiare a seconda che il moto sia di tipo laminare, turbolento o di transizione; il tipo di moto che si sviluppa nell'orifizio dipende dal numero di Reynolds.

I motivi della variazione dell'area con la pressione, sono da imputarsi principalmente al materiale con cui sono realizzate le condotte e alla tipologia della perdita. Studi su reti di distribuzione condotti in Inghilterra dal gruppo di studio FAVAD (Fixed and Variable Area Discharge), all'interno della UK National Leakage Initiative, hanno portato a ipotizzare (May, 1994) che le perdite in acquedotto sono caratterizzate da due termini: il primo rappresentativo della portata uscente da rotture ad area costante, riconducibili a

rottture per scoppio, il secondo di perdite caratterizzate da un'area variabile in funzione della pressione, attribuibili a perdite di sottofondo. In particolare May (1994) in merito alle perdite da area variabile riporta che è lecito assumere una relazione lineare tra l'espansione dell'area e la pressione, nonostante la natura delle espansioni e contrazioni dell'area della perdita possa essere governata da più fattori quali la tipologia del giunto, il tipo di terreno, le condizioni al contorno.

Altri studi, effettuati su tubazioni in PE e PVC da Khadam et al. (1991), ottenuti su reti di distribuzione reali, riportano che l'area dell'orifizio varia notevolmente con la pressione. Da esperimenti su perdite provocate artificialmente nel caso di fessure longitudinali monodimensionali, si è riscontrato che l'area varia linearmente con la pressione e che la portata dipende dalla variazione della pressione con esponente 1.5, mentre nel caso di fessura che si apre su due dimensioni (longitudinalmente e radialmente) la portata dipende dalla variazione della pressione con esponente 2.5.

Risultati concordanti sono stati ottenuti dall'Università di King Baud in Arabia Saudita da Khaled et al. (1992), all'interno di un progetto di ricerca per la valutazione della relazione tra pressione e perdite nella città di Rihad.

Nei vari studi la relazione tra perdite idriche e pressione è stata interpretata secondo una legge di tipo monomio:

$$QP = C \cdot H^n \quad 3.2$$

in cui QP è la portata idrica persa, C è il coefficiente di emissione della legge monomia, H è il carico piezometrico e n è l'esponente della legge monomia.

Gli ulteriori lavori effettuati in Arabia Saudita (Sendil & Al-Dhowalia, 1992), Inghilterra (Burnell & Race, 2000) ed Iran (Ardakanian & Ghazali, 2003) hanno confermato tale relazione ed i relativi risultati, per quanto riguarda l'esponente n , sono riportati in Tabella 3.I.

Tabella 3.I: Valori proposti in letteratura per l'esponente n della legge monomia

<i>Fonte</i>	<i>n</i>
<i>Burnell e Race, 2000</i>	1.00
<i>Goodwin, 1980</i>	1.18 (Medio)
<i>Ardakanian e Ghazali, 2003</i>	1.10 - 1.18
<i>Sendil e Al-Dhowalia, 1992</i>	0.54 - 1.61

E' interessante notare, anche dalla Tabella 3.I, come tutti i valori, reperibili in letteratura per l'esponente n , risultino considerevolmente maggiori del valore 0.5 che caratterizza il classico efflusso torricelliano.

3.1.2 Relazione perdite-pressioni nei distretti o nelle reti

La relazione 3.2, che a rigore è stata proposta per la singola perdita idrica da un orifizio, talvolta viene applicata ai distretti della rete o, addirittura, all'intero sistema di distribuzione; in tal modo i suoi parametri assumono, di volta in volta, un significato diverso.

In alcuni studi di reti di distribuzione (ad esempio Martinez et al. (1999), Stathis & Loganathan (1999), Araujo et al. (2003)) la relazione 3.2 è stata implementata direttamente sui nodi della rete, adoperando direttamente i valori dei coefficienti ricavati sperimentalmente sulle singole perdite idriche.

In Bovolin et al. (2007) viene fatto presente come tale scelta non appare sufficientemente giustificata e come anzi, per l'applicazione della relazione 3.2 su distretti o su interi sistemi idrici, sia necessaria una preventiva calibrazione dei coefficienti C ed n , relativamente alla specifica rete idrica in esame; tali valori globali della rete devono rispecchiare la composizione delle perdite singole e ne sono, in qualche maniera, una sorta di media pesata.

Al fine di un'accurata calibrazione dei coefficienti dell'equazione monomia 3.2, può risultare idoneo individuare nella rete zone con alta probabilità di valori omogenei nei confronti delle perdite, utilizzando criteri decisionali quali il materiale, l'età delle condotte, statistiche sugli eventi di fallanza in rete, tipologie edilizie, ecc.; in tal modo è possibile di definire singole zone facilmente isolabili idraulicamente e stimare per esse, mediante misure di portata minima notturna e test di pressione, i relativi valori dei coefficienti C ed n .

In assenza di dati di campo è possibile far riferimento, in prima approssimazione, ai dati ricavabili in letteratura; per quanto riguarda il coefficiente di emissione C , in alcuni studi di reti viene proposto di legare tale valore alle caratteristiche geometriche degli impianti. Ad esempio in Araujo et al. 2006 viene adoperata la relazione 3.2 per ciascun nodo della rete, utilizzando, per la determinazione del corrispondente valore del coefficiente di emissione, una relazione del tipo:

$$C_j = c_j \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{M_j} L_{ij} \quad 3.3$$

essendo j il generico nodo, C_j il coefficiente di emissione caratteristico del nodo j , M_j il numero di rami che convergono al nodo j , L_{ij} la lunghezza dell' i -esimo ramo che converge al nodo j , e c_j il coefficiente di perdita per unità di lunghezza di tubazione attribuito al nodo j dipendente dallo stato, dal diametro e dall'età degli impianti; la relazione 3.3 consente dunque di tenere conto, nel calcolo delle perdite, della lunghezza delle tubazioni e di differenziare le caratteristiche dei vari impianti che compongono la rete.

Con riferimento alle perdite di parti di rete, in Thornton et al. (2005) viene proposta una diversa scrittura della relazione 3.2 pressione-perdite, adoperata nell'analisi di misure di campo rilevate in diversi paesi (Regno Unito, Giappone, Australia, Brasile, Canada, Malesia, Nuova Zelanda e Stati Uniti):

$$QP_1 = QP_0 \cdot \left(\frac{H_1}{H_0}\right)^{N1} \quad 3.4$$

nella quale QP_0 e QP_1 rappresentano, rispettivamente, i valori della portata di perdita corrispondenti ai valori di carico piezometrico H_0 e H_1 . L'esponente $N1$ può variare tra 0.5 e 1.5 ma, talvolta può raggiungere valori fino a 2.5 (Di Nardo et al., 2009).

3.2 Il posizionamento e la taratura delle valvole di riduzione di pressione

Il problema del posizionamento e della taratura ottimale delle valvole di riduzione di pressione in una rete di acquedotto può essere affrontato come un problema di ottimizzazione, dove la funzione obiettivo da minimizzare è costituita dalle perdite complessive in rete e i vincoli da rispettare sono i carichi piezometrici minimi ammissibili ai nodi. Chiaramente ai metodi di ottimizzazione è necessario affiancare modelli di simulazione idraulica al fine di determinare le condizioni di funzionamento e conseguentemente i livelli di performance delle soluzioni prese in considerazione.

La difficoltà risiede principalmente nella dimensione del problema di ottimizzazione e nella non linearità dei modelli distributivi.

Il problema del posizionamento ottimale delle valvole non può prescindere da quello della taratura in quanto, per poter confrontare le performance delle varie soluzioni, in termini di scelta dei rami in cui inserire la valvola, è necessario conoscere la relativa taratura ottimale.

Entrambe i problemi possono essere affrontati con metodi di ottimizzazione classici o stocastici; di seguito vengono proposte alcune tecniche di ottimizzazione adoperate da vari autori.

3.2.1 La taratura con metodi classici di ottimizzazione

Il problema della taratura ottimale può essere formulato secondo i seguenti termini: data una valvola di regolazione posizionata in un certo ramo della rete e stabilite le desiderate condizioni di erogazione del sistema (portate erogate ai nodi, livelli idrici nei serbatoi, carichi minimi ammissibili ai nodi) si deve determinare il grado di apertura della valvola tale da minimizzare le portate complessivamente perse in rete. Il problema per una rete con funzionamento a gravità, ovvero senza sistemi di pompaggio, da un punto di vista matematico comporta l'implementazione di:

- equazioni del moto ai rami (relazione portata transitante-perdita di carico) ove sono contenute le perdite di carico concentrate dovute alle valvole di regolazione;
- relazioni perdita-pressioni, scritte ai nodi;
- equazioni di continuità ai nodi;
- funzione obiettivo da minimizzare (spesso la somma delle portate perse);
- vincoli di funzionamento delle valvole (grado di apertura massimo e minimo);
- vincoli sui carichi piezometrici minimi accettabili ai nodi.

In realtà i carichi minimi vengono imposti su determinati nodi di riferimento della rete, appositamente scelti tramite simulazioni preliminari della rete come i nodi che sono soggetti alle pressioni inferiori; tale verifica viene effettuata sia in assenza che in presenza delle valvole.

Esplicitando le varie equazioni è facile rendersi conto come il problema di ottimizzazione esposto risulti non lineare, essendo non lineare sia la funzione obiettivo che una parte dei vincoli.

In tali termini il problema è stato affrontato da diversi autori.

In Jowitt & Xu (1990) viene proposto un metodo di risoluzione del problema basato su una linearizzazione delle equazioni, in accordo a quanto fatto in Germanopoulos and Jowitt (1989), e sul ripetuto impiego di metodi per la risoluzione di un problema di programmazione lineare (metodo del simplesso e metodo della penalità). Ad ogni iterazione è necessario l'aggiornamento dei coefficienti del problema. Tali coefficienti sono ricavati risolvendo il problema di verifica della rete mediante il metodo nodale e l'iterazione di Newton-Raphson.

La procedura iterativa può essere riassunta nei seguenti passi:

- a. indicare un valore di partenza del grado di apertura della valvola;
- b. determinare con una verifica idraulica della rete i valori dei carichi ai nodi, delle portate e delle perdite;
- c. stimare i valori della funzione obiettivo e dei vincoli nel problema di ottimizzazione linearizzato;
- d. ottenere i nuovi valori del grado di apertura risolvendo il problema di ottimizzazione linearizzato;
- e. calcolare le differenze fra i valori dei gradi di apertura nelle due ultime iterazioni. Se tutte le differenze sono inferiori ad un valore predeterminato, la procedura termina, altrimenti ricomincia dal passo b.

Tale problema, così formulato, è stato anche affrontato in Pezzinga (1994) con la differenza che i vincoli sui carichi accettabili ai nodi vengono impostati come intervalli accettabili, invece che come soglie minime, in un'ottica "fuzzy".

Nello studio di Vairavamoorthy & Lumbers (1998) l'ottimizzazione della taratura delle valvole si basa sull'utilizzo di una successiva programmazione quadratica per la risoluzione di sotto-problemi; gli autori considerano due funzioni obiettivo da minimizzare incorporate nel modello: la prima è la portata persa complessivamente in rete, mentre la seconda è lo scarto quadratico tra la pressione in un dato nodo e la pressione minima richiesta. Il modello permette di raggiungere ottimi risultati nelle reti reali in termini di robustezza nel calcolo e di livelli di convergenza rispetto ai modelli elaborati in precedenza.

3.2.2 Gli algoritmi genetici

Per un problema di ottimizzazione non lineare gli algoritmi deterministici fin qui presentati possono presentare inconvenienti dovuti alla difficoltà, e talvolta alla pratica impossibilità, di raggiungimento della soluzione. In alternativa è possibile adoperare algoritmi di ricerca stocastica, nell'ambito dei quali gli algoritmi genetici sono tra i più efficienti (Gueli e Pezzinga, 1998).

Gli algoritmi genetici si classificano come robusti metodi di ricerca basati su un'analogia con l'evoluzione biologica; sono basati in particolare su meccanismi simili a quelli presenti in natura per la selezione delle specie sessuate, secondo il modello posto a fondamento dalla teoria evolutiva di Darwin (1859).

Alcuni studi mostrano come gli algoritmi genetici possano essere impiegati nella risoluzione di problemi idraulici complessi (Simpson et al., 1994, McKinney and Lin, 1994, Ritzel and Eheart, 1994). Per gli algoritmi genetici esiste una codifica ritenuta ormai classica (Holland, 1975).

Gli algoritmi genetici, secondo logiche simili alla selezione naturale, operano la selezione di una popolazione i cui individui sono la rappresentazione di soluzioni potenziali del problema; in tale contesto la popolazione iniziale è generata casualmente e il numero di individui resta costante al succedersi delle generazioni.

In natura ogni cellula di ogni singolo individuo (o *fenotipo*) contiene un set completo di istruzioni che definiscono la sua composizione fisica. Queste informazioni sono codificate in forma di sequenze di geni lineari conservate su coppie di *cromosomi* omologhi, che costituiscono il *genotipo* dell'individuo. La riproduzione sessuale determina la combinazione di materiale genetico di entrambi i genitori, ed una metà di ogni coppia di cromosomi viene da ogni genitore. Un aspetto fondamentale nel processo evolutivistico è che la relazione tra il genotipo ed il fenotipo è unidirezionale: l'individuo non può influire sulla propria composizione genetica, ma può influire sulla componente genetica delle generazioni successive mediante il successo riproduttivo differenziale, ruolo cruciale della selezione naturale.

Negli algoritmi genetici i "cromosomi" sono costituiti dalle *stringhe* di dati che rappresentano gli individui della popolazione, ovvero le possibili soluzioni del problema. Ciascuna stringa è composta da una serie di caratteristiche, equivalenti ai "geni" biologici, che rappresentano la codifica del gruppo di variabili decisionali. Una popolazione di cromosomi rappresenta un insieme di possibili soluzioni potenziali del problema (vedi Figura 3.1).

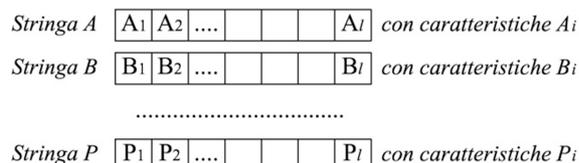


Figura 3.1: Esempio di una popolazione di stringhe A,B,...,P di lunghezza *l* (Reis et al., 1997)

Ad ogni generazione, dopo aver valutato la performance di ciascun individuo (stringa binaria), inibendo la riproduzione degli individui che rappresentano le soluzioni peggiori e favorendo al contrario quella di individui che rappresentano soluzioni migliori, si ottengono, al progredire delle generazioni, soluzioni del problema con livelli di performance sempre superiori.

Come indicatore *f* di performance o di fitness, nel caso specifico, può essere adoperato il valore della portata persa *QP* appositamente normalizzato tra 0 e 1 secondo la relazione:

$$f = \frac{QP_{max} - QP}{QP_{max} - QP_{min}} \tag{3.5}$$

dove *QP_{max}* e *QP_{min}* sono rispettivamente i valori massimo e minimo della portata persa forniti dagli individui della generazione considerata.

Il passaggio della popolazione da una generazione alla successiva viene effettuato mediante l'applicazione di tre operatori che simulano il processo evolutivo biologico (vedi Figura 3.2):

- **Selezione:** è un meccanismo stocastico in cui ogni individuo della popolazione ha una probabilità di essere selezionato proporzionale al suo livello di fitness f . I vincoli sui carichi vengono rispettati indirettamente attraverso una penalizzazione empirica nella funzione di fitness per le soluzioni che non rispettano i valori minimi. In generale, data una popolazione iniziale di N_p individui generati casualmente, la procedura di selezione può così riassumersi:
 - per ciascun individuo i si valuta il livello di fitness f_i ;
 - si valuta la sommatoria F delle fitness di tutta la popolazione di individui;
 - per ciascun individuo si calcola la probabilità desiderata di selezione $p_i = f_i / F$, e la cumulata delle probabilità di selezione $P_i = \sum_{j=1}^i p_j$;
 - si genera un numero reale casuale s compreso tra 0 e 1 e si scelgono gli elementi della popolazione con valore della cumulata della probabilità di selezione P_i tale che $P_{i-1} < s \leq P_i$;
 - l'operatore di selezione viene applicato N_p volte affinché la dimensione della popolazione si mantenga costante.
- Nel processo di selezione da una generazione alla successiva vi possono essere individui selezionati più di una volta e individui non selezionati. Alla popolazione così selezionata vengono applicati i successivi operatori.
- **Crossover:** è un operatore genetico che ricombina a due a due gli individui della popolazione. L'operatore viene applicato ad ogni individuo con una certa probabilità $p_{crossover}$; gli individui selezionati per il crossover vengono fatti accoppiare a due a due, ovvero le loro caratteristiche vengono opportunamente mescolate, imponendo casualmente un crossing point, mentre gli altri vengono replicati alla generazione successiva. L'operatore di crossover applicato a due individui genitori da per risultato due individui figli.
 - **Mutazione:** è un operatore che introduce variazioni casuali nelle caratteristiche degli individui.

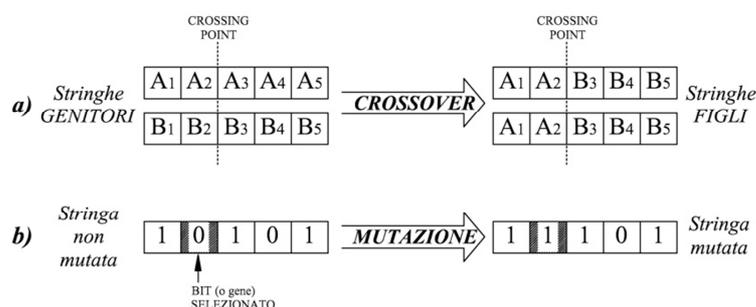


Figura 3.2: Rappresentazione degli operatori di un algoritmo genetico a) operatore di crossover b) operatore di mutazione (Reis et al., 1997)

Nell'implementazione di algoritmi genetici è opportuno anche adottare l'elitismo, ovvero il mantenimento inalterato dell'individuo che rappresenta la migliore soluzione da una generazione alla successiva (Rudolph, 1994).

In Gueli & Pezzinga (1998) vengono adoperati gli algoritmi genetici per identificare la regolazione ottimale di valvole di riduzione di pressione; nello studio in particolare

viene proposto un confronto tra l'algoritmo genetico classico, operante con codifica binaria, e uno appositamente modificato con codifica "floating point" (Michalewicz 1994). L'algoritmo genetico con codifica floating point consente di operare direttamente sulla soluzione potenziale, vettore di numeri reali; l'algoritmo cosiffatto opera con la medesima procedura di selezione dell'algoritmo genetico classico ma ha operatori genetici più numerosi e complessi. Lo studio ha mostrato che con la codifica floating point si ottengono risultati più precisi ma al prezzo di un numero maggiore di generazioni.

Il problema degli algoritmi genetici è che i valori di fitness di grandi popolazioni necessitano di tempi elevati di stima, specialmente quando la valutazione della soluzione comporta l'esecuzione di un modello di simulazione idraulica.

In tali casi è possibile adottare micro-algoritmi genetici introdotti da Krishnakumar (1989), che si differenziano da un algoritmo genetico ordinario per la dimensione molto piccola della popolazione e per l'utilizzo di due soli operatori genetici ovvero selezione e crossover.

3.2.3 Disposizione ottimale delle valvole

La scelta della posizione ottimale delle valvole di riduzione di pressione è fondamentale per ottenere un risultato significativo nella riduzione delle perdite. L'ottimizzazione della disposizione può essere eseguita tramite algoritmi genetici o con procedure euristiche.

In *Savic and Walters* (1995), al fine di individuare la posizione ottimale di una valvola di riduzione di pressione, vengono applicati gli algoritmi genetici integrati con un modello di simulazione idraulica delle reti; viene dimostrato come il processo di evoluzione dell'algoritmo genetico accelera la ricerca della soluzione ottimale, riducendo il numero di analisi idrauliche della rete, guidando il processo di ricerca anche nell'escludere le soluzioni impraticabili. In tale studio la funzione di fitness è basata sulla minimizzazione delle pressioni.

In *Reis et al.* (1997) vengono adoperati algoritmi genetici per il posizionamento ottimale delle valvole di riduzione di pressione, tenendo conto dei diversi scenari del sistema acquedottistico ovvero della variazione spaziale e temporale delle portate domandate ai nodi, delle oscillazioni temporali dei livelli nei serbatoi e del numero di valvole posizionate. Gli autori propongono una procedura ibrida ove si usa la medesima procedura di linearizzazione proposta da Jowitt & Xu (1990) per quanto riguarda il problema della regolazione ottimale, mentre l'algoritmo genetico viene usato solo per il posizionamento delle valvole. Come funzione di fitness viene fatto riferimento alle portate perse in rete nei vari scenari, per cui il problema di individuazione consiste nell'individuazione della stringa che massimizzi la riduzione delle portate perse. Ciascuna stringa rappresenta la configurazione delle posizioni delle valvole in rete; ad esempio, dovendo posizionare tre valvole, è necessario comporre stringhe caratterizzate da tre "geni". Ciascun gene individua la posizione della singola valvola con il numero del ramo in cui viene inserita. Pertanto la stringa che rappresenta tre valvole posizionate nei rami 5, 18 e 23, per una rete con meno di 99 rami è {05; 18; 23}. Lo studio, oltre alla validità dell'utilizzo degli algoritmi genetici per gli scopi proposti, mostra come la posizione ottimale delle valvole viene poco influenzata dalle variazioni spaziali e temporali della domanda idrica.

In *Pezzinga & Gueli* (1999) viene proposta una procedura euristica basata sulla minimizzazione della portata persa nelle 24 ore. La procedura si basa sull'ipotesi che ogni combinazione ottimale di N_V valvole contiene la combinazione ottimale di N_V-1 valvole. Questa ipotesi, che ovviamente non è rigorosa, consente di disporre le valvole una alla volta, riducendo drasticamente il numero di combinazioni di valvole da provare. Infatti, l'enumerazione completa senza ripetizioni, in una rete con N_T tratti, richiederebbe di esaminare un numero di combinazioni pari al prodotto del numero di generazioni per la dimensione della popolazione, ovvero pari a:

$$C_{N_V} = \binom{N_T}{N_V} = \frac{N_T!}{N_V!(N_T-N_V)!} \quad 3.6$$

mentre la precedente ipotesi consente di avere un numero di combinazioni:

$$C_{N_V} = N_V N_T - \frac{N_V(N_V-1)}{2} \quad 3.7$$

Quest'ultimo numero è in generale minore del numero precedente; ad esempio per $N_T = 30$ e $N_V = 3$ si ottiene $C_V = 4060$ dalla 3.6 mentre con la 3.7 si ottiene $C_V = 87$. Numeri ancori inferiori possono essere ottenuti sulla base di criteri di selezione dei tratti in cui disporre le valvole legati a parametri idraulici significativi del tratto, come ad esempio la portata.

Negli studi di *Liberatore e Sechi* (2009, 2007, 2005) è affrontato il problema della localizzazione ottimale e della regolazione delle valvole, utilizzando procedure di ottimizzazione meta-euristiche dette *Scatter-Search*; il modello di ottimizzazione gestisce il set dei valori, discretizzati e opportunamente ordinati, delle alternative ammissibili per la localizzazione e la taratura ottima delle valvole. La simulazione idraulica fornisce la valutazione delle performance del sistema nella configurazione candidata, che viene generalmente espressa sulla base della differenza tra valori target e i valori determinati tramite le simulazioni. La formulazione matematica della funzione obiettivo (OF) per il modello di ottimizzazione, viene espressa come una funzione multiobiettivo pesata del tipo:

$$\min OF = \gamma_1 OF_1 + \gamma_2 OF_2 \quad 3.8$$

dove OF_1 è rappresentativo del costo delle valvole, mentre OF_2 rappresenta la penalità complessiva della mancata soddisfazione dei vincoli sulle pressioni, in termini sia di pressioni massime desiderate che di pressioni minime ammissibili; il metodo inoltre consente di operare l'ottimizzazione tenendo conto di varie condizioni di erogazione della rete. Al fine di rendere applicabile la metodologia ai casi di complessità reale caratterizzati da dimensioni elevate, gli autori propongono varie procedure specifiche di riduzione del set di alternative fornite alla metaeuristica, ovvero di riduzione del grafo che contiene il set dei tratti di tubazione candidati per l'inserimento delle valvole.

In *Araujo et al.*, 2006 vengono utilizzati gli algoritmi genetici allo scopo di ottimizzare il numero e il posizionamento delle valvole inserite in rete, nel caso di variazioni estreme della portata; viene mostrato come non sempre l'immissione di più valvole restituisce un risultato migliore in termini di regolazione della pressione.

In *Nicolini & Zovatto* (2009) e in *Nicolini et al.* (2011), per risolvere il problema del posizionamento e regolazione delle valvole, vengono proposti algoritmi genetici multi-obiettivo; le due funzioni obiettivo prese in considerazione sono il numero totale di

valvole installate nella rete e la portata persa complessivamente dal sistema. Questi due obiettivi vengono ottimizzati dall'algoritmo genetico in maniera indipendente l'uno dall'altro. In tal modo tramite una sola simulazione gli autori affermano di determinare le soluzioni ottime possibili che rappresentano diversi livelli di compromesso tra il numero di valvole installate e la conseguente portata complessivamente persa dal sistema.

3.3 Tecniche di controllo continuo delle pressioni

Tutte le tecniche di ottimizzazione messe in evidenza nei precedenti paragrafi si basano su una ipotesi fondamentale, ovvero la conoscenza delle condizioni di erogazione della rete nelle ventiquattro ore. I modelli di ottimizzazione proposti infatti hanno il ruolo di minimizzare la funzione obiettivo, spesso rappresentata dalle perdite idriche in rete, ma si basano sui risultati di modelli di simulazione idraulica che, a loro volta, necessitano delle condizioni al contorno del sistema ovvero delle portate domandate ai nodi e dei livelli idrici nei serbatoi. Tali ipotesi risultano chiaramente indispensabili nell'ottica di dover determinare il posizionamento ottimale delle valvole; peraltro in Reis et al. (1997) viene mostrato come la soluzione del problema di posizionamento delle valvole venga poco influenzata dalla variazione temporale e spaziale delle portate erogate ai nodi.

Per quanto riguarda invece la regolazione delle valvole, nelle reti reali di acquedotto, quando le condizioni di erogazione del sistema risultano differenti da quelle ipotizzate, come normalmente accade nella pratica, i risultati dei modelli di ottimizzazione risultano avere una valenza esclusivamente teorica, in quanto non possono essere applicati nella realtà.

L'identificazione della corretta regolazione delle valvole deve dunque essere effettuata, per tutte le condizioni di erogazione prevedibili, in modo da rispettare i vincoli sui carichi piezometrici minimi ai nodi della rete.

Una soluzione semplice potrebbe essere quella di adoperare delle valvole a taratura fissa; tale taratura deve essere determinata in modo che, in condizione di massima erogazione, le pressioni ai nodi si mantengano entro i limiti imposti; in tal modo però non vengono compensati tutti quegli eccessi di pressione determinati dalla variabilità della portata, con una conseguente diminuzione dei livelli di performance in termini di riduzione delle perdite. Inoltre potrebbero venirsi a determinare condizioni di deficit di pressione nei casi di domanda straordinaria non previsti nella fase di taratura.

Al fine di minimizzare le pressioni, nel rispetto dei vincoli, nasce l'esigenza di implementare delle metodologie di controllo delle valvole che consentano di variare la taratura in continuo in funzione delle condizioni di erogazione della rete.

Per ottenere tali risultati è possibile fondamentalmente adoperare due approcci tecnologici.

L'approccio più semplice si basa sull'utilizzo di specifiche valvole di riduzione di pressione che, tramite appositi sistemi idraulici, consentono di stabilizzare la pressione di valle ad un valore desiderato (vedi anche §4.3.2). Il grande vantaggio di tale soluzione è che la sua implementazione necessita di un modesto livello tecnologico, che si limita all'acquisto della valvola; anche in termini di gestione non risultano necessarie particolari specifiche. Tuttavia il fatto che venga garantita la stabilizzazione della pressione solo a valle del punto di inserimento della valvola, fa sì che il livello piezometrico nel resto

della rete sia soggetto alle oscillazioni dovute alle variazioni delle condizioni di erogazione del sistema (si veda anche il §7.6); di conseguenza risulta necessario settare la pressione di set-point a valle della valvola in modo da garantire che, nel resto della rete, vengano rispettati i vincoli sulle pressioni minime, il che comporta, anche in tale caso, una riduzione dei livelli di performance in termini di riduzione delle pressioni e conseguentemente delle perdite.

La reale minimizzazione delle pressioni su tutti i nodi della rete, sempre nel rispetto dei carichi minimi, può essere ottenuta solo imponendo che la regolazione della valvola avvenga al fine di stabilizzare la pressione in uno o più nodi della rete appositamente scelti.

Tale risultato può essere ottenuto tramite tecniche di controllo in tempo reale (RTC), le quali consentono di regolare le valvole di riduzione di pressione in maniera continua e automatica in funzione di misure di pressione effettuate su nodi della rete appositamente scelti. Come meglio esposto nei capitoli successivi, tali tecniche si basano su soluzioni tecnologicamente avanzate che necessitano dell'implementazione di un sistema di telecontrollo nella rete acquedottistica. L'RTC garantisce dunque che, in ogni momento e in ogni condizione di erogazione del sistema, le valvole siano opportunamente settate in modo da garantire la pressione desiderata ai nodi di controllo scelti, evitando surplus di pressione e, conseguentemente, minimizzando le portate perse.

Nell'implementazione di un sistema di RTC, oltre alle soluzioni tecnologiche da adottare, è necessario stabilire quale logica di controllo adoperare e come scegliere i nodi su cui effettuare il controllo della pressione al fine di garantire il desiderato funzionamento di tutta la rete acquedottistica in esame.

In Campisano et al. (2010) vengono mostrati i benefici dell'utilizzo di tecniche di RTC per il controllo in tempo reale delle valvole di riduzione di pressione; come unità logica di controllo è stata utilizzata un'unità di tipo proporzionale (P).

Nello studio viene anche proposta una metodologia empirica per la scelta dei nodi di controllo; tale metodologia si basa su un'analisi di sensibilità dei nodi all'azione della valvola, ovvero sulla capacità delle caratteristiche dei nodi (pressione) di essere modificate dalle valvole. Il nodo scelto è quello che ha maggiore sensibilità e minore pressione.

Nei prossimi capitoli verrà dato ampio spazio alle modalità di implementazione dei sistemi di telecontrollo.

Capitolo 4

Tecniche per il controllo in tempo reale dei sistemi acquedottistici

4.1 Aspetti generali

Le reti acquedottistiche sono sistemi complessi il cui comportamento si evolve nel tempo in funzione e al fine di ottenere il soddisfacimento delle portate idriche domandate.

In talune condizioni si rende necessario l'inserimento di apparecchiature di controllo, quali valvole di sezionamento, valvole di regolazione, pompe, le quali devono essere opportunamente regolate per garantire le desiderate condizioni di esercizio del sistema.

Generalmente tali apparecchiature vengono controllate manualmente dal personale di servizio, anche se, grazie alle innovazioni tecnologiche, la gestione manuale può essere affiancata o sostituita da sistemi informatici che consentono di monitorare e controllare le condizioni operative e i principali parametri dei processi di distribuzione della risorsa idrica.

Ogni processo di controllo di un determinato fenomeno è composto da una fase di misura, necessaria per valutare il valore della variabile di processo da monitorare, e una fase di regolazione, con cui imporre nel processo la condizione desiderata; sia la fase di misura che quella di regolazione possono essere condotte manualmente o automaticamente.

Nei casi in cui il comportamento del sistema vari significativamente e rapidamente nel tempo, può essere utile adoperare tecniche di controllo in tempo reale (RTC) al fine di azionare in maniera automatica e continua i dispositivi di regolazione per mantenere così le variabili di interesse entro i valori desiderati.

I sistemi di RTC che è possibile adottare nei complessi acquedottistici variano molto in termini di complessità e di modalità di implementazione in funzione della tipologia del processo da controllare e del grado di automatizzazione desiderato; nel seguito vengono passati in rassegna alcune nozioni elementari utili per l'implementazione di un sistema di RTC nei sistemi acquedottistici.

4.2 Tecniche e strategie di controllo dei sistemi idrici

4.2.1 Tecniche fondamentali di controllo

Nell'implementazione di un sistema di controllo, una rete di distribuzione idrica può essere vista come un sistema definito che interagisce con l'ambiente esterno, ovvero il complesso delle singole utenze, scambiando con esso azioni e informazioni in maniera continua.

Le operazioni di scambio avvengono mediante l'utilizzo di cosiddette *variabili di processo* o di stato; si definisce processo la sequenza temporale delle trasformazioni di un sistema che a partire da uno o più dati di input restituisce uno o più risultati di output. Pertanto le variabili di processo sono distinguibili in variabili di input (indipendenti), che rappresentano l'influenza dell'ambiente esterno sul sistema, e variabili di output (o dipendenti), che rappresentano l'influenza del sistema sull'ambiente esterno. I dati di processo rappresentano i valori assunti, istante per istante, dalle variabili di processo e contengono dunque le informazioni relative allo stato del sistema.

Le tecniche di controllo, dei processi presenti in un sistema, possono distinguersi in due categorie:

- tecniche di controllo che impongono variazioni della variabile di output del processo secondo una sequenza prestabilita;
- tecniche di controllo che impongono variazioni della variabile di output del processo in funzione dei dati di processo rilevati.

I sistemi di controllo che ricadono nella prima categoria vengono definiti *sistemi aperti* mentre alla seconda categoria appartengono i *sistemi chiusi* (IAWPRC, 1989).

Nei sistemi aperti il controllo avviene in maniera prestabilita, senza rilevare gli effetti prodotti dal controllo stesso sul sistema, ovvero senza misurare le reali condizioni del processo; un esempio di tale tipologia di controllo, effettuata solitamente nelle reti irrigue o in reti di distribuzione con deficit idrici, è il controllo turnato, che prevede l'alimentazione di determinate porzioni della rete in determinati periodi temporali. L'efficienza dei sistemi aperti dipende esclusivamente dalle modalità con cui vengono stabilite le sequenze di comandi; la regolazione ottenuta non risente di problemi di instabilità in quanto non vengono effettuate misure della variabile di output con susseguenti operazioni di correzione. Adoperando metodi più evoluti, il controllo di un sistema aperto può essere effettuato con una sequenza adattiva, ovvero con una sequenza di operazioni che dipende dallo stato attuale e dalle previsioni di sviluppo del sistema.

I sistemi di controllo chiusi sono invece caratterizzati da cicli di controllo chiusi mediante il cosiddetto "controllo a catena" (backchaining); in tali sistemi il controllo viene effettuato in maniera ricorsiva sulla base delle misure della variabile controllata confrontate con i valori desiderati per la stessa. La differenza così ottenuta viene definita *errore di regolazione* e l'azione del sistema di controllo è tesa all'annullamento di tale errore. In funzione dell'errore di regolazione dunque il sistema di controllo determina il complesso di operazioni da effettuare al fine riportare il sistema entro le condizioni desiderate. Nel seguito si farà riferimento più che altro ai sistemi di controllo chiusi.

Un sistema di controllo chiuso necessita di un'implementazione tecnologica superiore rispetto a quelli aperti in quanto risulta necessaria la presenza di un'unità di misurazione,

di un'unità di controllo, tale da calcolare l'errore di regolazione e la relativa azione necessaria per ripristinare nel sistema le condizioni desiderate, nonché di un dispositivo di attuazione tale da operare il controllo sul sistema sulla base dei comandi determinati dall'unità di controllo.

In funzione della tipologia di controllo a catena, è possibile distinguere:

- controllo all'indietro (feedback), in cui l'unità di controllo agisce per compensare l'errore di regolazione non appena la misura della variabile di input del processo rileva una variazione causata dai disturbi del processo;
- controllo in avanti (feedforward), in cui l'azione dell'unità di controllo viene determinata sulla base delle misure del disturbo, prima che questo provochi la variazione della variabile di input del processo ovvero l'errore di regolazione;
- controllo misto, tipico dei sistemi più complessi e moderni, in cui l'azione dell'unità di controllo viene determinata sia sulla base delle misure della variabile di input del processo che dei disturbi che ne provocano la variazione.

Il limite dei sistemi di controllo chiusi risiede fondamentalmente nel rischio di ottenere regolazioni caratterizzate da instabilità, dovute principalmente alle sovracompensazioni dei disturbi esterni rilevati sul sistema; tali sovracompensazioni sono solitamente causate da un'eccessiva reattività del sistema di controllo dovuta ad una non corretta scelta dell'unità di controllo. Inoltre, proprio al fine di evitare instabilità e cattive regolazioni, è necessario imporre che la frequenza temporale con cui viene effettuato il controllo sia superiore alla frequenza caratteristica dei disturbi esterni che si intende compensare.

Infine, per limitare il numero di controlli effettuati dagli attuatori e per evitare inutili sovracompensazioni, spesso risulta conveniente imporre un livello di *sensibilità*, ovvero una tolleranza dell'errore di regolazione entro il quale non viene operata alcun controllo.

4.2.2 Livelli di informazione e controllo

Le tecniche di controllo in tempo reale possono trovare attuazione per mezzo di sistemi più o meno sofisticati a seconda delle esigenze del processo da controllare.

I sistemi di RTC maggiormente diffusi nelle reti di acquedotto sono quelli che prevedono la regolazione diretta dei dispositivi di attuazione sulla base di misure di livello o di pressione acquisite a livello locale.

Tuttavia, in alcuni casi di particolare complessità, è possibile che le informazioni disponibili a livello locale non siano sufficienti per operare una corretta regolazione dei dispositivi di attuazione; in tali casi risulta necessario implementare sistemi di controllo maggiormente complessi che consentano di avere a disposizione una maggiore quantità di dati.

L'idea di una struttura gerarchica e di livelli di controllo è stata già sviluppata per molte applicazioni industriali e risulta essere di estrema utilità per le applicazioni di RTC all'interno dei sistemi di drenaggio urbano; in generale i livelli di controllo possono essere distinti in *locale*, *regionale*, *globale* e *gestionale* (Jørgensen, 1994).

Chiaramente all'aumentare del livello di controllo risulta necessario avere a disposizione un livello di informazioni maggiore e più dettagliato rispetto ai livelli inferiori; nella pratica non è sempre possibile effettuare una netta distinzione tra i sistemi di RTC che agiscono a livello locale, regionale o globale perché, generalmente, tali

sistemi possiedono elementi di informazione e controllo che si trovano su vari livelli. Tuttavia nel seguito verrà data una breve descrizione delle principali caratteristiche dei vari livelli di informazione e controllo.

Il controllo locale è la più semplice fra le tecniche di RTC; esso avviene introducendo nel sistema idrico organi di regolazione allo scopo di mantenere, nel medesimo punto di inserimento dell'apparecchiatura, valori prefissati di pressione, di portata o di livello. Le informazioni utilizzate sono quelle ottenute da misurazioni effettuate nel sito ove viene operata la regolazione, senza che queste siano trasmesse ad una centrale operativa e senza considerare informazioni relative ad altre parti del sistema. Scegliere un livello di controllo di tipo locale significa, quindi, decentralizzare nei vari siti dei regolatori il controllo del sistema. Un esempio di controllo locale, nelle reti di acquedotto, sono le valvole di stabilizzazione della pressione di valle, anche se il funzionamento in tal caso è del tutto idraulico e non vi è un sistema di trasmissione elettronico di dati.

L'implementazione di un sistema di controllo locale ha ovvi vantaggi per la sua semplicità di realizzazione e rappresenta la soluzione ottimale se si è in presenza di un solo regolatore con il controllo di un'unica variabile in prossimità del regolatore stesso.

Solitamente però, nelle reti acquedottistiche, vengono inseriti più organi di regolazione, da controllare in funzione di informazioni da reperire in vari punti della rete, non necessariamente vicini ai punti ove viene operata la regolazione. In tali casi risulta necessario implementare un livello di controllo regionale. Il controllo regionale è un livello intermedio tra i livelli di controllo locale e globale, e differisce dal primo solo per il numero di sensori e di attuatori nonché per la presenza di un sistema di trasmissione delle informazioni a distanza. In generale i sistemi di controllo regionale sono decentralizzati e hanno caratteristiche molto semplici, non richiedono l'elaborazione di un gran numero di dati ed inoltre le operazioni di regolazione risultano essere assolutamente indipendenti da quelle effettuate da altri sistemi di controllo regionale. Un esempio di controllo regionale è quello che viene implementato per le valvole di riduzione della pressione, non interagenti tra loro, controllate sulla base di misure effettuate in appositi nodi della rete, non in prossimità delle valvole stesse.

Quando invece il sistema di RTC è più complesso, se i diversi organi di regolazione operano in maniera indipendente senza un coordinamento unitario, può accadere che la regolazione complessiva del sistema non risulti ottimale. Ciò accade quando, ad esempio, le azioni di un organo di regolazione influiscano notevolmente su quelle degli altri, provocando un decadimento dei livelli di performance del sistema complessivo; anzi, è possibile affermare che, più elevato è il numero dei regolatori inseriti in rete, maggiore è la probabilità che i loro movimenti si condizionino vicendevolmente. In tali casi, una maggiore efficienza del sistema di controllo è ottenibile gestendo i regolatori in connessione tra loro, operando così in maniera coordinata; per ottenere questo genere di funzionamento occorre utilizzare un livello di controllo di tipo globale.

Secondo tale approccio, di tipo centralizzato, le misure effettuate in tutto il sistema vengono inviate in tempo reale ad una stazione centrale ed elaborate in maniera unitaria in modo da determinare i comandi e le decisioni operative da inviare ai singoli regolatori.

In funzione dell'estensione e della complessità della rete, il livello di controllo di tipo globale può essere strutturato anch'esso in forma "gerarchica", con più sottolivelli decisionali per l'esecuzione delle direttive elaborate ed impartite dalla centrale operativa principale.

Inoltre, in alternativa o in affiancamento ai sistemi di controllo di tipo globale, è possibile implementare sistemi di controllo a intelligenza distribuita; tali sistemi sono dotati di capacità di elaborazione delle informazioni in modo che le decisioni vengano prese non solo a livello centralizzato ma anche a livello locale. Ciò consente non solo di alleggerire l'onere di calcolo della centrale operativa principale, quanto piuttosto di mantenere un'autonomia decisionale a livello locale tale da poter eseguire più efficacemente le direttive centrali, o in caso di necessità addirittura di rifiutarle qualora risultassero incoerenti con la situazione locale.

Infine con l'implementazione di un livello di controllo gestionale, adoperando i dati acquisiti e le regolazioni effettuate, è possibile aggiungere svariate funzioni al sistema di controllo globale; tra queste la possibilità di analizzare i dati acquisiti ed effettuare le necessarie elaborazioni statistiche, pianificare le operazioni di manutenzione di tutti gli elementi del sistema, effettuare la gestione amministrativa dei materiali e delle forniture, ecc.

Le elaborazioni così effettuate permettono dunque l'analisi delle prestazioni ottenute nella gestione dell'intero sistema, esaminato nella sua globalità, consentendo anche, se necessario, la modifica delle strategie utilizzate per il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

4.2.3 Livelli di automazione

L'implementazione di un qualunque sistema di RTC può essere effettuata con un livello crescente di automazione in funzione, in particolare, della specifica complessità del processo da controllare e del livello di informazione e controllo che si intende adottare. Possono inoltre intervenire considerazioni di carattere economico e organizzativo nella scelta del livello di automazione del sistema di RTC in quanto, al crescere di tale livello, decresce la quantità di manodopera ma aumenta il livello tecnologico del sistema di controllo nonché le competenze tecniche necessarie per una sua corretta gestione.

In generale dunque, in funzione del grado di automazione è possibile distinguere tre modalità di controllo: *manuale*, di *supervisione* e *automatica* (Schilling et al, 1996).

In *modalità manuale* le operazioni di controllo sono affidate ad un operatore che, in base alla propria sensibilità e alla propria esperienza in merito al funzionamento idraulico della rete, aziona direttamente le apparecchiature di regolazione al fine di ottenere il risultato desiderato. Tale modalità di controllo è tipico di piccole reti idriche in cui si prevede di effettuare un controllo non frequente da operare in particolari condizioni di emergenza; il livello tecnologico necessario si limita alle apparecchiature di regolazione e il livello di formazione degli operatori impiegati è limitato alla conoscenza empirica del funzionamento della specifica rete.

In *modalità di supervisione* invece il sistema è gestito in modo che i regolatori vengano controllati tramite unità di controllo locali, le cui strategie operative vengono però impostate da un operatore; quest'ultimo deve avere un elevato livello di formazione non solo relativamente al funzionamento idraulico della specifica rete in esame, ma anche del funzionamento tecnologico del sistema di RTC. La determinazione delle strategie operative consiste in particolare nel corretto settaggio dei parametri degli algoritmi usati dalle unità di controllo nonché nell'individuazione dei corretti valori di set-point da

assegnare alle variabili di controllo locale. Tali decisioni operative di controllo possono essere agevolate dall'utilizzo di appositi software, i quali possono essere usati in diverse configurazioni:

- *off-line*: il software è del tutto scollegato dal processo e determina i settaggi ottimali per l'operatore sulla base delle informazioni e delle misurazioni del processo effettuate dall'operatore stesso.
- *on-line*: le informazioni vengono trasferite automaticamente dal processo al software, il quale "consiglia" l'operatore nella determinazione dei nuovi settaggi. In tale configurazione il software può avere funzioni di allarme o di acquisizione, registrazione ed elaborazione dei dati.
- *in-line*: in alcuni cicli del processo i nuovi settaggi vengono definiti direttamente dal software e l'operatore deve solo confermarli in funzione del proprio giudizio.

Alcuni software possono essere implementati per simulare ed analizzare gli effetti prodotti da una determinata operazione di regolazione prima che questa venga eseguita; tali modelli di simulazione possono anche essere accoppiati a sistemi esperti che sfruttano l'archivio di operazioni già effettuate con le conseguenti risposte idrauliche del sistema. I sistemi di supervisione rappresentano il primo passo per la totale automazione nel controllo delle reti di acquedotto.

In *modalità automatica* le decisioni e le strategie operative di controllo vengono eseguite in maniera totalmente automatica da un computer centrale senza richiedere la presenza costante di un operatore. Tali sistemi automatici vengono appositamente implementati tramite sistemi esperti, reti neurali, algoritmi di ottimizzazione, ecc, che devono essere correttamente messi a punto per il sistema in esame al fine di ottenere elevati livelli di performance.

4.3 I dispositivi e la rete hardware

In qualunque sistema di controllo in tempo reale, a prescindere dal tipo di strategia di controllo adottata, è sempre presente uno o più gruppi delle seguenti apparecchiature hardware (Weyand, 1990; Cassar & Dettmar, 1996):

- un "misuratore" che rilevi le grandezze variabili dalla cui misura dipende la regolazione;
- un "regolatore" o "attuatore" che sia in grado di modificare il processo idraulico che si intende regolare;
- una "unità di controllo" (o controller) che determini le regolazioni da imporre all'attuatore in modo da ricondurre la variabile di processo al valore desiderato (set-point); tale valore può essere prefissato una volta per tutte (set-point costante) oppure può variare durante l'evento (set-point variabile) a seconda delle informazioni che l'unità di controllo riceve dalle misure locali dei sensori ad essa direttamente asserviti o da una centrale operativa;
- due "trasduttori", di cui uno che fornisca i dati misurati dal sensore all'unità di controllo e un secondo che fornisca i comandi dell'unità di controllo all'attuatore.

Un gruppo operativo formato dall'insieme delle apparecchiature sopra elencate è indicato con il termine di "gruppo di controllo elementare".

In funzione del numero di attuatori da regolare, della complessità del controllo da effettuare e del livello di automazione da raggiungere, il sistema di RTC globalmente può essere visto come un sistema di gruppi di controllo elementare, o unità locali, che hanno la possibilità di scambiare informazioni tra loro e che possono essere coordinati da un'unità centrale.

In tale contesto può risultare necessario implementare un vero e proprio sistema di trasmissione dati complesso nonché dei protocolli di comunicazione che consentano una razionalizzazione della quantità di dati trasmessi senza che ciò comporti una diminuzione dei dati a disposizione, utili per operare il controllo del sistema complessivo.

Inoltre la stazione centrale deve essere dotata di appositi software in grado di acquisire, elaborare e gestire tutte le informazioni provenienti dalle unità locali; tale obiettivo viene raggiunto mediante l'implementazione di sistemi SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), ovvero di sistemi informatici distribuiti per il monitoraggio e il controllo elettronico di processi industriali. In Figura 4.1 viene riportata una schematizzazione delle componenti hardware e software di un sistema di RTC complesso (EPA, 2006).

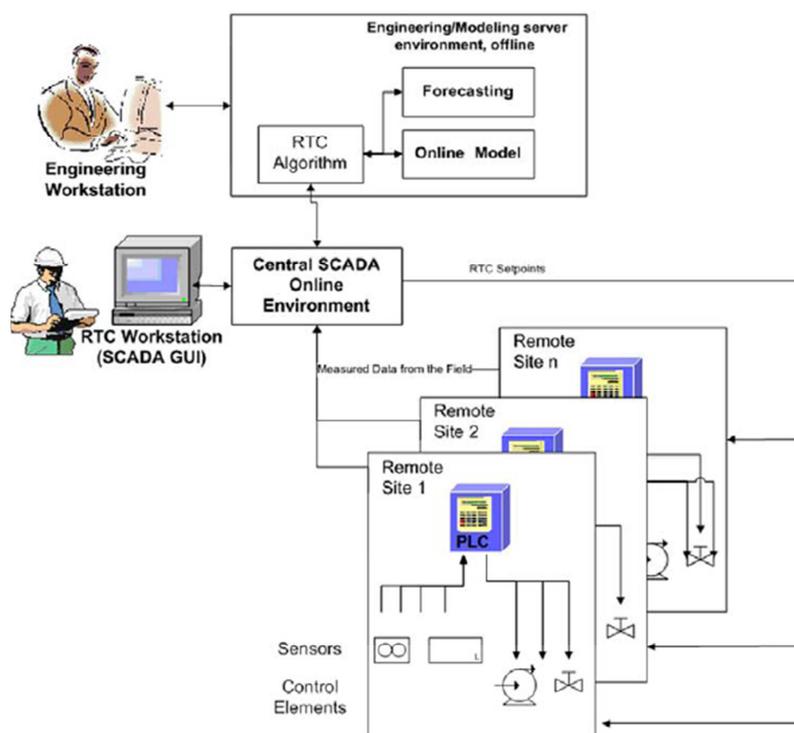


Figura 4.1: Schematizzazione delle componenti hardware e software di un sistema di RTC complesso (EPA, 2006)

Nel seguito viene fornita una breve descrizione dei dispositivi utili per l'implementazione operativa di un sistema di RTC in una rete di acquedotto.

4.3.1 Misuratori

Le misurazioni rappresentano la prima fase del complesso sistema di controllo di una rete di acquedotto; tali misurazioni vengono effettuate a livello locale e si realizzano mediante sensori opportunamente scelti e posizionati in specifici punti significativi della rete.

I sensori oggi adoperati hanno, nella maggior parte dei casi, anche la funzione di trasduttori e possono avere un'uscita analogica e/o un'uscita digitale; in particolare casi vengono anche integrati sistemi di trasmissione dati (GSM, radio, internet, ecc) che consentono di evitare, nelle stazioni di sola misura, l'installazione di ulteriori apparecchiature.

Occorre sottolineare che, nell'ambito delle misure di grandezze idrauliche, mentre lo sviluppo dei sistemi informatizzati è estremamente rapido, quello dei sensori e delle tecniche per le misure risulta invece relativamente lento (Briggs et al., 1985); ciò è evidente se si pensa alla mole di sperimentazione necessaria per la messa a punto di una nuova tecnologia di misura prima di essere messa sul mercato.

A prescindere dalla grandezza che si intende misurare, ad oggi le tecniche di misura possibili sono molte e le apparecchiature che è possibile impiegare sono diverse; una scelta consapevole non può prescindere da una corretta comprensione dei fenomeni in atto e dei conseguenti limiti e vantaggi di ciascuna tecnologia e apparecchiatura nei relativi campi di applicazione.

Di seguito è riportato un elenco completo delle caratteristiche, da valutare caso per caso, degli strumenti per misure idrauliche (Pulci Doria, 1992):

- accuratezza delle misure;
- portata (valore massimo misurabile della grandezza sotto osservazione);
- costante strumentale (differenza in valore assoluto fra due graduazioni successive della scala di misura);
- sensibilità (rapporto tra la grandezza elettrica e meccanica rilevata dallo strumento e la grandezza che si vuole misurare);
- valore di soglia (valore minimo della grandezza da misurare oltre il quale il funzionamento dello strumento non risulta affidabile);
- linearità (capacità di fornire uno spostamento dell'indice finale di lettura che risulti proporzionale alla grandezza misurata e fornita in ingresso allo strumento);
- risoluzione spaziale (capacità di esaminare zone del flusso di dimensioni particolarmente ridotte);
- disturbo al flusso (dovuto all'inserimento della stessa strumentazione);
- risoluzione temporale (capacità di seguire e misurare segnali variabili nel tempo con particolare rapidità);
- impedenza di uscita (fondamentale se si vuole utilizzare il segnale in uscita per acquisizioni o trasmissioni di tipo elettronico);
- rapporto segnale-disturbo (anch'esso interessa solo gli strumenti elettronici).

Non bisogna trascurare che solitamente le apparecchiature di misura vengono installate in ambienti esterni o sotterranei, il che implica l'aggressione degli agenti

atmosferici o più in generale l'interazione con le attività presenti in loco; bisogna dunque verificare che le misurazioni effettuate non vengano inficiate da tali fattori.

Nelle reti di distribuzione idrica, le grandezze che solitamente vengono misurate, al fine di mettere a punto un sistema di controllo, sono le portate idriche, le pressioni e i livelli idrici nei serbatoi.

MISURATORI DI PORTATA

I dispositivi atti a misurare le portate idriche possono essere basati su vari principi fisici. Essenzialmente i principi di misura si basano sulla rilevazione della velocità media del fluido in un condotto di sezione nota, ovvero sulla rilevazione del volume transitato nell'unità di tempo.

Le tipologie di misuratori di portata oggi maggiormente adoperati nelle reti di distribuzione idrica sono i misuratori a turbina, i misuratori ad induzione elettromagnetica e i misuratori a ultrasuoni.

I *misuratori a turbina* (Figura 4.2a) consentono di contare il numero di giri di una piccola elica immersa nel fluido in movimento, con asse parallelo alla direzione del flusso. I vantaggi di questi strumenti sono l'elevata precisione ($\pm 5\%$), ampio campo di misura, basse perdite di carico e costi relativamente contenuti, in particolare per diametri medio-piccoli, mentre gli svantaggi possono essere individuati nell'usura delle parti in movimento e nella delicatezza delle parti mobili; inoltre bisogna sempre verificare che i misuratori a turbina funzionino sempre in condizione di "tubazione piena" e che non vi siano eccessive quantità d'aria in condotta. I misuratori a turbina più recenti sono già predisposti con appositi "lanciaimpulsi" che consentono di avere, in uscita, un segnale analogico o digitale, necessario per operare controlli in remoto.

I *misuratori ad induzione elettromagnetica* (Figura 4.2b) sfruttano la legge di Faraday e in particolare la forza elettromotrice generata dal prodotto del flusso del campo magnetico, appositamente indotto trasversalmente alla tubazione, per la velocità media della corrente; sfruttando tale principio, appositi elettrodi isolati posti a contatto del fluido misurano la differenza di potenziale proporzionale alla velocità media della corrente e, nota la sezione, si risale alla portata volumetrica della corrente idrica. Tali misuratori sono dunque costituiti da un tubo di materiale amagnetico, rivestito all'interno di materiale isolante con all'esterno delle bobine percorse da corrente che generano un campo magnetico tale da investire tutta la sezione del tubo, e infine due o più elettrodi per la misura della differenza di potenziale indotta nel flusso. I misuratori elettromagnetici si distinguono per la linearità della misura, per l'assenza di organi in movimento, per l'assenza di perdite di carico dovute alla strumentazione e per l'accuratezza delle misure ($\pm 2\%$); inoltre esiste una nuova generazione di misuratori elettromagnetici che consentono di misurare le portate anche in condizione di tubo parzialmente pieno. Gli svantaggi possono essere individuati negli elevati costi di acquisto, che rendono difficile il loro impiego per piccoli diametri, e nella durata degli elettrodi in condizioni aggressive.

I *misuratori a ultrasuoni* (Figura 4.2c) utilizzano la proprietà dei liquidi di propagare il suono con una celerità caratteristica del liquido considerato, ma dipendente anche da caratteristiche fisiche quali pressione, densità e soprattutto temperatura. Vi sono due tipologie di misuratori a ultrasuoni: a tempo di transito o a riflessione, a seconda che non venga misurato il tempo di transito del suono attraversato dalla corrente idrica tra la

sorgente e il ricevitore, o il tempo intercorso tra l'emissione dell'onda sonora e la ricezione della medesima onda riflessa dal fluido. I vantaggi di tali misuratori possono essere individuati nella linearità della misura, nell'assenza di organi in movimento e nell'assenza di perdite di carico, mentre il principale svantaggio risiede nella necessità di un accurata calibrazione preliminare e negli elevati costi. I misuratori a ultrasuoni sono molto utilizzati nelle reti di acquedotto nel formato portatile, per effettuare misure di campo in punti della rete non provvisti di misuratori fissi.

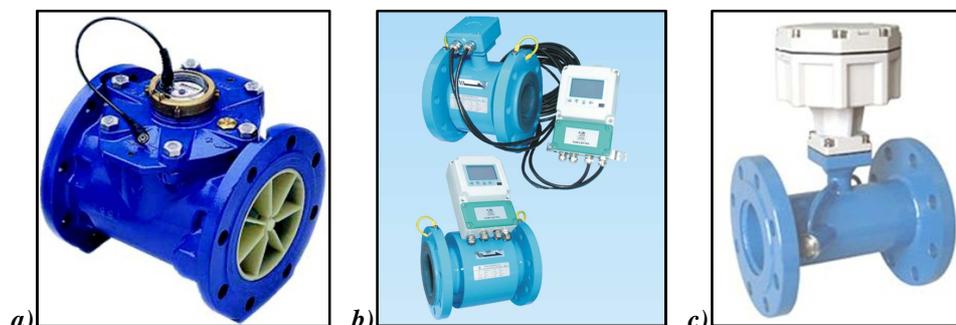


Figura 4.2: Immagini di misuratori di portata: a) misuratore a turbina, b) misuratore elettromagnetico, c) misuratore a ultrasuoni

In generale i misuratori di natura elettronica, in particolare i misuratori elettromagnetici, sono preferibili nell'utilizzo in sistemi di RTC; tali applicazioni sono state inoltre favorite negli ultimi anni grazie al perfezionamento di tali strumentazioni e alla loro integrazione con apparecchiature accessorie quali batterie al litio a lunga durata, che risolvono il problema dell'assenza di energia elettrica nel sito di installazione, di piccoli elaboratori numerici nonché di sistemi di trasmissione dati.

MISURATORI DI PRESSIONE

Per la misura della pressione nelle condotte di distribuzione esistono varie tipologie di sensori in commercio. La scelta del sensore dipende principalmente dalle condizioni di utilizzo (range richiesto, temperatura operativa, ecc), dalle caratteristiche richieste (accuratezza, sensibilità, tempo di risposta/risposta in frequenza, tipo di segnale in uscita) nonché dal costo.

I sensori per la rilevazione delle pressioni possono essere classificati in base al principio fisico di funzionamento adottato:

- *gravitazionali*, basati sulla misura dell'altezza della colonna di liquido (manometri a U);
- *meccanici*, basati sulla deformazione di un elemento plastico o a soffietto (es. tubi di Bordon, diaframmi, ecc);
- *elettrici*, sfruttano la capacità di alcuni materiali di modificare le proprie caratteristiche elettromagnetiche quando vi viene applicata una pressione;

I manometri gravitazionali solitamente non sono usati nei sistemi di automazione di processi, in particolare nelle reti idriche.

Alla categoria dei sensori meccanici appartengono i tubi di Bourdon, basati sulla misura della deformazione, in termini di raggio di curvatura, indotta dalla pressione dell'acqua su un tubo di sezione ellittica, chiuso ad una estremità, disposto a spirale; tale apparecchiatura è utilizzabile per la misura di pressioni medio-basse ed è caratterizzata da una media sensibilità e scarsa accuratezza. A tale categoria appartengono anche i sensori a soffiello che convertono la pressione applicata in uno spostamento lineare; la sensibilità dipende dall'elasticità del materiale impiegato: soffielli in gomma hanno alta sensibilità e misurano pressioni modeste, mentre soffielli metallici consentono di misurare pressioni anche molto elevate. I misuratori a diaframma o a membrana si basano sulla misura del rigonfiamento provocato dalla pressione su una membrana; sono molto usati come manometri differenziali tra due fluidi a pressioni differenti.

Tra i sensori elettrici è possibile distinguere:

- *sensori piezoelettrici* (Figura 4.3.a): si basano su quello che viene comunemente chiamato "effetto piezoelettrico" ovvero la proprietà di alcuni cristalli, spesso quarzo, di generare una differenza di potenziale quando soggetti ad una deformazione meccanica; la misura di tale differenza di potenziale consente dunque di risalire all'entità della sollecitazione meccanica che l'ha provocata, ovvero della pressione. I principali vantaggi di tale tecnologia sono l'ottima risposta in frequenza e la discreta accuratezza, mentre i limiti possono essere individuati negli elevati costi e nell'elevata impedenza in uscita.
- *Sensori piezoresistivi* (Figura 4.3.b): si basano sul fenomeno della "piezoresistenza" ovvero sulla capacità dei materiali di variare la propria resistenza elettrica se sottoposti ad una forza esterna; tale capacità è maggiormente rilevabile in alcuni materiali come i cristalli di silicio e, al contrario dell'effetto piezoelettrico, si manifesta sia in condizioni statiche che dinamiche. Questa tipologia di sensori sono caratterizzati da una buona risposta in frequenza, elevata compensazione termica, basso costo e compattezza; di contro il range di temperatura di impiego è limitata e la resistenza alle sovra-tensioni è modesta.
- *Sensori induttivi*: sfruttano la variazione di induttanza dovuta alla traslazione di due nuclei di ferrite per effetto del movimento di un diaframma; vengono prevalentemente usati come sensori differenziali.
- *Sensori capacitivi* (Figura 4.3.c): si sfrutta la variazione di capacità di un condensatore in funzione della variazione della distanza di due armature o del dielettrico.



Figura 4.3: Immagini di misuratori di pressione: a) sensore piezoelettrico, b) sensore piezoresistivo, c) sensore capacitivo

Le caratteristiche dei sensori elettrici li rendono i principali misuratori da utilizzare nelle applicazioni di sistemi di RTC; tali misuratori sono caratterizzati da un'elevata affidabilità e richiedono, in genere, una limitata manutenzione.

Inoltre, in particolare rispetto ai misuratori di portata, i misuratori di pressione risultano molto più economici e richiedono una quantità di energia elettrica minima per il loro funzionamento.

MISURATORI DI LIVELLO

In un sistema acquedottistico le misure di livello rivestono una parte importante nel controllo della rete di distribuzione; possono essere implementate nei seppur rari canali a pelo libero, nelle vasche di calma, ma più normalmente nei serbatoi di accumulo.

Storicamente i misuratori di livello maggiormente adoperati sono gli *idrometri a galleggiante*, i quali misurano l'escursione di livello su una scala graduata; tale tipologia di apparecchiatura è del tutto meccanica e si distingue per robustezza e affidabilità. L'evoluzione degli idrometri a galleggiante è rappresentata dagli idrometri analogici i quali consentono, tramite un segnale elettrico, l'utilizzo della misura diretta con galleggiante per la trasmissione dei dati a distanza o per la loro elaborazione e archiviazione in sito.



Figura 4.4: Immagini di idrometri analogici a galleggiante

Altri tipi di misuratori sono gli idrometri ad ultrasuoni (Figura 4.5) i quali vengono posizionati in punti più elevati rispetto al livello idrico massimo e inviano impulsi a ultrasuoni che, con la loro riflessione sulla superficie libera, consentono di individuare la distanza tra l'apparecchio stesso e il pelo libero e di conseguenza di risalire al livello idrico rispetto al fondo. Per questi dispositivi esistono, comunque, problemi di falsi echi causati da bassi tiranti e le onde superficiali possono alterare il segnale. I pregi risiedono principalmente nell'assenza di parti meccaniche in movimento e nella conseguente maggiore affidabilità.

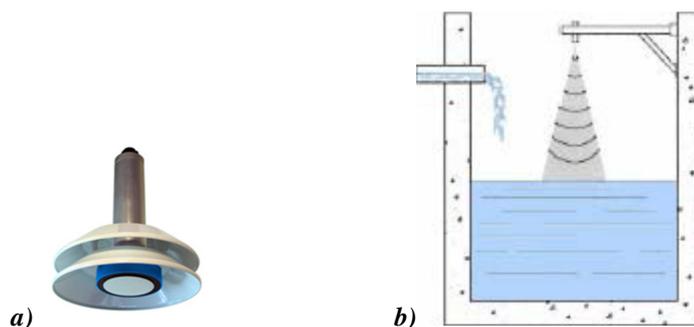


Figura 4.5: Immagine di a) un idrometro a ultrasuoni e b) della modalità di installazione

Le misure di livello possono essere effettuate anche indirettamente tramite misure di pressione (statica), impiegando dei trasduttori di pressione, per come sopra descritti, installati ad una prescelta quota di riferimento.

4.3.2 Regolatori

Nei sistemi acquedottistici le esigenze di controllo e regolazione delle condizioni di funzionamento della rete possono essere soddisfatte mediante apposite apparecchiature. Le principali apparecchiature di controllo utilizzate possono essere distinte in tre categorie: dispositivi di intercettazione, dispositivi di regolazione e dispositivi di pompaggio.

Tutte le apparecchiature di controllo possono essere azionate manualmente o tramite attuatori di varia natura; esistono in commercio attuatori elettrici, attuatori pneumatici e anche attuatori idraulici. Chiaramente l'utilizzo di tali attuatori consente il controllo delle apparecchiature anche in remoto.

DISPOSITIVI DI INTERCETTAZIONE

I dispositivi di intercettazione sono ideati per interrompere o consentire il flusso dell'acqua all'interno di una tubazione (modalità on/off); dovrebbero essere adoperati dunque solo in modalità tutta aperta o tutta chiusa, anche se spesso ciò non accade. In funzione della geometria degli organi meccanici, è possibile distinguere le tipologie di dispositivi maggiormente adoperati: valvole a saracinesca, valvole a farfalla e valvole a sfera.

Le *valvole a saracinesca* (Figura 4.6a) realizzano l'interruzione del flusso tramite un otturatore che si muove linearmente sulla sezione trasversale della corrente; vengono realizzate in ghisa o in acciaio, con rivestimento in resine epossidiche, e sono composte dal corpo valvola, dall'otturatore e dallo stelo. All'aumentare della pressione di esercizio si possono distinguere saracinesche a corpo piatto (10 bar), a corpo ovale (10-16 bar), a corpo cilindrico (25-40 bar) o in tenuta di autoclave (oltre 40 bar). Le valvole a saracinesca risultano abbastanza economiche ma sono molto ingombranti e nel tempo sono soggette all'usura di alcuni componenti, in particolare degli organi di tenuta.

Le *valvole a farfalla* (Figura 4.6b) realizzano l'interruzione del flusso tramite un otturatore che ruota attorno ad un asse normale a quello del tubo ostruendone la sezione;

tale tipologia di otturatore si distingue per le modeste perdite di carico provocate in condizione di valvola tutta aperta, mentre in condizione di media apertura vengono generate forti turbolenze e per tale motivo non dovrebbero essere adoperate per la regolazione. Tali tipologie di valvole vengono spesso preferite alle saracinesche, nonostante il costo più elevato, per la compattezza, la facilità di manutenzione e per la maggiore affidabilità.

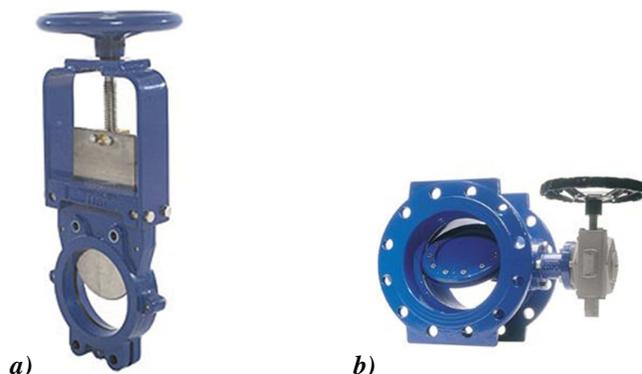


Figura 4.6: Immagini di a) valvola a saracinesca (a ghigliottina), b) valvola a farfalla

Le valvole a sfera si basano sulla rotazione di 90° di un otturatore sferico dotato di una cavità cilindrica coassiale al flusso. Con riferimento alla Figura 4.7, una valvola a sfera è composta da corpo (1), tenute (2), otturatore (3), leva di azionamento (4) e stelo (5). Solitamente le valvole a sfera vengono largamente impiegate per i piccoli diametri, mentre per i diametri elevati i costi risultano spesso proibitivi.

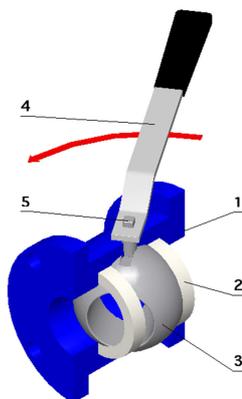


Figura 4.7: Sezione di una valvola a sfera parzialmente aperta

DISPOSITIVI DI REGOLAZIONE

I dispositivi di regolazione vengono utilizzati nelle reti acquedottistiche per modulare le portate e/o le pressioni; in realtà il principio di regolazione in entrambi i casi è il

medesimo: provocare perdite di carico concentrate in modo da ridurre l'energia della corrente coerentemente con il risultato che si desidera raggiungere. Tale risultato viene ottenuto per mezzo di appositi otturatori che consentono di variare l'area di passaggio dell'acqua; costruttivamente tali otturatori vengono realizzati in modo da evitare, quanto più è possibile, l'innesco di turbolenze che possono provocare fenomeni di cavitazione e/o di moto vario fortemente indesiderati.

Tra i dispositivi di regolazione maggiormente adoperati vi sono le valvole a fuso, nelle quali la regolazione avviene tramite lo spostamento assiale di un otturatore cilindrico, azionato da un meccanismo biella-manovella (Figura 4.8a); l'otturatore si chiude seguendo il flusso e si muove in una camera a pressione compensata, conferendo alla valvola un funzionamento stabile ed esente da vibrazioni (Figura 4.8b); a tale scopo l'otturatore viene appositamente profilato, sia nella parte di monte che di valle, al fine di allineare i filetti fluidi e ridurre quanto più è possibile le turbolenze. La portata d'acqua viene così incanalata in una luce a forma di corona circolare che decresce progressivamente dalla sezione di ingresso verso la sede di tenuta.

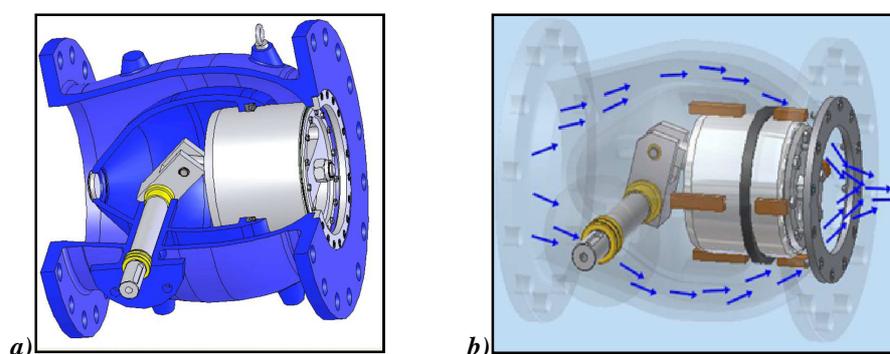


Figura 4.8: Immagini di valvola a fuso a) particolari costruttivi, b) schema di funzionamento

Al variare del grado di apertura dell'otturatore, la valvola genera una perdita di carico localizzata che permette di raggiungere la condizione desiderata. La perdita di carico localizzata risulta proporzionale al carico cinetico della corrente secondo un coefficiente di perdita di carico funzione del grado di apertura della valvola; la relazione tra coefficiente di perdita di carico e grado di apertura della valvola viene ottenuta sperimentalmente e fornita dalle case costruttrici sotto forma di curve su scala logaritmica (Figura 4.9). Nelle valvole a fuso più moderne vengono installati degli appositi cestelli che consentono di mitigare i fenomeni di cavitazione che possono innescarsi in particolari condizioni di valvola molto chiusa. Per evitare tali fenomeni è consigliabile non adottare gradi di apertura inferiori al 10%. Nell'installazione di una valvola a fuso è molto importante tenere in considerazione che, anche in condizione di totale apertura, tali dispositivi generano ingenti perdite di carico localizzate, il che può creare dei deficit di pressione quando la rete idrica è nella condizione di massima erogazione e il carico disponibile risulta modesto.

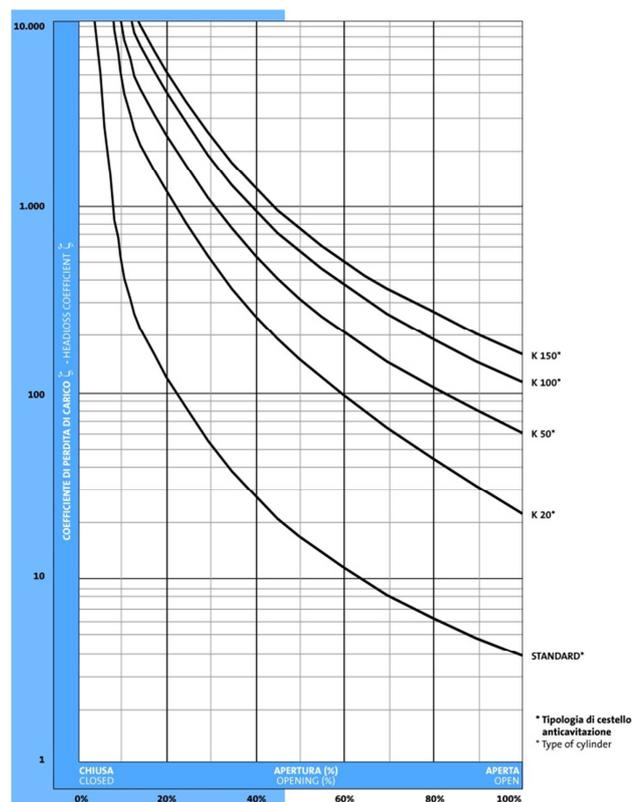


Figura 4.9: Curve di perdita di carico in funzione del grado di apertura di valvole a fuso, al variare del cestello anticavitazione utilizzato (Pam Italia S.p.A. – Saint Gobain)

Nei casi in cui il carico piezometrico disponibile risulti superiore a quello desiderato in ogni condizione di erogazione della rete, può risultare conveniente installare la valvola di regolazione con un diametro inferiore rispetto a quello della tubazione in cui viene inserita; in tal modo infatti si aumenta il carico cinetico e si opera su una parte della curva con grado di apertura superiore, ottenendo regolazioni più omogenee.

Tra i dispositivi di regolazione esistono delle particolari *idrovalvole a membrana* che consentono la stabilizzazione automatica della pressione a valle della valvola stessa, secondo un principio di funzionamento esclusivamente idraulico; osservando la Figura 4.10 è possibile comprendere come tale organo di regolazione funzioni per mezzo di una membrana che crea, col corpo superiore della valvola, una camera di controllo. La differenza tra la pressione a monte della valvola e la pressione nella camera di controllo, appositamente definita tramite un by-pass pilota calibrato, determina la posizione dell'otturatore e di conseguenza la pressione di valle. I vantaggi di tali tipologie di valvole risiedono nella loro intrinseca auto-regolazione, senza che ciò richieda alcun sistema di trasmissione dati né controllo di alcun genere; inoltre il loro azionamento non necessita di alcuna forma di energia in quanto è la pressione stessa che rende possibile il funzionamento.

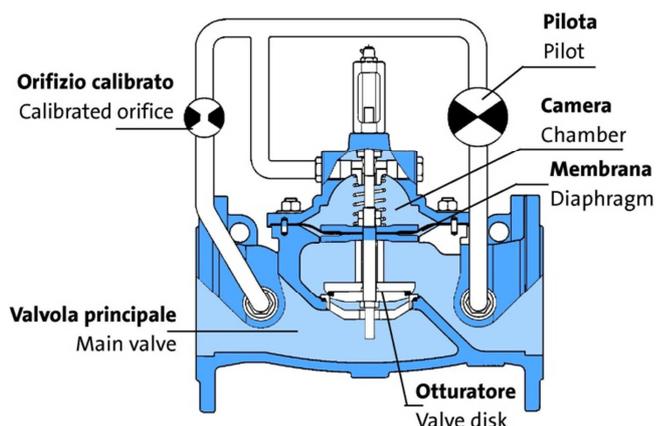


Figura 4.10: Schema di funzionamento di un'idrovalvola di regolazione a membrana (Pam Italia S.p.A. – Saint Gobain)



Figura 4.11: Immagine di un'idrovalvola a membrana sezionata (Pam Italia S.p.A. – Saint Gobain)

Il medesimo principio di funzionamento viene sfruttato dalle cosiddette *idrovalvole a pistone*, che differiscono dalla precedente tipologia solo per l'organo meccanico adoperato.

DISPOSITIVI DI POMPAGGIO

E' prassi consolidata, nelle reti di distribuzione idrica, adoperare dei sistemi di pompaggio per alimentare le porzioni di rete ove il carico piezometrico risulti insufficiente. Normalmente a tale scopo vengono impiegate delle pompe a velocità costante, ovvero che operano a prescindere dall'entità delle portate domandate alle utenze; ciò fa sì che, essendo dimensionate tali pompe per la condizione di massima erogazione, quando le portate risultano inferiori a quelle massime di progetto, le pressioni

in rete risultano superiori a quelle desiderate, con conseguente inutile dispendio di energia. Un'innovazione tecnologica che consente di far fronte a tale problematica è costituita dall'impiego di *pompe a velocità variabile*. Come sostenuto da diversi autori (Lingireddy & Wood, 1998) l'utilizzo di pompe a velocità variabile negli impianti di sollevamento e distribuzione degli acquedotti consente di ottenere diversi vantaggi, tra cui:

- minimizzazione delle pressioni in eccesso e dell'energia utilizzata per il funzionamento delle pompe;
- contenimento delle perdite;
- miglioramento del sistema di distribuzione dal punto di vista economico-gestionale e della qualità del servizio offerto agli utenti.

Il funzionamento delle pompe a velocità variabile è basato sull'utilizzo di un motore asincrono trifase e un convertitore di frequenza (Variable Frequency Drivers o inverter); il convertitore di frequenza consente di avviare, regolare, controllare e proteggere il motore asincrono. Adoperando tale tecnologia dunque i giri del motore vengono regolati in funzione della portata erogata alle utenze e mantenendo, di conseguenza, sempre la medesima pressione desiderata in rete.

4.3.3 Unità di controllo

Nei sistemi di RTC rivestono grande rilevanza le *unità di controllo*, ovvero i dispositivi che determinano il controllo da imporre agli organi di regolazione.

La fase di controllo, come già ampiamente esposto, può svolgersi sia a livello locale sia a livello globale e consiste nella determinazione dei comandi operativi da imporre agli organi di regolazione in funzione della differenza tra i valori delle grandezze rilevate ai misuratori e i valori desiderati di set-point.

Le unità di controllo possono essere di varia natura in base al principio di funzionamento; in passato venivano molto adoperate le unità di controllo meccaniche e pneumatiche, che però non consentivano il controllo dei dispositivi in remoto. Anche il sistema idraulico di stabilizzazione della portata di valle, sfruttato nelle idrovalvole a membrana descritte nel precedente paragrafo, concettualmente può essere visto come un'unità di controllo automatica.

Con lo sviluppo della micro-elettronica, e la conseguente diminuzione dei costi, si sono diffuse anche nel settore acquedottistico le unità logiche basate su microprocessori.

I sistemi di telecontrollo tradizionali sono costituiti da RTU (*Remote Terminal Unit*) che acquisiscono condizioni, trasmettono informazioni al centro operativo, geograficamente remoto, e ricevono dal centro operativo comandi o set-point; le RTU possono gestire logiche di funzionamento ma, nel caso più generale, sono collegate a PLC (*Programmable Logic Controller*) di gestione di processo.

I dispositivi PLC, come le RTU, sono elementi hardware componibili dalla robustezza estrema. I PLC nascono come computer specializzati nella gestione di processi industriali; eseguono programmi specifici per elaborare i segnali provenienti dagli organi di misurazione al fine di determinare i comandi da imporre agli attuatori.

Oggi i PLC, grazie alla compattezza, alla robustezza e alla versatilità di utilizzo, vengono inseriti in quasi tutte le apparecchiature di uso comune che necessitano di un controllo (elettrodomestici, automobili, ecc). La struttura del PLC infatti può essere

adattata in funzione del processo da automatizzare, delle grandezze elettriche da trattare; può essere adottato sia con segnali digitali che analogici, e può essere configurato per la comunicazione con quasi tutti i dispositivi in commercio.



Figura 4.12: Immagini di dispositivi PLC e RTU (HAWE Hydraulik)

Nei sistemi di RTC più recenti e moderni si tende ad accentrare le funzionalità degli RTU direttamente nei PLC, i quali hanno maggiori potenzialità e risorse disponibili, particolarmente in termini di capacità di implementare qualunque logica di controllo desiderata dall'utente.

Chiaramente nei PLC devono essere appositamente installati programmi che implementino le logiche di controllo desiderate. Il programma di controllo implementato effettua prima la scansione del segnale di input e successivamente dà il via alla fase di controllo vero e proprio del processo.

Le funzioni dei dispositivi PLC possono essere così riassunte:

- funzione di controllo locale continuo e discreto;
- segnalazione di allarme e comunicazione a livello di controllo globale;
- variazione dei set-point dei regolatori a distanza, dal livello globale;
- processamento locale dei dati;
- disponibilità di un segnale continuo.

4.3.4 Trasmissione delle informazioni

In una rete idrica, all'aumentare della complessità e della vastità del sistema di RTC da implementare, la scelta del sistema di trasmissione dei dati può avere un'incidenza fondamentale sull'affidabilità complessiva del sistema. In funzione delle distanze, delle tecniche e dei livelli di controllo può essere necessario prevedere la trasmissione di informazioni tra misuratori e PLC, tra PLC e regolatori, tra una stazione periferica e l'altra, e infine tra le stazioni periferiche e il centro operativo.

La trasmissione dei dati può avvenire attraverso differenti vettori: onde radio, onde elettriche, linee telefoniche, fibre ottiche. Le stazioni periferiche sono dunque dotate di modem, dispositivi che consentono la trasmissione dei dati con le modalità proprie del vettore di trasmissione, e di appositi apparati trasmettenti.

Anche il centro operativo deve chiaramente essere fornito di apposito apparato ricetrasmittente per i collegamenti con le stazioni periferiche, il modem, e di uno o più computer per il controllo del traffico di informazioni da e verso queste (front-end) nonché per il trattamento, l'elaborazione e l'archiviazione dei dati.

Viste le distanze elevate che si hanno nelle reti di acquedotto, oggi i vettori più usati sono le linee GSM, che rendono possibile l'invio di SMS (*Short Message Service*), ma ancor di più le linee tipo UMTS o GPRS che consentono l'accesso a internet da dispositivo mobile, dando così la possibilità di un maggiore e più continuo scambio di dati e informazioni.

Grande rilevanza, oltre alla tecnologia di trasmissione dei dati, risulta il protocollo di comunicazione per lo scambio dei dati; tali protocolli vengono ideati al fine di razionalizzare lo scambio dei dati.

Il più utilizzato è il protocollo di tipo *master-slave*, secondo cui il centro operativo interroga ciascuna stazione locale in base ad un predeterminato schema di interrogazione; nella sua implementazione più semplice, ciascuna stazione locale risponde fornendo il valore corrente di ciascuna variabile di processo monitorata e il centro operativo ritrasmette alle stazioni locali il valore di stato (ad esempio il set-point) per il comando dei regolatori.

Uno schema più complesso prevede un protocollo di tipo *report-by-exception*, secondo il quale ciascuna stazione locale risponde all'interrogazione del centro operativo fornendo soltanto le informazioni relative alle variabili di processo che, nell'intervallo di tempo trascorso, hanno avuto cambiamenti di stato; analogamente il centro operativo risponderà alle stazioni locali con riferimento alle stesse variabili che hanno subito cambiamenti di stato nell'ultimo intervallo di tempo. Tale protocollo riduce il numero di informazioni da trasferire nonché il numero di trasmissioni.

Per ridurre ulteriormente il numero di dati scambiati è possibile adoperare un protocollo di comunicazione di tipo *cry-out*, secondo cui è la stazione locale ad iniziare la trasmissione, in particolare quando viene superata una certa soglia del parametro che viene monitorato.

Quando non vi è la presenza del centro operativo, la comunicazione avviene solo tra stazioni locali; in tali casi si parla di comunicazione *peer to peer*, ovvero una rete di nodi paritari senza gerarchia, che si contrappone all'architettura *client-server*.

In passato venivano preferiti i protocolli di comunicazione proprietari implementati appositamente per il processo di interesse; oggi invece si tende ad utilizzare protocolli standard. Un esempio è il *modbus* che è un protocollo seriale di comunicazione pubblicato apertamente e royalty-free, dalla semplice e veloce implementazione; tali caratteristiche ne hanno fatto il protocollo di connessione oggi più diffuso tra i dispositivi elettronici industriali, nonostante sia stato ideato negli anni '70.

4.3.5 Il centro operativo e il sistema di controllo globale

In quasi tutti i sistemi di telecontrollo è presente un centro operativo le cui funzioni possono risultare più o meno complesse in funzione della struttura dello stesso sistema di telecontrollo adottato.

Il centro operativo di un sistema di telecontrollo è costituito da uno o più computer, o server, che generalmente possono rivestire diverse funzioni classificabili in due categorie:

- acquisizione, archiviazione, processamento e presentazione a livello globale dei dati provenienti dalle stazioni periferiche del sistema;
- coordinamento e controllo globale delle stazioni periferiche del sistema di RTC.

Nella prima categoria il centro operativo funge da “spettatore inerme” delle misurazioni e dei controlli operati nelle stazioni periferiche; viene implementato allo scopo di consentire, al personale dell’acquedotto, di visionare ed elaborare i dati disponibili nel sistema al fine di monitorarne le condizioni operative e i livelli di performance. Nella seconda categoria invece il centro operativo è parte integrante del sistema e fornisce alle stazioni periferiche comandi e informazioni necessarie per effettuare i controlli sulla rete.

Globalmente il sistema di telecontrollo può essere gestito mediante sistemi SCADA; per comprendere cos’è uno SCADA è possibile partire dallo stesso significato dell’acronimo ovvero *Supervisory Control And Data Acquisition* (acquisizione dati, supervisione e controllo), che sintetizza le tre funzioni fondamentali svolte da questo genere di sistema. In uno SCADA l’acquisizione dati è funzionale allo svolgimento delle funzioni di supervisione, intesa come osservazione dell’evoluzione del processo controllato, e di controllo, inteso come attuazione di azioni volte alla gestione degli stati nei quali il processo controllato si trova e delle transizioni tra gli stati nei quali il processo può venire a trovarsi (Bimbo & Colaiacovo, 2006). In realtà tale definizione caratterizza un insieme molto ampio di sistemi di controllo che differiscono tra loro per elementi quali la distribuzione geografica del sistema, la distribuzione (o la centralizzazione) dell’intelligenza del controllo, il grado di interazione tra operatore umano e sistema, i tempi di reazione a un evento prodotto dal processo controllato e molti altri fattori.

Ad esempio i sistemi DCS (*Distributed Control System*) si differenziano per il fatto di adoperare reti di comunicazione locale (Local Area Network) al contrario degli SCADA che adoperano reti di telecomunicazione geografica (Wide Area Network), nonché per il grado di distribuzione dell’intelligenza nel sistema; infatti mentre uno SCADA viene considerato come sistema con funzioni di controllo concentrate nel sottosistema di elaborazione e fisicamente e tecnologicamente distinte dalle funzioni di acquisizione, i sistemi DCS sono caratterizzati da strutture di acquisizione dotate di elevata capacità di elaborazione che hanno condotto alla realizzazione di funzioni di acquisizione e controllo fisicamente e tecnologicamente attigue (Bimbo & Colaiacovo, 2006). Pertanto nei sistemi DCS, le elaborazioni dei dati e le conseguenti decisioni vengono prese direttamente dalle stazioni periferiche, mentre nei sistemi SCADA maggiore rilevanza viene data al centro operativo. In realtà negli ultimi anni i sistemi vanno sempre più adattandosi alle specifiche esigenze del controllo che si intende effettuare, affievolendo così le differenze tra i due sistemi.

In ogni caso un sistema di controllo, SCADA o DCS, una volta installato necessita di un collaudo volto a verificare che il sistema si comporti come da progetto. Il sistemista, come di norma avviene, deve verificare in particolare che tutti gli elementi funzionino in maniera tale da garantire l’operatività del sistema di RTC nelle varie fasi di sviluppo. Normalmente occorre condurre quattro test formali:

- test dimostrativo funzionale, il quale deve attestare la funzionalità del sistema SCADA in ogni suo aspetto;
- test di input/output, il quale, a istallazione avvenuta, deve consentire di verificare la correttezza delle procedure di acquisizione e trasmissione dei dati da parte di ciascuna RTU e della centrale operativa;

- test dimostrativo di campo, in base al quale vanno verificati in situ le funzioni, le apparecchiature hardware, il software e le prestazioni del sistema SCADA.
- test prestazionali, per verificare il funzionamento delle apparecchiature hardware e software e le prestazioni del sistema SCADA nelle normali condizioni operative giornaliere.

In Figura 4.13 viene mostrato un esempio di sistema di controllo di una rete acquedottistica, mirato alla regolazione delle pressioni. Solitamente le reti acquedottistiche vengono suddivise in distretti e su ognuno di questi viene posizionato un gruppo di controllo elementare o stazione periferica.

Per un generico distretto, i sensori di pressione compiono un monitoraggio in continuo e le misure vengono inviate ad un PLC; il PLC elabora i dati ricevuti e qualora le condizioni misurate risultino differenti da quelle desiderate invia un segnale di correzione ad un secondo PLC che le impone alla valvola al fine di riportare il sistema entro le condizioni desiderate. La valvola di regolazione, oltre a ricevere il segnale di comando, invia al PLC un segnale di stato della sua condizione. I segnali di allarme e i dati di misura possono essere inviati al centro operativo, cosicché il personale di servizio possa visionare lo stato e le performance del sistema in modo da poter intervenire per eventuali situazioni di criticità o per ottimizzare maggiormente l'intero sistema.

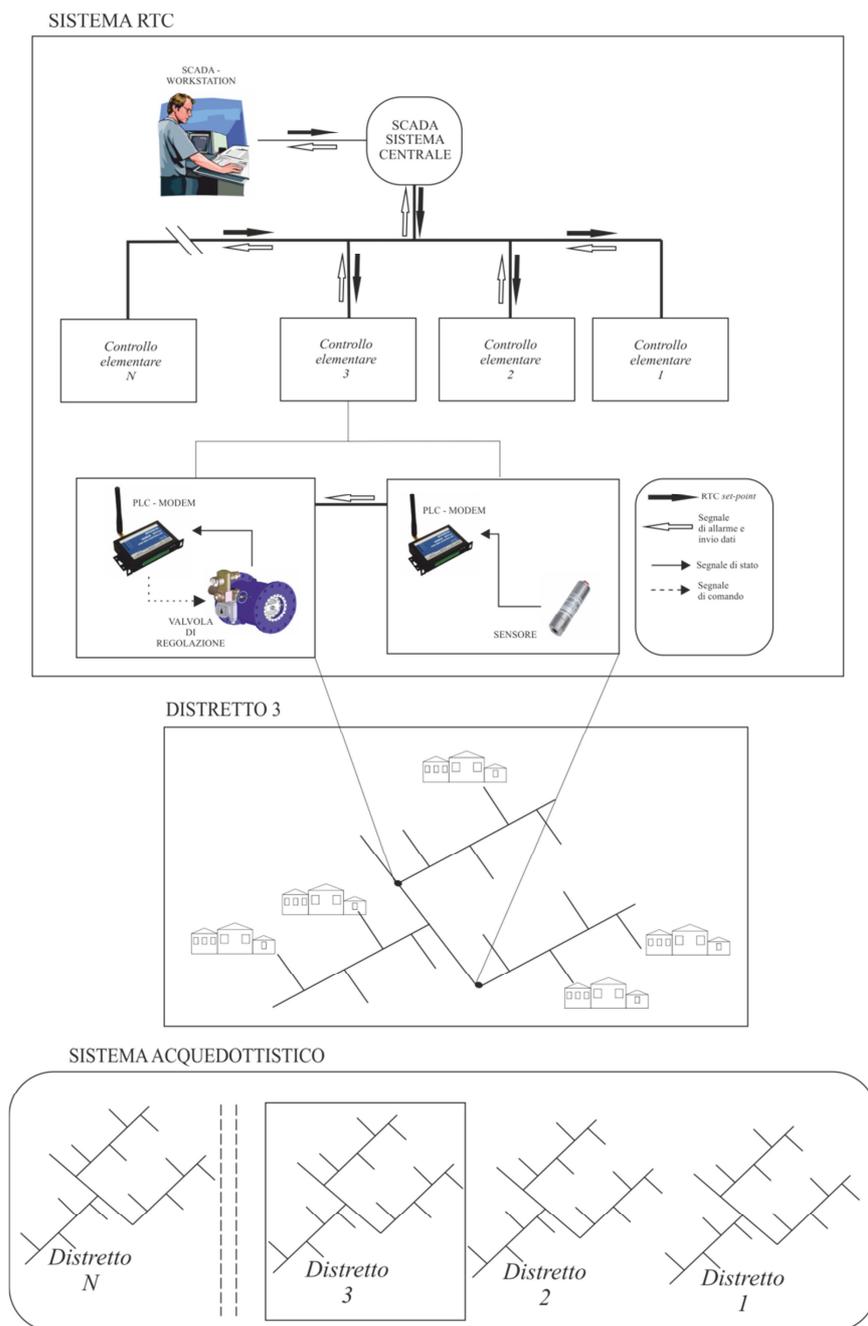


Figura 4.13: raffigurazione di un sistema di controllo applicato ad una rete di acquedotto

Capitolo 5

La calibrazione delle unità P: una strategia “numerica”

5.1 Le unità logiche di controllo PID

5.1.1 Generalità

I controller PID (Proportional-Integral-Derivative) sono unità logiche continue di controllo, molto utilizzate nei processi di regolazione dei sistemi industriali. Le ragioni del successo delle logiche PID vanno imputate ad un rapporto costi-benefici difficilmente ottenibile con altre tecniche di controllo ed in particolare alle sue principali caratteristiche:

- buona efficacia nel controllo di una vasta gamma di processi industriali;
- possibile realizzazione con differenti tecnologie (meccanica, idraulica, pneumatica, elettronica analogica, elettronica digitale);
- relativa semplicità di utilizzo (taratura di uno, due o al più tre parametri)

Le unità logiche PID sono sistemi di controllo a retroazione negativa, ovvero hanno la capacità di tenere conto dei risultati del sistema dinamico controllato al fine di modificare le caratteristiche del sistema stesso.

In particolare, come esplicitato in Figura 5.1, il controller PID acquisisce in ingresso un valore $y(t)$ da un processo e lo confronta con un valore di riferimento $y_{set-point}$; la differenza $e(t)$, il cosiddetto segnale di errore, viene quindi usata per determinare il valore della variabile di uscita dal controller $\Delta u(t)$, che è la variabile manipolabile del processo.

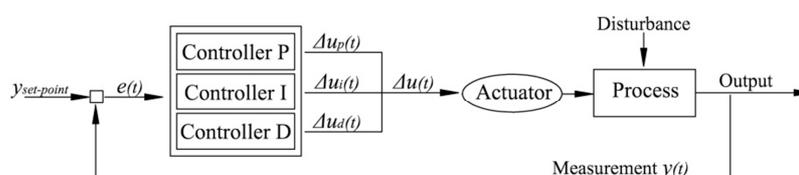


Figura 5.1: Schema di controllo con unità logiche PID

L'unità logica PID determina il valore in uscita in base a:

- il valore del segnale di errore (azione proporzionale);
- i valori passati del segnale di errore (azione integrale);
- la velocità di variazione del segnale di errore (azione derivativa).

Le tre azioni di un'unità PID vengono calcolate separatamente e sommate algebricamente:

$$\Delta u(t) = \Delta u_p(t) + \Delta u_i(t) + \Delta u_d(t) \quad 5.1$$

L'azione proporzionale è ottenuta moltiplicando il valore dell'errore per una costante di proporzionalità K_p :

$$\Delta u_p(t) = K_p \cdot e(t) \quad 5.2$$

La sola unità proporzionale risulta compatibile per la stabilizzazione di processi instabili; tuttavia è possibile che a regime permanga una deviazione costante dal set-point per valori esigui dell'errore.

Per far fronte a questa problematica è possibile utilizzare l'azione integrativa, da calcolare moltiplicando una costante di proporzionalità K_i per l'integrale nel tempo del segnale di errore $e(t)$:

$$\Delta u_i(t) = K_i \cdot \int_0^T e(t) dt \quad 5.3$$

Il ruolo dell'azione integrale si intuisce pensando che la sua tendenza (derivata) è proporzionale all'errore e quindi, finché questo non è nullo, esso non smette mai di variare: questo è il motivo per cui la presenza dell'integratore risulta spesso necessaria per annullare l'errore a regime.

L'azione derivativa viene calcolata come il prodotto di una costante di proporzionalità K_d per la derivata nel tempo dell'errore $e(t)$:

$$\Delta u_d(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad 5.4$$

L'azione derivativa risulta essere la componente in grado di tenere conto della tendenza attuale dell'errore. All'aumentare del valore del parametro K_d si conferisce all'algoritmo complessivo una maggiore prontezza; tuttavia se successivamente il segnale non varia linearmente per come ipotizzato, l'azione derivativa induce un'azione di controllo errata. In particolare risposte veloci dell'unità di controllo risultano svantaggiose nel caso di alte frequenze nel disturbo del processo perché, in tali situazioni, si ha la generazione di segnali di output fortemente variabili.

Gli svantaggi delle azioni singole proporzionale, integrale e derivativa possono essere ridotti unificando tali azioni in unità di controllo complete PID. Tali unità sono oggi standardizzate e possono essere applicate ad ogni tipo di sistema qualunque sia il loro tipo di reazione e il tipo di processo da controllare.

L'andamento delle tre componenti proporzionale, integrale e derivativa in funzione di quello tipico dell'errore è illustrato in Figura 5.2. Nella Tabella 5.I sono invece riportati i comportamenti dei tre contributi al variare dell'errore; si nota in particolare lo sfasamento caratteristico dell'integratore e l'azione di anticipo giocata invece dalla derivata.

Tabella 5.I: andamento delle tre componenti dell’unità PID in funzione di quello dell’errore (Veronesi, 2011)

Errore	Azione Proporzionale	Azione Integrale	Azione Derivativa
Costante	Costante	Aumenta linearmente	Nulla
Linearmente in aumento	Linearmente in aumento	Aumenta in modo parabolico (il suo tasso di crescita aumenta linearmente)	Costante positiva
Linearmente in diminuzione	Linearmente in diminuzione	Diminuisce in modo parabolico (il suo tasso di decremento diminuisce linearmente)	Costante negativa
Costantemente nullo	Costantemente nullo	Costante	Nulla

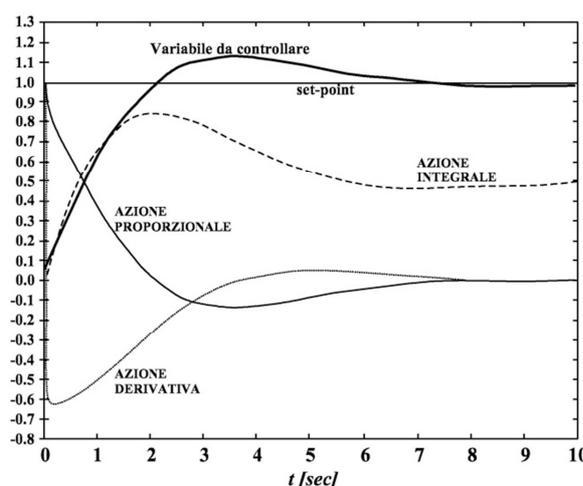


Figura 5.2: Azione proporzionale, integrativa, derivativa (Veronesi, 2011)

In definitiva il segnale di output $\Delta u(t)$ al tempo t fornito da un’unità di controllo PID all’attuatore è del tipo:

$$\Delta u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^T e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \tag{5.5}$$

dove i tre addendi al secondo membro rappresentano rispettivamente il contributo proporzionale, integrale e derivativo. Definendo inoltre le seguenti quantità:

- Tempo integrale: $T_i = \frac{K_p}{K_i}$
- Tempo differenziale: $T_d = \frac{K_p}{K_d}$

la relazione 5.5 si può scrivere nella forma:

$$\Delta u(t) = K_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^T e(t)dt + \frac{1}{T_d} \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \tag{5.6}$$

Per le applicazioni di RTC dei sistemi idraulici mediante unità PID è fondamentale determinare i valori dei parametri K_p , T_i e T_d al fine di ottenere regolazioni con le seguenti caratteristiche:

- brevi tempi di reazione;
- piccoli errori di regolazione;
- sufficiente smorzamento della reazione.

Sulla base delle esperienze già maturate sono state definite diverse regole pratiche per una calibrazione di massima di tali parametri in funzione del tipo di processo da controllare e del tipo di regolatori impiegati.

Una volta implementata l'unità di controllo, deve esserne verificato il comportamento nei confronti del sistema effettuando un'analisi sull'intero campo di variazione delle variabili di controllo per evitare, successivamente, fenomeni di instabilità che potrebbero causare il continuo movimento dei regolatori.

Durante le normali operazioni di controllo invece, i parametri precedentemente determinati possono essere meglio calibrati per ottimizzare le prestazioni dell'unità.

5.1.2 Regole di Ziegler-Nichols

Il metodo di Ziegler-Nichols, che risale al 1942, è il criterio di tarature dei parametri delle unità logiche PID sicuramente più utilizzato e apprezzato grazie alle spiccate doti di semplicità di applicazione, di prestazioni fornite nonché al fatto che non risulta necessaria l'applicazione di modelli matematici del processo.

Il metodo prevede, nella sua forma più semplificata, il calcolo dei parametri K_p , T_i e T_d mediante l'applicazione delle regole riportate in Tabella 5.II; a tal fine risulta necessario la determinazione delle quantità:

- K_u : guadagno limite
- T_u : periodo limite

Tabella 5.II: regole di Ziegler-Nichols per la taratura delle unità logiche PID

<i>Controller</i>	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$	-	-
PI	$0.4 K_u$	$0.8 T_u$	-
PID	$0.6 K_u$	$0.5 T_u$	$0.125 T_u$

La determinazione del guadagno e del periodo limite può essere effettuata secondo i seguenti step:

- il processo viene fatto controllare da un controller esclusivamente proporzionale;
- il "guadagno" K del controller proporzionale viene gradualmente aumentato;
- il "guadagno limite" K_u è il valore del guadagno per cui la variabile controllata presenta oscillazioni permanenti, cioè che non spariscono dopo un transitorio: questa è una misura dell'effetto dei ritardi e della dinamica del processo;
- si registra il periodo limite T_u delle oscillazioni permanenti ottenute con il guadagno limite K_u .

Chiaramente il metodo di Ziegler-Nichols implica l'utilizzo di una strategia try&error che può risultare di complessa implementazione direttamente nelle reti acquedottistiche senza una preliminare modellazione idraulica.

5.2 Strategia numerica di calibrazione dell'unità P

Le unità logiche di controllo PID possono essere utilizzate per il controllo in tempo reale delle valvole di riduzione di pressione nelle reti di acquedotto; tale soluzione, tecnologicamente avanzata, consente di regolare, in maniera automatica e continua, i carichi piezometrici rilevati in nodi strategici di controllo della rete, sulla base di sole misure di pressione.

Il processo che si intende controllare è costituito dal comportamento della rete acquedottistica, assimilabile ragionevolmente a una successione di stati di moto permanente, con perturbazioni nel tempo costituite dalle variazioni delle portate erogate ai nodi.

Il ruolo del RTC è chiaramente quello di compensare tali variazioni azionando la valvola in modo da mantenere ai nodi di controllo il carico piezometrico desiderato.

Vista la fenomenologia del processo risulta sufficiente utilizzare la sola unità logica proporzionale; il processo risulta infatti caratterizzato da una lenta variazione delle condizioni del sistema, il che esclude la necessità di utilizzare l'unità derivativa, che peraltro implicherebbe il possibile insorgere di instabilità nel controllo, come messo in luce al precedente paragrafo. Inoltre le grandezze adoperate a base del controllo e le fenomenologie esaminate non necessitano l'impiego dell'unità integrativa visto che possono considerarsi accettabili piccoli scostamenti dal set-point in condizione di regime.

L'efficienza della regolazione risulta chiaramente determinata dal valore imposto per il parametro proporzionale K_p , in funzione della risposta della rete acquedottistica all'azione della valvola; tale risposta dipende chiaramente, oltre che dalle perturbazioni esterne, ovvero dalle variazioni delle condizioni di erogazione delle portate ai nodi, anche dalle caratteristiche geometriche e idrauliche della rete e degli impianti.

Di conseguenza la calibrazione del parametro K_p andrebbe fatta caso per caso, così come proposto da Ziegler-Nichols; tale calibrazione inoltre dovrebbe essere effettuata per ogni condizione di erogazione del sistema, in particolare nelle reti in cui si osservano forti variazioni orarie o stagionali delle portate.

Nel presente paragrafo vengono presentati i risultati di un'indagine numerica volta alla calibrazione dell'unità logica proporzionale per il controllo in tempo reale (RTC) di valvole di riduzione di pressione in condizioni semplificate e standardizzate; il fine è quello di comprendere quali siano le grandezze geometriche e idrauliche dei sistemi idrici che hanno effettivamente una rilevanza nella calibrazione del parametro, nonché quello di proporre regole semplici che consentano la calibrazione sulla base di misure da effettuare direttamente in campo e tali da non necessitare un approccio “try&error”.

Nel seguito la metodologia di calibrazione proposta nel presente capitolo verrà chiamata “numerica” proprio perché basata su un'indagine numerica, nonché per distinguerla da quella proposta nel capitolo successivo basata invece su considerazioni di carattere analitico.

Le considerazioni proposte nel presente capitolo sono anche state oggetto di pubblicazione sul Journal of water resources planning and management (Campisano et al., 2011).

5.2.1 L'unità logica proporzionale P

In un sistema di RTC di valvole di regolazione, l'unità logica proporzionale P invia al tempo t un segnale di correzione della posizione a dell'otturatore della valvola pari a:

$$\Delta a(t) = K_p \cdot e(t) \quad 5.7$$

in relazione a un errore di regolazione $e(t)$, dovuto alla differenza fra il valore corrente del carico piezometrico al nodo di controllo e il valore del carico piezometrico desiderato (*set-point*) nello stesso nodo, e al valore del parametro proporzionale K_p dell'unità logica P. La regolazione della valvola, tramite successivi movimenti dell'otturatore determinati dall'unità P, mira a provocare perdite di carico concentrate tali da condurre gradualmente il carico piezometrico nel nodo di controllo al prescelto valore di *set-point*.

L'equazione 5.7 rileva come la reazione dell'unità logica, e dunque l'efficienza del controllo, dipenda strettamente dal valore adottato per il parametro K_p .

Valori eccessivamente modesti del parametro K_p comportano reazioni troppo lente nella regolazione, con evidenti sovraelongazioni nel raggiungimento del *set-point*; al contrario valori troppo elevati del parametro K_p provocano un'eccessiva reattività del controllo che risulta caratterizzato da indesiderate oscillazioni permanenti dopo la convergenza al *set-point*.

Al fine di ottenere regolazioni "efficaci" è necessaria un'accurata calibrazione; in particolare il corretto settaggio del parametro K_p deve garantire una sufficiente velocità del controllo senza che ciò comporti l'insorgere di oscillazioni permanenti del carico piezometrico nell'intorno del *set-point*.

In Figura 5.3 viene mostrato come, a parità di processo controllato, la regolazione risulti più o meno efficace al variare del valore imposto per il parametro proporzionale.

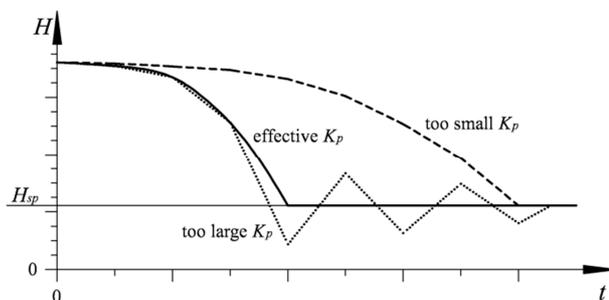


Figura 5.3: tipi di regolazioni ottenute tramite l'unità logica P al variare del parametro K_p

5.2.2 Le equazioni

Il comportamento idraulico di una rete acquedottistica viene normalmente modellato come una successione di stati di moto permanente. Infatti le portate domandate variano

lentamente durante il giorno e i movimenti dell’otturatore della valvola vengono effettuati con una velocità sufficientemente lenta tale da non innescare fenomeni di moto vario inapprezzabili.

Per il generico istante di moto permanente t l’equazione 5.7 può essere meglio espressa nella forma:

$$a_{t+1} - a_t = -K_p \cdot (H_t - H_{sp}) \quad 5.8$$

essendo a_{t+1} [m] e a_t [m] la posizione dell’otturatore della valvola ($a=0$ e $a=a_{tot}$ corrispondono rispettivamente alla valvola del tutto chiusa e del tutto aperta) agli istanti di controllo $t+1$ e t , ed essendo H_t [m] e H_{sp} [m] rispettivamente i carichi piezometrici corrente e desiderato al nodo di controllo.

Fissato il valore del parametro K_p , la relazione 5.8 consente di determinare la posizione a_{t+1} dell’otturatore all’istante successivo quello di misura.

Comunque, la valutazione di a_{t+1} dipende anche dalla velocità V_{ott} [m/s] dell’attuatore della valvola; infatti, durante l’intervallo Δt [s] che intercorre tra un controllo e il successivo, il movimento dell’otturatore deve essere non superiore alla quantità $\Delta a_{max} = V_{ott} \cdot \Delta t$, ovvero:

$$|a_{t+1} - a_t| \leq \Delta a_{max} \quad 5.9$$

Inoltre, il carico piezometrico al nodo di controllo H_t può essere espresso mediante la relazione:

$$H_t = H_t|_{a=a_{tot}} - HL_t \quad 5.10$$

essendo $H_t|_{a=a_{tot}}$ il carico piezometrico corrispondente alla condizione di valvola del tutto aperta e HL_t la perdita di carico concentrata provocata dalla valvola con posizione a_t .

Definendo dunque le seguenti variabili adimensionali:

$$\bar{a}_{t+1} = \frac{a_{t+1}}{a_{tot}}; \quad \bar{a}_t = \frac{a_t}{a_{tot}}; \quad \bar{H}_t = \frac{H_t}{H_{sp}}; \quad \bar{HL}_t = \frac{HL_t}{H_{sp}}; \quad 5.11$$

$$\bar{K}_p = K_p \frac{H_{sp}}{a_{tot}}; \quad \Delta \bar{a}_{max} = \frac{\Delta a_{max}}{a_{tot}}; \quad 5.12$$

e tenendo conto delle relazioni 5.9 e 5.10, la relazione 5.8 può essere riscritta nella forma:

$$\bar{a}_{t+1} - \bar{a}_t = \min \left\{ \frac{|-\bar{K}_p \cdot (\bar{H}_t|_{\bar{a}=1} - \bar{HL}_t)|}{\Delta \bar{a}_{max}} \right\} \cdot sign \quad 5.13$$

essendo $sign$ il segno della quantità all’interno del valore assoluto.

Nell’equazione 5.13 la quantità $\bar{H}_t|_{\bar{a}=1}$ rappresenta l’eccesso di carico piezometrico adimensionale al nodo di controllo che si intende correggere tramite l’azione della valvola.

Il termine \bar{HL}_t rappresenta invece l’effetto della valvola e dipende strettamente dalla relazione caratteristica tra il grado di apertura e il coefficiente di perdita di carico $\xi = \xi(\bar{a})$, nonché dall’effetto di redistribuzione delle portate nei rami della rete in seguito all’azione sulla valvola.

Per le valvole di riduzione del carico comunemente reperibili in commercio, ed in particolare per quelle di tipo “a fuso”, le relazioni $\xi = \xi(\bar{a})$, che normalmente vengono ricavate sperimentalmente per punti e fornite dalle case produttrici in forma grafica, possono essere molto ben espresse tramite relazioni di tipo logaritmico del tipo:

$$\log_{10} \xi(\bar{a}) = -\bar{C} \cdot \log_{10} \bar{a} + \bar{D} \quad 5.14$$

dove \bar{C} e \bar{D} sono i parametri caratteristici della valvola adottata.

Quando utilizzata con un apposito modello di simulazione, la relazione 5.13 consente di effettuare analisi adimensionali del comportamento delle reti di acquedotto controllate in tempo reale per mezzo di un’unità logica P, provvedendo al calcolo del grado di chiusura della valvola all’istante temporale successivo a quello di controllo.

5.2.3 La calibrazione per il sistema idrico elementare (SHS)

Al fine di semplificare e standardizzare il problema in esame, è stato preso in considerazione un sistema idrico elementare (Figura 5.4) composto da una condotta di avvicinamento con un serbatoio di monte (nodo S) che assicura il carico idrostatico H_s [m] al nodo erogante di valle (nodo N), sul quale viene effettuato il controllo. È stata imposta la presenza di una valvola di controllo (punto V) che agisce automaticamente e in tempo reale a mezzo di un’unità logica proporzionale P al fine di mantenere il carico piezometrico H [m], rilevato al nodo di valle, al valore di set-point H_{sp} .

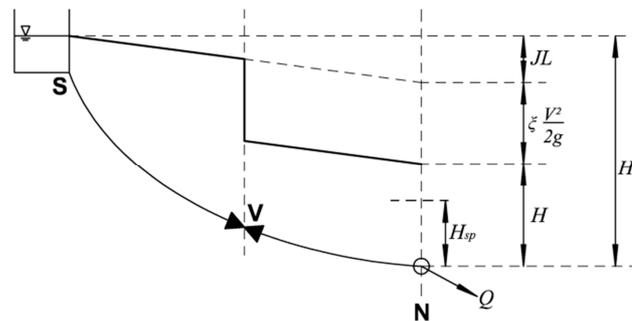


Figura 5.4: schema del sistema idrico elementare

La portata Q [m^3/s] domandata al nodo di valle è stata imposta costante nel tempo. Nella modellazione è stato adoperato un approccio di tipo demand-driven, per cui la portata Q risulta sempre uguale alla portata transitante nella condotta di avvicinamento e indipendente dall’apertura della valvola.

Il sopradescritto sistema elementare è inizialmente perturbato da una deviazione positiva dell’errore $H - H_{sp}$. In particolare sono stati considerati valori dell’errore relativamente contenuti al fine di analizzare il comportamento del sistema in condizioni prossime al set-point, ovvero nelle condizioni tipiche in cui viene effettuata la regolazione.

Per il sistema idrico elementare, preso in esame, la relazione 5.13 può essere riscritta nella forma:

$$\bar{a}_{t+1} - \bar{a}_t = \min \left\{ \left| -\bar{K}_p \cdot \left[\bar{A} - \bar{B} \cdot \xi(\bar{a}_t) \right] \right| \right\} \cdot \text{sign} \quad 5.15$$

essendo:

$$\bar{A} = \frac{H_s - JL}{H_{sp}} - 1; \quad \bar{B} = \frac{1}{H_{sp}} \frac{V^2}{2g}; \quad 5.16$$

dove L [m] è la lunghezza della condotta di avvicinamento, J [-] è la cadente piezometrica e V [m/s] è la velocità media della portata in condotta.

Se il controllo potesse essere fatto in continuo (intervalli temporali di controllo infinitesimi) la regolazione ottimale verrebbe ottenuta facendo muovere l'otturatore della valvola, con la sua velocità V_{out} , dal grado di apertura iniziale sino al grado di apertura di set-point, per poi mantenere quest'ultimo indefinitamente.

Tale soluzione tuttavia non risulta percorribile in quanto i sistemi di RTC effettuano un controllo discreto (intervalli temporali di controllo finiti); risulta dunque necessario adoperare un approccio basato su simulazioni finalizzate alla valutazione dell'efficienza delle strategie di RTC.

Per la ricerca del valore ottimale \bar{K}_p^* del parametro proporzionale adimensionale si è proceduto utilizzando simulazioni numeriche in accordo con le equazioni 5.15 e 5.16. Per la scelta di tale valore, come funzione obiettivo da minimizzare, si è fatto riferimento alla media assoluta della deviazione del carico piezometrico adimensionalizzato:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^n |\bar{H}_t - 1| \quad 5.17$$

In Figura 5.5 viene mostrato l'andamento tipico della quantità δ al variare del valore del parametro \bar{K}_p .

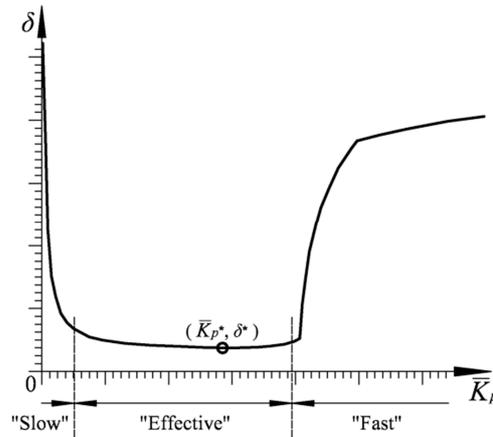


Figura 5.5: andamento tipico della quantità δ al variare di \bar{K}_p

La curva di Figura 5.5 ha un andamento caratteristico del fenomeno in esame; in essa infatti si può distinguere una prima parte fortemente discendente, che denota valori del parametro eccessivamente modesti che restituiscono regolazioni troppo lente, una

seconda parte dall'andamento appiattito ove si trova il minimo della curva e che caratterizza i valori del parametro che restituiscono regolazioni soddisfacenti, e infine una terza parte fortemente ascendente che denota valori del parametro elevati che restituiscono regolazioni eccessivamente veloci.

I risultati delle simulazioni possono essere interpolati per mezzo di una legge di regressione non lineare che leghi il valore ottimale del parametro \bar{K}_p^* con la corrispondente configurazione di grandezze adimensionali \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , \bar{D} e $\Delta\bar{\alpha}_{max}$ nella forma:

$$\bar{K}_p^* = c_1 \cdot \bar{A}^{c_2} \cdot \bar{B}^{c_3} \cdot \bar{C}^{c_4} \cdot \bar{D}^{c_5} \cdot \Delta\bar{\alpha}_{max}^{c_6} \quad 5.18$$

essendo c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 e c_6 i parametri della legge di regressione.

5.2.4 Applicabilità alle reti di acquedotto (WDN)

La metodologia di calibrazione “numerica” è stata messa a punto in maniera specifica per il sistema idrico elementare (SHS), meglio descritto nel precedente paragrafo; in linea teorica dunque i risultati ottenuti non potrebbero essere applicati alle reti di acquedotto (WDN) senza l'imposizione di ulteriori condizioni che consentano di determinare i corretti valori dei parametri adimensionali \bar{A} e \bar{B} , caratteristici della rete in esame, tali da garantire una corretta applicazione della relazione di regressione 5.18.

A questo scopo, di seguito, viene proposta una procedura per identificare il sistema idrico elementare (SHS) con comportamento “equivalente” a quello della rete di acquedotto (WDN) presa in esame.

La procedura è basata sull'analisi della *curva di risposta* $\bar{H} = \bar{H}(\bar{\alpha})$ della rete acquedottistica (WDN), per una data configurazione delle portate ai nodi; tale curva rappresenta la risposta del sistema, in termini di carico piezometrico adimensionale al nodo di controllo, al variare dell'apertura della valvola.

L'identificazione di un sistema elementare (SHS) con curva di risposta esattamente coincidente a quella di una rete acquedottistica risulta impossibile a causa degli effetti di redistribuzione delle portate che si osservano nelle reti a maglie in seguito alle azioni sulle valvole; tali effetti sono chiaramente assenti nel sistema idrico elementare.

Tuttavia, visto che la fase della regolazione maggiormente significativa, ovvero la più delicata, è quella che viene effettuata nell'intorno del set-point, le condizioni di equivalenza sono state imposte proprio nell'intorno di tale condizione.

Sia dunque $\bar{\alpha}_{sp}$ il *grado di apertura di set-point* della valvola, tale da ottenere nel sistema, per la data configurazione delle portate in esame, il valore di carico piezometrico desiderato H_{sp} al nodo di controllo; al fine di individuare il sistema elementare (SHS) con comportamento equivalente a quello della rete di acquedotto (WDN) nell'intorno del set-point, è stato imposto che la curva $\bar{H} = \bar{H}(\bar{\alpha})$ del sistema elementare avesse la medesima condizione di set-point:

$$[\bar{\alpha}_{sp}]_{SHS} = [\bar{\alpha}_{sp}]_{WDN} \quad 5.19$$

e in tale condizione il medesimo comportamento ovvero la medesima derivata:

$$\left[\frac{d\bar{H}}{d\bar{\alpha}} \Big|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}} \right]_{SHS} = \left[\frac{d\bar{H}}{d\bar{\alpha}} \Big|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}} \right]_{WDN} \quad 5.20$$

In Figura 5.6 viene mostrato un esempio delle curve $\bar{H} = \bar{H}(\bar{\alpha})$ per due sistemi equivalenti; in particolare è stata evidenziata la condizione di set-point ($\bar{H} = 1$ e $\bar{\alpha}_{sp}$).

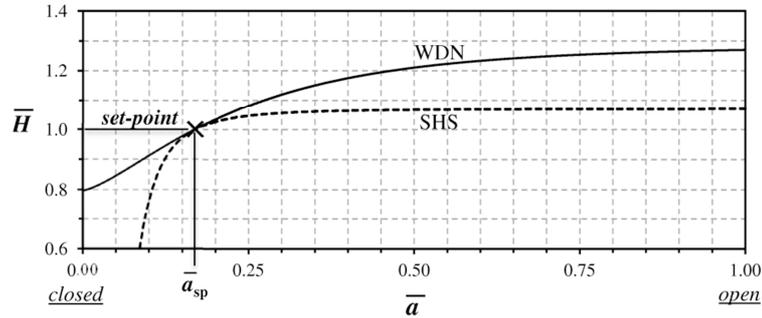


Figura 5.6: esempio di curve $\bar{H} = \bar{H}(\bar{\alpha})$ di un WDN e dell'equivalente SHS

Per il sistema idrico elementare valgono le relazioni:

$$[\bar{H}(\bar{\alpha})]_{SHS} = \bar{A} - \bar{B} \cdot \xi(\bar{\alpha}) + 1 \quad 5.21$$

$$[d\bar{H}/d\bar{\alpha}]_{SHS} = -\bar{B} \cdot d\xi/d\bar{\alpha} \quad 5.22$$

Imponendo nelle relazioni 5.21 e 5.22 la condizione di set-point:

$$\begin{cases} \bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{sp} \\ \bar{H}(\bar{\alpha}_{sp}) = 1 \end{cases} \quad 5.23$$

e sostituendo le relazioni 5.19 e 5.20, è possibile ricavare:

$$\bar{A} = \bar{B} \cdot \xi[\bar{\alpha}_{sp}]_{WDN} \quad 5.24$$

$$\bar{B} = - \left[\frac{d\bar{H}/d\bar{\alpha}}{d\xi/d\bar{\alpha}} \right]_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}}_{WDN} = - \frac{1}{H_{sp}} \left[\frac{dH/d\bar{\alpha}}{d\xi/d\bar{\alpha}} \right]_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}}_{WDN} \quad 5.25$$

Data dunque una rete di acquedotto (WDN) in una determinata condizione di erogazione delle portate ai nodi, le relazioni 5.24 e 5.25 consentono di determinare le grandezze adimensionali \bar{A} e \bar{B} del sistema idrico elementare “equivalente”, essendo note le quantità $\bar{\alpha}_{sp}$ e $d\bar{H}/d\bar{\alpha}|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}}$; tali quantità possono essere valutate nel sistema in esame tramite simulazioni numeriche o misure di campo.

Le fluttuazioni temporali delle portate domandate ai nodi della rete implicherebbero l'utilizzo di un valore di \bar{K}_p^* differente per ciascuna configurazione di erogazione delle portate. Infatti, all'aumentare delle portate domandate, i carichi piezometrici in rete tendono a diminuire e la valvola tende ad operare per gradi di apertura più elevati. In tali condizioni la curva di perdita di carico della valvola necessita di valori di \bar{K}_p^* superiori al fine di aumentare l'efficienza del controllo.

D'altra parte, i valori di \bar{K}_p^* calcolati in base alle condizioni medie di erogazione della rete, possono risultare eccessivamente elevati nelle condizioni di erogazione di portate inferiori, determinando così oscillazioni permanenti nella regolazione.

Nel paragrafo 5.3.3 verranno sfruttati i risultati della calibrazione “numerica” per mostrare come, volendo adoperare un unico valore del parametro proporzionale per tutte le fasi della regolazione senza che ciò comporti il rischio di ricadere nel campo delle oscillazioni permanenti, risulti conveniente adoperare il valore \bar{K}_p^* relativo alla configurazione di gruppi adimensionali corrispondente alla condizione della rete di erogazione minima nelle 24 ore.

In ogni caso, nelle pratiche applicazioni, conviene, in via cautelativa, adottare valori del parametro proporzionale leggermente più modesti di quelli \bar{K}_p^* ottenuti con la sopraesposta metodologia.

5.2.5 Il parametro proporzionale per più valvole in rete

Nel caso in cui in rete vi siano più valvole di regolazione di pressione la calibrazione del parametro proporzionale deve essere effettuata per ciascuna valvola presa singolarmente, nell’ipotesi chiaramente che il sistema di controllo regoli le valvole ciascuna con logica regionale e senza un’unità master di coordinamento.

E’ però necessario tenere conto che l’effetto di ogni valvola sulla rete interagisce con la regolazione delle altre valvole, influenzandone così il comportamento; tale aspetto deve essere preso in considerazione nella fase di calibrazione del parametro proporzionale.

Come già chiarito nei paragrafi precedenti, la calibrazione del parametro proporzionale deve essere operata nella fase più delicata della regolazione, ovvero nell’intorno del set-point; tuttavia in una rete con più valvole di regolazione è possibile che la condizione di set-point ai rispettivi nodi di controllo possa essere ottenuta con più configurazioni di regolazione delle varie valvole.

Il problema in tal modo risulta di difficile risoluzione, a meno che non venga imposta una importante ipotesi di base ovvero l’imposizione del principio di *gerarchia delle valvole*.

Tale principio è insito nella maggior parte delle procedure di posizionamento delle valvole di regolazione; tali procedure infatti prevedono il posizionamento delle valvole ad una ad una secondo una progressiva minimizzazione della funzione obiettivo, spesso rappresentata dalla sommatoria delle perdite idriche in rete.

Di conseguenza è possibile affermare che la prima valvola posizionata risulterà essere la più influente sulla rete, ovvero quella che riduce maggiormente le pressioni e dunque le perdite idriche, la seconda un po’ meno influente e così via per le altre valvole.

Seguendo questo approccio è possibile delineare una procedura di calibrazione dei parametri proporzionali di più valvole di regolazione posizionate in rete.

In una prima fase è necessario individuare la “*prima configurazione di set-point*” posizionando ad una ad una le valvole, secondo la gerarchia di influenza, tracciandone la curva di risposta e individuandone la relativa condizione di set-point; la calibrazione delle valvole successive, ovvero quelle meno influenti, dovrà essere operata imponendo la condizione di set-point per le valvole precedenti.

Finita tale fase risultano disponibili tutte le grandezze necessarie e si può procedere con il calcolo del valore del parametro proporzionale K_p^* per ciascuna valvola, così come visto nei paragrafi precedenti.

5.3 I risultati della calibrazione

5.3.1 Quadro delle simulazioni

La calibrazione del parametro proporzionale \bar{K}_p è stata effettuata per varie configurazioni del sistema idrico elementare al fine di determinare i coefficienti dell'equazione di regressione 5.18.

Risultati preliminari hanno rivelato la scarsa dipendenza di \bar{K}_p^* dalla quantità adimensionale $\Delta\bar{\alpha}_{max}$, come viene mostrato anche in Campisano et al., 2010b. Tali simulazioni hanno inoltre messo in evidenza come la condizione iniziale del grado di apertura della valvola, e dunque del corrispondente errore iniziale in termini di carico piezometrico rispetto al set-point, avesse scarsa rilevanza sull'individuazione del valore \bar{K}_p^* del parametro proporzionale.

Di conseguenza la grandezza adimensionale $\Delta\bar{\alpha}_{max}$ è stata esclusa dall'equazione di regressione 5.18 e come condizione iniziale è stato imposto, per tutte le simulazioni, che la deviazione del carico piezometrico H rispetto a quello di set-point H_{sp} fosse pari a +5% di quest'ultimo, ovvero il grado di apertura iniziale della valvola è stato determinato tramite:

$$\bar{A} - \bar{B} \cdot \xi[\bar{\alpha}(t = 0)] = 0.05 \quad 5.26$$

Nella scelta delle configurazioni dei parametri adimensionali \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} e \bar{D} sono stati assunti i ranges di valori utili per le pratiche applicazioni riportati in Tabella 5.III.

Tabella 5.III: Ranges di valori adottati nelle simulazioni per le grandezze adimensionali \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , \bar{D}

	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	\bar{D}
<i>min</i>	0.05	0.000001	2.0	0.5
<i>max</i>	3.00	0.050000	2.9	2.5

I valori adottati per le simulazioni sono stati generati casualmente entro i ranges imposti e sono stati combinati in modo da ottenere 10'000 configurazioni da simulare. Per assicurare l'omogeneità della condizione iniziale per tutte le simulazioni sono stati esclusi i casi per cui:

$$\bar{A} - \bar{B} \cdot \xi[\bar{\alpha} = 1] \leq 0.05 \quad 5.27$$

Inoltre, visto che per le valvole di regolazione viene normalmente imposto di operare con gradi di apertura $\bar{\alpha} > 0.1$, al fine di evitare regolazioni potenzialmente dannose o controlli imprecisi (Tullis, 2003), sono stati esclusi anche i casi per cui:

$$\bar{A} - \bar{B} \cdot \xi[\bar{\alpha} = 0.1] > 0 \quad 5.28$$

ovvero tali per cui il set-point del sistema viene ottenuto per $\bar{\alpha} \leq 0.1$.

In definitiva sono state simulate 6'124 configurazioni.

5.3.2 L'equazione di regressione

Per ciascuna configurazione delle grandezze adimensionali è stato applicato il sopradescritto metodo “numerica” di calibrazione ed è stato determinato il valore \bar{K}_p^* per il parametro proporzionale.

I valori di \bar{K}_p^* ottenuti sono risultati compresi tra 0.0075 e 4.2.

L'analisi di regressione ha consentito di specificare i parametri della relazione 5.18 e di ottenere dunque:

$$\bar{K}_p^* = 1.57 \cdot \bar{A}^{-1.492} \cdot \bar{B}^{0.358} \cdot \bar{C}^{-0.555} \cdot \bar{D}^{0.910} \quad 5.29$$

Il valore elevato del coefficiente di determinazione R^2 (uguale a 0.98) e il confronto grafico mostrato in Figura 5.7 confermano l'ottimo adattamento della legge di regressione ottenuta dai risultati delle simulazioni numeriche.

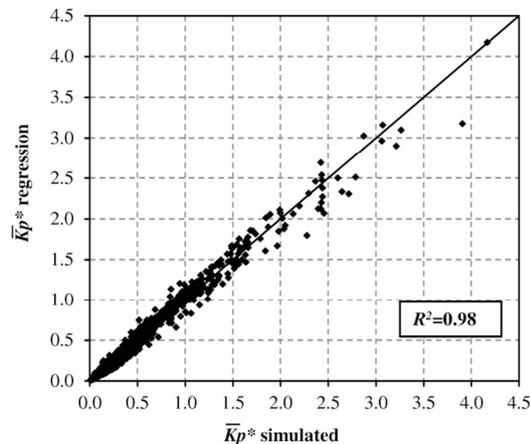


Figura 5.7: Confronto tra i valori di \bar{K}_p^* ottenuti tramite le simulazioni e quelli corrispondenti calcolabili tramite la relazione 5.29

La relazione 5.29 consente di effettuare alcune considerazioni in merito alla fenomenologia che influisce sulla fase di calibrazione e dunque sulla dipendenza del parametro proporzionale \bar{K}_p^* dai gruppi adimensionali \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} e \bar{D} .

Per comprendere a fondo tale dipendenza è necessario ribadire che la fase della regolazione più delicata è quella che viene effettuata nell'intorno del set-point; la dipendenza del parametro \bar{K}_p^* dagli altri gruppi adimensionali può infatti essere spiegata osservando il comportamento della valvola in corrispondenza del grado di apertura di set-point $\bar{\alpha}_{sp}$ caratteristico del sistema idrico elementare in esame.

A tale scopo in Figura 5.8 si propone un grafico esplicativo dell'influenza dei vari gruppi adimensionali sul grado di apertura di set-point del sistema. In particolare vengono riportate tre possibili curve del coefficiente di perdita di carico della valvola (le due estreme previste nel range e una media) e a partire dall' $\bar{\alpha}_{sp}$ corrispondente ad una data configurazione di gruppi adimensionale (indicata con il punto nero) viene mostrato

come si sposta il punto di set-point, sulle curve di regolazione, all’aumentare dei gruppi adimensionali \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} e \bar{D} , ciascuno preso singolarmente.

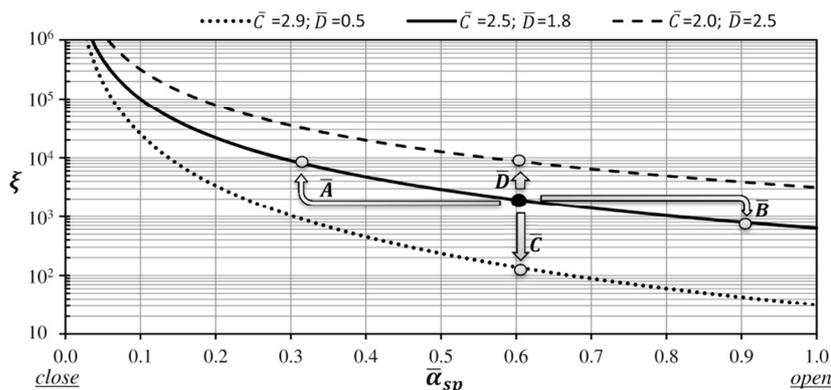


Figura 5.8: Grafico esplicativo della variazione del punto di set-point del sistema idrico elementare in funzione dell’aumento di ciascun gruppo adimensionale

La principale dipendenza del valore ottimale del parametro proporzionale \bar{K}_p^* risulta legata alla quantità adimensionale \bar{A} , la quale rappresenta la quantità di carico piezometrico da dissipare per l’ottenimento della condizione di set-point. Tale dipendenza, inversa, indica come all’aumentare del carico da dissipare, a parità dei valori delle altre grandezze adimensionali, il punto di set-point si sposta su una parte della curva della valvola maggiormente ripida; questo comporta che è necessario utilizzare valori di \bar{K}_p^* più modesti al fine di smorzare l’aumentata reattività della valvola.

Minore è risultata la dipendenza dal gruppo adimensionale \bar{B} , ovvero dal termine rappresentativo del carico cinetico; in particolare si osserva come la dipendenza del valore \bar{K}_p^* dal gruppo adimensionale \bar{B} risulti diretta. Tale dipendenza può essere spiegata considerando che carichi cinetici maggiori comportano perdite di carico maggiori e, di conseguenza gradi di apertura di set-point della valvola superiori; in tal modo la regolazione viene effettuata su una parte della curva della valvola meno pendente, ovvero meno reattiva. In tali condizioni può dunque essere sollecitato maggiormente utilizzando valori di \bar{K}_p^* superiori, senza che ciò comporti oscillazioni permanenti della regolazione.

Anche i parametri della curva di regolazione della valvola \bar{C} e \bar{D} hanno una certa influenza sulla fase di calibrazione del \bar{K}_p^* in funzione ancora una volta del corrispondente posizionamento del punto di set-point sulla curva della valvola.

E’ importante mettere in evidenza come, viste le modalità con cui è stata ottenuta la relazione 5.29, le sopra riportate considerazioni risultano strettamente vere esclusivamente per il sistema idrico elementare; tuttavia si può ritenere che nelle reti di acquedotto per cui gli effetti della redistribuzione delle portate, nei rami paralleli a quello di inserimento della valvola, non risultino eccessivamente rilevanti, le considerazioni derivabili dalla relazione 5.29 possono ancora considerarsi attendibili.

Dalle considerazioni sopra effettuate è possibile intuire una semplice quanto importante considerazione di carattere generale: il parametro dell'unità logica proporzionale deve essere calibrato in funzione del comportamento del sistema idrico da regolare in corrispondenza della condizione di set-point. Maggiore risulta la reattività del sistema all'azione sulla valvola, minore dovrà essere il valore da utilizzare come \bar{K}_p^* e viceversa. Quest'ultima considerazione è stata alla base della metodologia di calibrazione che viene proposta nel capitolo 7.

5.3.3 Estensione ai casi di portata variabile

Il metodo di calibrazione proposto nel presente capitolo è stato sviluppato facendo riferimento ad un sistema idrico elementare a portata erogata costante.

Nel §5.2.4 è stato già mostrato come è possibile applicare i risultati del metodo alle reti di acquedotto, ma sempre nell'ipotesi che la condizione di erogazione sia costante.

In realtà nel caso in cui la portata erogata vari nell'arco della giornata, è possibile ancora utilizzare la relazione 5.15 per valutare il grado di apertura della valvola in RTC, tenendo in considerazione però che i gruppi adimensionali \bar{A} e \bar{B} diventano funzione del tempo e che, conseguentemente, in accordo alla 5.29, anche il valore \bar{K}_p^* dovrebbe cambiare ad ogni istante.

Tuttavia, per l'implementazione di un'unità logica proporzionale semplice, è necessario adottare un unico valore del parametro proporzionale per l'intera regolazione.

A tale scopo, sfruttando i risultati ottenuti nel §5.3.2, è possibile derivare alcune semplici considerazioni che consentano di scegliere la condizione di erogazione del sistema che restituisca il valore del parametro proporzionale più conveniente da adottare per l'intera regolazione. Sostituendo nella 5.29 le definizioni dei gruppi adimensionali \bar{A} e \bar{B} di cui alla 5.16 e operando opportune sostituzioni al fine di mettere in evidenza la dipendenza di \bar{K}_p^* dalla portata erogata Q , è possibile scrivere:

$$\bar{K}_p^* = 1.57 \cdot \left(\frac{H_{sp}}{H_s - c_j Q^2 - H_{sp}} \right)^{1.492} \cdot \left(\frac{Q^2}{2g \cdot S^2 \cdot H_{sp}} \right)^{0.358} \cdot \bar{C}^{-0.555} \cdot \bar{D}^{0.910} \quad 5.30$$

essendo c_j [m^5/s^2] ed S [m^2] rispettivamente la conduttività e la sezione della tubazione.

Dalla 5.30 si osserva come la relazione di regressione restituisca valori di \bar{K}_p^* crescenti all'aumentare dei valori della portata Q .

Pertanto, l'adozione di un valore di \bar{K}_p^* relativo ad una generica portata Q conduce, per portate inferiori (a cui competerebbero valori minori di \bar{K}_p^*), a regolazioni caratterizzate dal rischio di oscillazioni permanenti.

Ne consegue che solo adottando il valore di \bar{K}_p^* relativo alla portata minima nelle ventiquattro ore possano ottenersi regolazioni che non determinano significative oscillazioni.

A titolo di esempio è stata effettuata una verifica numerica delle considerazioni di cui sopra; è stato simulato il comportamento del sistema idrico elementare con portata erogata variabile nelle ventiquattro ore; il diagramma giornaliero utilizzato è stato ricavato da Milano (1996) ed è presentato in Figura 5.9 in forma adimensionale rispetto alla portata minima.

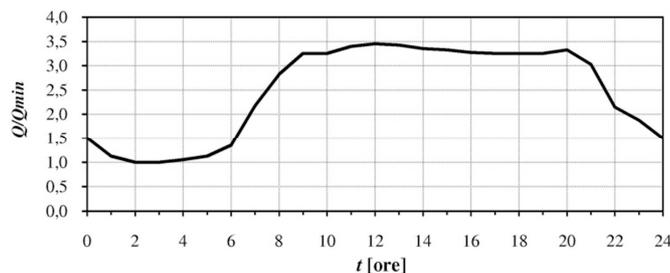


Figura 5.9: Diagramma giornaliero di portata, riferito alla portata minima Q_{min} (Milano, 1996)

Il sistema idrico elementare preso in considerazione, in condizione di portata erogata minima è caratterizzato dai seguenti valori dei gruppi dimensionali:

$$q_{min} = 1 \Rightarrow \bar{A} = 0.637 \quad \bar{B} = 0.00011 \quad \bar{C} = 2.4 \quad \bar{D} = 1.9 \Rightarrow \bar{K}_p^* = 0.13$$

mentre in condizione di portata erogata massima si ha:

$$q_{max} = 3.45 \Rightarrow \bar{A} = 0.315 \quad \bar{B} = 0.00131 \quad \bar{C} = 2.4 \quad \bar{D} = 1.9 \Rightarrow \bar{K}_p^* = 0.90$$

I risultati delle simulazioni numeriche sono riportati in Figura 5.10, ove è mostrato l’andamento nelle ventiquattro ore del carico piezometrico adimensionale al nodo erogante di valle e del grado di apertura della valvola; in particolare tali andamenti vengono riportati nel caso di assenza di controllo (No-RTC), nel caso di regolazione ottenuta col valore del parametro ottenuto in condizione di portata minima (RTC with $\bar{K}_p^*(q_{min}) = 0.13$) e infine nel caso di regolazione col valore del parametro ottenuto in condizione di portata massima (RTC with $\bar{K}_p^*(q_{max}) = 0.90$).

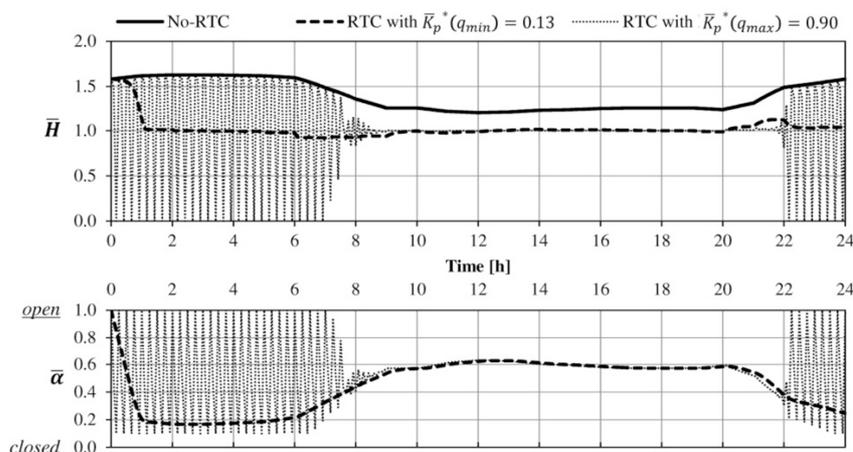


Figura 5.10: Risultati delle simulazioni numeriche del sistema idrico elementare in condizione di portata variabile in termini di carico piezometrico adimensionalizzato \bar{H} e di grado di apertura della valvola $\bar{\alpha}$

Dai risultati della simulazione si può rilevare come la regolazione ottenuta con il valore del parametro in condizioni di portata minima risulti estremamente efficace durante tutte le fasi del controllo.

Al contrario il valore del parametro proporzionale ottenuto in condizione di portata massima restituisce una regolazione caratterizzata da forti oscillazioni permanenti per portate inferiori a tre volte la portata minima; tale comportamento chiaramente non risulta accettabile e mostra come sia necessario in fase di calibrazione far sempre riferimento alla condizione minima di erogazione del sistema per non rischiare di avere forti e dannose oscillazioni del carico piezometrico dovute al controllo.

Capitolo 6

La calibrazione delle unità P: una strategia "analitica"

6.1 Generalità

6.1.1 Le curve di previsione nel controllo dei sistemi idrici

Le reti di distribuzione idrica sono soggette a variazioni nella distribuzione spaziale e nell'andamento temporale delle portate erogate ai nodi; tali variazioni risultano estremamente casuali e sono difficili da prevedere se non con elevate approssimazioni e con riferimento a medie spaziali e temporali.

Tuttavia è ragionevole assumere che per brevi intervalli temporali la "configurazione" delle portate erogate ai nodi rimanga invariata. In tale condizione, per una data configurazione Φ delle portate erogate ai nodi, il carico piezometrico al generico nodo di controllo risulta essere una funzione del solo grado di apertura della valvola $\bar{\alpha}$, ovvero si ha una *curva di risposta* del sistema all'azione della valvola del tipo:

$$H = H(\bar{\alpha}) \quad 6.1$$

In Figura 6.1 viene riportato un andamento tipico della curva di risposta $H = H(\bar{\alpha})$ del carico piezometrico H , rilevato al nodo di controllo, in funzione del grado di apertura $\bar{\alpha}$ della valvola di regolazione, per una data configurazione di erogazione delle portate ai nodi.

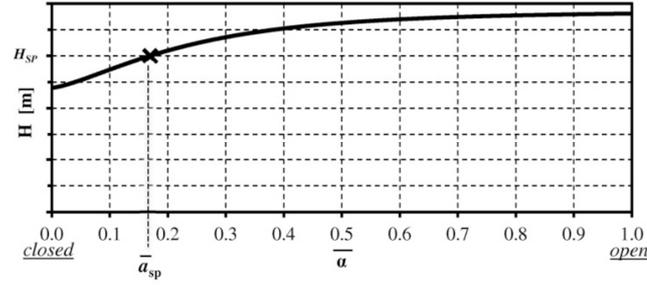


Figura 6.1: Curva di risposta di una rete idrica di letteratura, per una data configurazione delle portate erogate ai nodi, in termini di carico piezometrico al nodo di controllo al variare del grado di apertura della valvola di regolazione.

Ipotizzando che la curva di risposta $H = H(\bar{\alpha})$ sia nota per il dato sistema idrico e per la data configurazione delle portate erogate Φ , facendo riferimento alla relazione 5.8 e fissato un valore di K_p , è possibile determinare il valore del grado di apertura della valvola $\bar{\alpha}_{t+1}$ atteso all'istante temporale successivo, per ogni grado di apertura $\bar{\alpha}$ rilevabile all'istante temporale precedente:

$$\bar{\alpha}_{t+1} = \bar{\alpha} - \frac{K_p}{a_{tot}} [H(\bar{\alpha}) - H_{sp}] \quad 6.2$$

Inoltre nell'ipotesi che la configurazione Φ delle portate erogate non vari dall'istante t all'istante $t+1$, è possibile determinare l'errore atteso all'istante $t+1$:

$$err(\bar{\alpha}_{t+1}) = H(\bar{\alpha}_{t+1}) - H_{sp} \quad 6.3$$

Le relazioni 6.2 e 6.3 possono essere utilizzate per costruire le *curve di previsione* $\bar{\alpha}_{t+1} = f(\bar{\alpha})$ e $err(\bar{\alpha}_{t+1}) = err[f(\bar{\alpha})]$; fissato il sistema idrico in esame, la configurazione delle portate erogate ai nodi e nota di conseguenza la curva di risposta $H = H(\bar{\alpha})$, le curve di previsione risultano funzione del solo valore scelto per il parametro proporzionale K_p .

In particolare, al variare del valore adottato per il parametro proporzionale, è possibile distinguere tre tipologie di curve di previsione; a ciascuna tipologia corrisponde un differente comportamento in termini di regolazione della valvola.

In Figura 6.2 vengono mostrate le tre differenti tipologie di andamento delle curve di previsione:

- Curve di previsione caratteristiche di regolazioni veloci (K_p elevati);
- Curve di previsione caratteristiche di regolazioni lente (K_p modesti);
- Curva di previsione caratteristica di regolazioni efficaci (K_p^* ottimo);

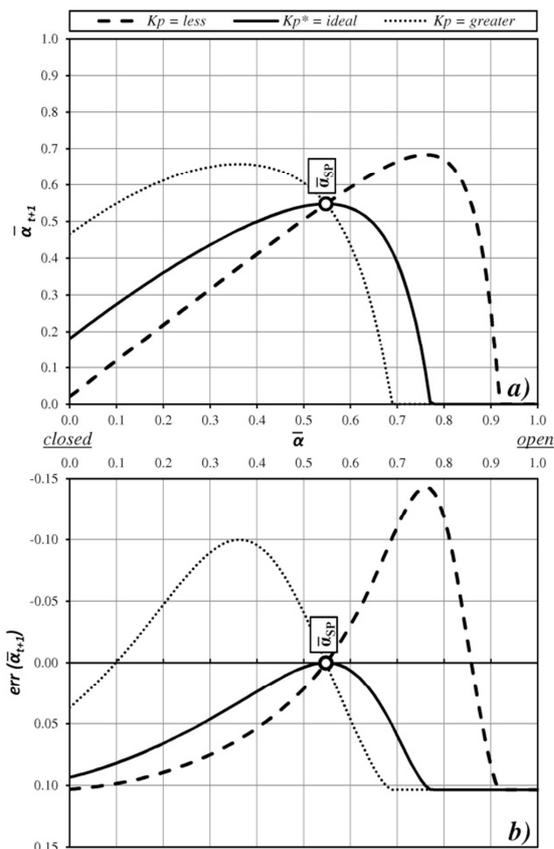


Figura 6.2: Confronto esplicativo tra le tre tipologie di curve di previsione del grado di apertura atteso $\bar{\alpha}_{t+1}$ e dell'errore atteso $err(\bar{\alpha}_{t+1})$

Dalla Figura 6.2 è possibile osservare come tutte le curve di previsione intercettino la condizione di set-point, ovvero la condizione per cui:

$$H(\bar{\alpha}_{sp}) = H_{sp} \tag{6.4}$$

Inoltre, sempre osservando la Figura 6.2, è possibile classificare il comportamento della regolazione ottenibile per un determinato valore del parametro K_p in base alla forma della corrispondente curva di previsione ed in particolare della posizione del suo punto di intersezione con la condizione di set-point.

Le curve di previsione caratterizzate da un picco in corrispondenza di gradi di apertura inferiori a quello di set-point e per cui dunque si hanno valori dell'errore negativi per $\bar{\alpha} < \bar{\alpha}_{sp}$, sono ottenute con valori di K_p eccessivamente elevati e determinano regolazioni eccessivamente veloci e contraddistinte da oscillazioni permanenti nell'intorno del set-point.

Al contrario le curve di previsione con il picco in corrispondenza di gradi di apertura più elevati rispetto a quello di set-point e per cui si osservano valori negativi dell'errore

per $\bar{\alpha} > \bar{\alpha}_{sp}$, sono ottenute con valori di K_p troppo modesti e comportano regolazioni eccessivamente lente.

Esiste un ben preciso valore K_p^* del parametro proporzionale tale che il picco della curva di previsione corrisponde con la condizione di set-point e tale per cui l'errore atteso al tempo successivo non risulta mai negativo; questo comporta che la regolazione ottenibile risulta, per ogni grado di apertura della valvola, sufficientemente veloce da ottenere la convergenza al set-point in tempi brevi senza mai però innescare fenomeni di oscillazione permanente.

6.1.2 L'equazione analitica per la calibrazione dell'unità P

La sopraesposta classificazione può essere meglio specificata facendo riferimento all'angolo γ_{sp} definito come la pendenza della curva di previsione $\bar{\alpha}_{t+1} = f(\bar{\alpha})$ in corrispondenza della condizione di set-point $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{sp}$.

In Figura 6.3 viene riportata graficamente la classificazione, effettuata in base all'angolo γ_{sp} per come sopra definito, dei possibili andamenti della curva di previsione $\bar{\alpha}_{t+1} = f(\bar{\alpha})$ al variare dei valori scelti per il parametro proporzionale K_p .

In particolare è possibile definire quattro tipologie di comportamento della regolazione in funzione dell'angolo γ_{sp} della curva di previsione $\bar{\alpha}_{t+1} = f(\bar{\alpha})$ corrispondente al relativo K_p :

- a. $-\pi/4 < \gamma_{sp} < 0$ regolazione lentamente convergente: si ottiene adottando valori del parametro K_p inferiori a quello ideale. Il sistema risulta poco reattivo alle variazioni delle condizioni di esercizio e può generare forti sovralongazioni.
- b. $\gamma_{sp} = 0$ regolazione convergente: si ottiene adoperando valori del parametro K_p prossimi a quello ideale. Il sistema risulta notevolmente reattivo per l'ottenimento del risultato desiderato, e dunque senza sovralongazioni, senza che ciò inneschi oscillazioni nell'intorno del set-point.
- c. $0 < \gamma_{sp} < \pi/4$ regolazione convergente oscillante: si ottiene adoperando valori del parametro K_p superiori a quello ideale. Il sistema risulta particolarmente reattivo ma può generare oscillazioni attorno al set-point prima del raggiungimento dello stesso.
- d. $\pi/4 < \gamma_{sp} < \pi/2$ regolazione oscillante divergente: si ottiene adoperando valori del parametro K_p molto superiori a quello ideale. Il sistema risulta troppo reattivo tanto da generare oscillazioni permanenti e da non raggiungere la condizione di set-point.

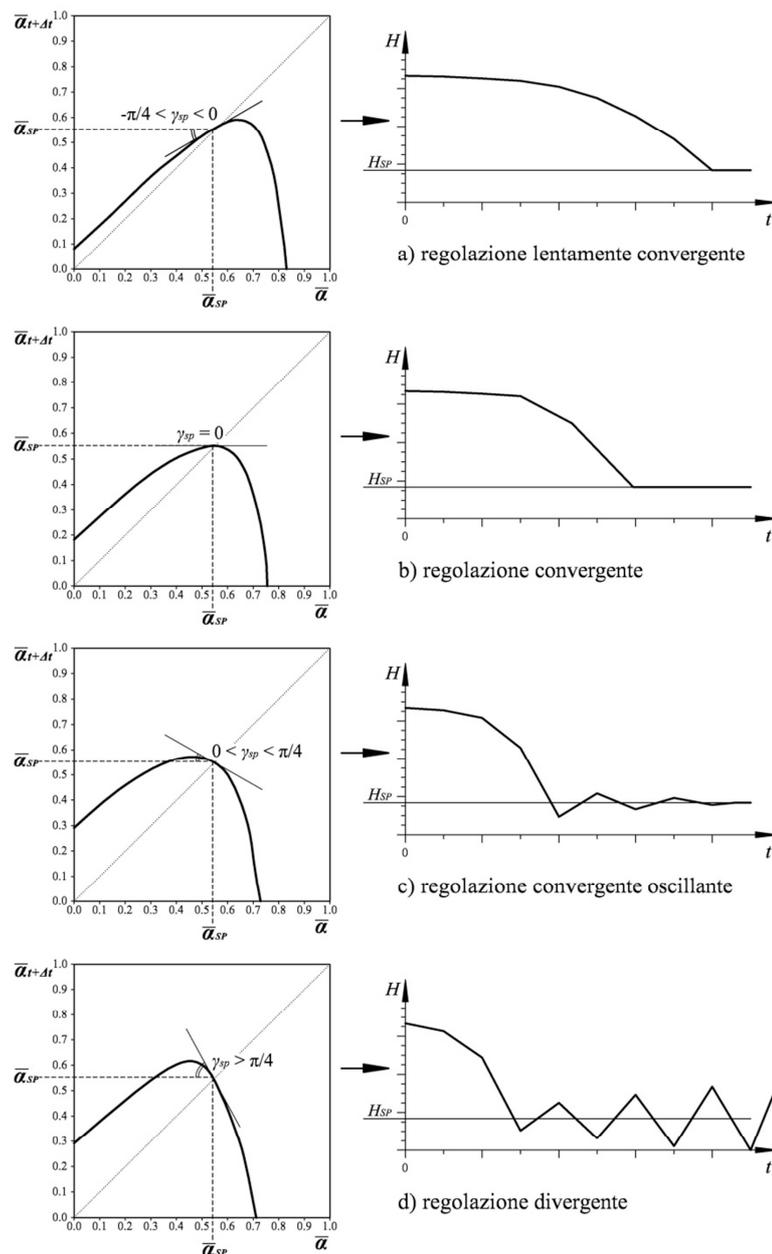


Figura 6.3: Classificazione dei possibili andamenti della curva di previsione al variare del valore adottato per il parametro proporzionale K_p

Si può dedurre che la migliore regolazione è quella ottenibile utilizzando il valore ideale K_p^* per il quale il relativo andamento della curva di previsione $\bar{\alpha}_{t+1} = f(\bar{\alpha})$ ha il

massimo assoluto in corrispondenza della condizione di set-point $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{sp}$; per determinare il valore K_p^* è dunque sufficiente imporre $\gamma_{sp} = 0$, ovvero:

$$\left. \frac{d\bar{\alpha}_{t+1}}{d\bar{\alpha}} \right|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}} = 0 \quad 6.5$$

Sostituendo la relazione 6.2 nella 6.5 è possibile ottenere:

$$K_p^* = - \frac{a_{tot}}{\left. \frac{dH(\bar{\alpha})}{d\bar{\alpha}} \right|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}}} \quad 6.6$$

In definitiva, per una rete di distribuzione idrica, data una configurazione Φ di portate erogate ai nodi, essendo nota nell'intorno del set-point la curva di risposta $H = H(\bar{\alpha})$ del carico piezometrico al nodo di controllo al variare del grado di apertura della valvola di regolazione, è possibile, utilizzando la relazione 6.6, definire il valore K_p^* da attribuire al parametro proporzionale per ottenere una regolazione ideale.

6.2 Confronto tra strategia numerica ed analitica

Nel seguito vengono messe a confronto la metodologia “numerica” di calibrazione del parametro proporzionale presentata nel capitolo 0 e quella “analitica” presentata in questo capitolo.

Per rendere confrontabili le due strategie, è necessario riscrivere la relazione 6.6 per il sistema idrico elementare a portata costante e in forma adimensionale.

Viste le definizioni dei gruppi adimensionali di cui alla 5.16, è possibile esprimere il carico piezometrico al nodo del sistema idrico elementare nella forma:

$$H(\bar{\alpha}) = H_{sp} [\bar{A} - \bar{B} \cdot \xi(\bar{\alpha}) + 1] \quad 6.7$$

e tenendo conto della 5.12 e della 5.14 è possibile scrivere la 6.6 nella forma adimensionale:

$$\bar{K}_p^* = \frac{\bar{\alpha}_{sp}}{\bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \xi(\bar{\alpha}_{sp})} \quad 6.8$$

Considerato inoltre che:

$$\xi(\bar{\alpha}_{sp}) = \frac{\bar{A}}{\bar{B}} \quad 6.9$$

$$\bar{\alpha}_{sp} = 10^{\frac{\bar{D} - \log(\bar{A}/\bar{B})}{\bar{C}}} \quad 6.10$$

la 6.8 può essere espressa nella forma:

$$\bar{K}_p^* = \frac{10^{\frac{\bar{D} - \log(\bar{A}/\bar{B})}{\bar{C}}}}{\bar{C} \cdot \bar{A}} \quad 6.11$$

La relazione 6.11 consente di determinare, seguendo l'impostazione del metodo "analitico", il \bar{K}_p^* relativo ad un set di gruppi adimensionale $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ e \bar{D} del sistema idrico elementare.

Il confronto è stato operato relativamente alle medesime 6'124 configurazioni di cui al paragrafo 5.3.1

I risultati del confronto vengono riportati in Figura 6.4; in particolare i risultati ottenibili tramite la metodologia analitica, ovvero tramite la 6.11, sono stati confrontati con i corrispondenti valori calcolabili tramite la relazione di regressione 5.29.

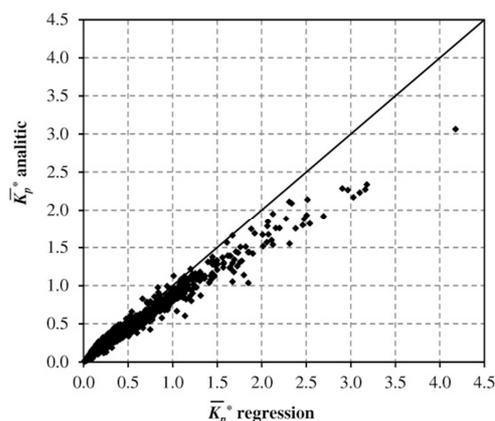


Figura 6.4: Confronto tra i valori \bar{K}_p^* ottenuti con l'approccio analitico (eq. 6.11) e quelli ottenuti applicando l'equazione di regressione 5.29

Dalla Figura 6.4 si può evincere come vi sia una buona corrispondenza tra i valori di \bar{K}_p^* ottenuti con l'approccio analitico e quelli ottenuti con l'approccio numerico; si osserva una leggera sovrastima della strategia numerica, in particolare per valori elevati del \bar{K}_p^* , dovuti probabilmente alla metodologia di scelta del valore ottimale che nel minimizzare la quantità δ (eq. 5.17) tende a prediligere le regolazioni più veloci.

Tuttavia entrambe le metodologie, nonostante siano state concepite tramite considerazioni di base estremamente differenti, restituiscono risultati molto simili il che va a validare l'affidabilità delle stesse.

6.3 La strategia analitica per portate variabili

6.3.1 Generalità

Nelle pratiche applicazioni le portate domandate ai nodi delle reti di acquedotto sono fortemente variabili nell'arco del giorno, della settimana e dell'anno; la funzione del controllo in tempo reale è proprio quella di compensare gli effetti dovuti alla variabilità

delle portate, in termini di carico piezometrico, per riportare il sistema alla condizione desiderata.

La teoria di calibrazione del parametro dell'unità logica proporzionale per il RTC delle valvole di riduzione di pressione, proposta nel presente capitolo, è stata sviluppata con l'unica ipotesi di prendere in considerazione una data configurazione di erogazione Φ del sistema idrico, ovvero per un ben preciso stato di moto permanente della rete acquedottistica.

Al fine di modellare le variazioni della configurazione di erogazione delle portate della rete come una successione di stati di moto permanente e intendendo con Φ_t la configurazione spaziale e temporale delle portate erogate ai nodi della rete al generico tempo t , la relazione 6.2 può essere scritta nella forma:

$$\bar{\alpha}_{t+1} = f(\bar{\alpha}, \Phi_t) = \bar{\alpha} - \frac{K_p}{c_{tot}} [H(\bar{\alpha}, \Phi_t) - H_{sp}] \quad 6.12$$

e analogamente la relazione 6.6 può essere meglio espressa nella forma:

$$K_p^*(\Phi_t) = - \frac{a_{tot}}{\left. \frac{dH(\bar{\alpha}, \Phi_t)}{d\bar{\alpha}} \right|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}(\Phi_t)}} \quad 6.13$$

La pedissequa applicazione della relazione 6.13 comporterebbe l'adozione di un valore del parametro K_p^* variabile in funzione della configurazione Φ_t di erogazione del sistema nel tempo; ciò però presupporrebbe la conoscenza, per la rete di interesse, delle curve di risposta $H(\Phi_t) = H(\bar{\alpha}, \Phi_t)$ per ciascuna delle possibili configurazioni Φ_t , il che potrebbe risultare di difficile implementazione senza una qualche ipotesi semplificativa.

Si pone dunque il problema di esaminare le modalità di applicazione della relazione 6.13 alle reti di acquedotto a portata variabile.

In particolare è possibile utilizzare un unico valore del parametro proporzionale, in tutte le condizioni di erogazione, o implementare un sistema con consenta di adattare il parametro proporzionale alla specifica condizione di funzionamento del sistema.

La scelta deve essere effettuata in funzione delle caratteristiche della rete da controllare: se l'acquedotto in esame non presenta forti variazioni delle condizioni di erogazione è conveniente scegliere la prima soluzione caratterizzata da maggiore affidabilità e necessita di una minore implementazione tecnologica. Al contrario in condizioni caratterizzate da forti variabilità giornaliere o settimanali della portata, può risultare conveniente adoperare un sistema autoadattativo del parametro proporzionale.

6.3.2 Unico valore di K_p per la regolazione

Volendo adottare un unico valore del parametro K_p per l'intera regolazione, al fine di non ricadere nel campo delle oscillazioni permanenti in nessuna delle condizioni di erogazione della rete, è necessario scegliere il più basso valore del parametro K_p :

$$K_p^* = \min \left\{ - \frac{a_{tot}}{\left. \frac{dH(\bar{\alpha}, \Phi_t)}{d\bar{\alpha}} \right|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}(\Phi_t)}} \right\} \quad \forall \Phi_t \quad 6.14$$

L'utilizzo della relazione 6.14 implica l'esame di tutte le condizioni di erogazione del sistema al fine di individuare quella che restituisce il minor valore del parametro proporzionale; chiaramente tale soluzione non risulta di agevole implementazione.

Invece nel §5.2.4 è stato mostrato come per un sistema idrico elementare a portata costante il valore K_p^* del parametro proporzionale sia direttamente proporzionale al valore della portata erogata e come pertanto, per la determinazione di un unico valore del parametro proporzionale nel caso di portata variabile, al fine di non rischiare di ricadere nel campo delle regolazioni con oscillazioni permanenti, sia sufficiente assumere il K_p^* relativo alla condizione di portata erogata minima.

Assumendo che tale risultato possa essere applicato alle reti acquedottistiche, la relazione 6.14 può essere espressa nella forma:

$$K_p^* = \min \left\{ -\frac{a_{tot}}{\left. \frac{dH(\bar{\alpha}, \Phi_t)}{d\bar{\alpha}} \right|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}(\Phi_t)}} \right\} \forall \Phi_t = \left\{ -\frac{a_{tot}}{\left. \frac{dH(\bar{\alpha}, \Phi_{min})}{d\bar{\alpha}} \right|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}(\Phi_{min})}} \right\} \quad 6.15$$

dove per Φ_{min} si intende la configurazione delle portate erogate che restituisce il minore grado di apertura di set-point, ovvero tale che:

$$\bar{\alpha}_{sp}(\Phi_{min}) = \min\{\bar{\alpha}_{sp}\} \quad 6.16$$

E' bene precisare però come la relazione 6.15 possa essere ritenuta strettamente vera per il solo sistema idrico elementare; infatti le reti di acquedotto subiscono l'effetto della redistribuzione delle portate nei rami paralleli a quello di inserimento della valvola di regolazione. Tale circostanza fa sì che per gradi di apertura molto modesti della valvola (valvola molto chiusa), al contrario di quanto accade normalmente, l'influenza della valvola sul sistema comincia a decrescere; ciò accade quando all'aumentare della chiusura della valvola la portata transitante nel ramo di inserimento diminuisce più velocemente di quanto non aumenti la pendenza del coefficiente di perdita di carico.

Ciononostante, tali circostanze si verificano solo per valori del grado di apertura estremamente modesti ($\bar{\alpha}_{sp} < 0.1$) o per particolari configurazioni della rete idrica in esame; pertanto l'influenza dell'effetto di redistribuzione delle portate sulla fase di calibrazione, in linea di massima, può essere trascurata.

6.3.3 K_p auto-adattativo

Nei paragrafi precedenti è stato messo in evidenza come, adoperando la relazione 6.13, sia possibile determinare il valore "ideale" del parametro proporzionale $K_p^*(\Phi_t)$ per la data configurazione delle portate erogate Φ_t , essendo nota la curva di risposta del sistema in termini di carico piezometrico $H(\Phi_t) = H(\bar{\alpha}, \Phi_t)$ nell'intorno della condizione di set-point.

Per una rete idrica a portata variabile, dove Φ_t varia nel tempo, è chiaro che la migliore regolazione si otterrebbe utilizzando per ogni configurazione Φ_t il corrispondente $K_p^*(\Phi_t)$.

Tale soluzione è di difficile attuazione in quanto risulta impossibile conoscere tutte le infinite configurazioni Φ_t e le relative curve di risposte del sistema in corrispondenza della condizione di set-point. Tuttavia ogni qual volta il sistema raggiunge la condizione

di set-point, misurando il carico piezometrico al nodo di controllo con un intervallo temporale talmente contenuto da ritenere irrilevanti le variazioni della condizione di erogazione del sistema, è possibile costruire la curva di risposta nell'intorno del set-point e determinare così il corrispondente valore del parametro proporzionale.

A scopo esplicativo, in Figura 6.5 viene riportata una schematizzazione del processo numerico di auto-calibrazione da attuare durante la fase di regolazione della valvola di riduzione di pressione.

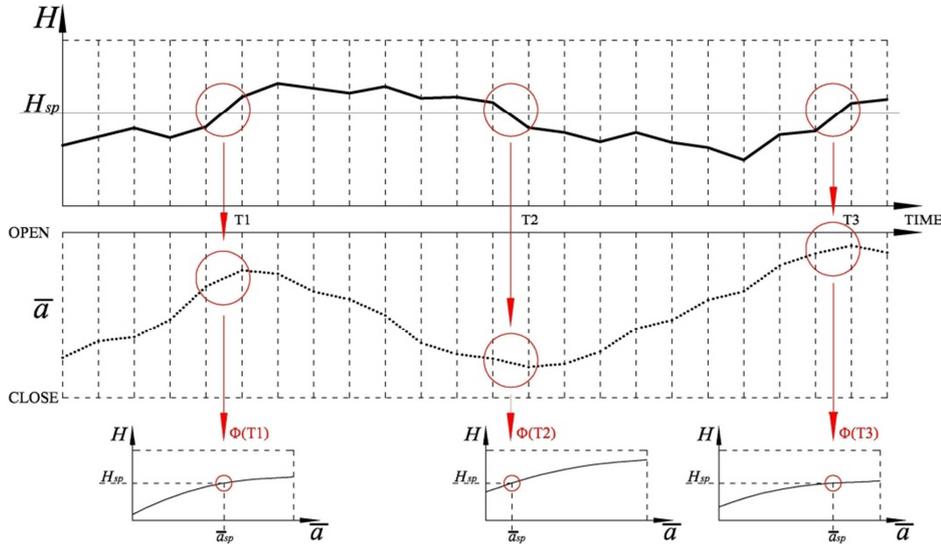


Figura 6.5: Schematizzazione del processo numerico per l'auto-calibrazione del parametro proporzionale K_p durante la fase di regolazione

Osservando la Figura 6.5 si può intuire come durante il processo di RTC della valvola, negli istanti in cui il carico piezometrico intercetta il set-point e nell'ipotesi che tra un istante di monitoraggio e il successivo la configurazione di erogazione delle portate ai nodi si mantenga invariata, sia possibile determinare:

$$\left. \frac{dH(\bar{\alpha}, \Phi_T)}{d\bar{\alpha}} \right|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}(\Phi_T)} \cong \frac{H_T - H_{(T-\Delta t)}}{\bar{\alpha}_T - \bar{\alpha}_{(T-\Delta t)}} \quad 6.17$$

essendo T il generico istante temporale successivo all'intersezione del set-point da parte del carico piezometrico, ovvero tale che:

$$\begin{cases} \bar{\alpha}_T < \bar{\alpha}_{(T-\Delta t)} \\ H_T < H_{sp} < H_{(T-\Delta t)} \end{cases} \quad \text{or} \quad 6.18$$

$$\begin{cases} \bar{\alpha}_{(T-\Delta t)} < \bar{\alpha}_T \\ H_{(T-\Delta t)} < H_{sp} < H_T \end{cases}$$

Sostituendo la 6.17 nella 6.13 si ottiene:

$$K_p^*(\Phi_t) = - \frac{\alpha_{tot}}{\frac{H_T - H(T-\Delta t)}{\bar{\alpha}_T - \bar{\alpha}(T-\Delta t)}} \quad 6.19$$

L'implementazione della 6.19, con l'imposizione delle condizioni 6.18, consente, durante la regolazione in tempo reale, di determinare il valore corretto K_p^* del parametro proporzionale al variare della portata, ogni qual volta il carico piezometrico H interseca il valore di set-point H_{sp} per effetto dell'azione sulla valvola.

Capitolo 7

Applicazione ad una rete di letteratura

7.1 Il modello di simulazione idraulica

Nel presente lavoro di tesi sono state effettuate varie simulazioni idrauliche di reti di condotte in pressione; il modello adoperato è un convenzionale modello di simulazione di stati successivi di moto permanente con metodo di risoluzione di Newton Raphson (Martin & Peters 1963).

Il modello di simulazione è stato modificato al fine di consentire la simulazione idraulica di reti di distribuzione idrica controllate in tempo reale per mezzo di apposite valvole di regolazione.

In particolare nel modello si tiene conto della presenza delle valvole di regolazione, aggiungendo nelle equazioni del moto, ovvero nel coefficiente della matrice di conduttività corrispondente al ramo i di inserimento, la quantità $\Delta H_{i,t}$ dovuta alle perdite concentrate - provocate dalla valvola - per ogni stato t di moto permanente:

$$\Delta H_{i,t} = \xi_{i,t} \cdot \frac{v_{i,t}^2}{2g} \quad 7.1$$

dove $\xi_{i,t}$ è il coefficiente di perdita di carico associata alla valvola nel ramo i , funzione del grado di apertura imposto per la data condizione t di moto permanente; come già messo in luce nel §4.3.2 e nel §5.2.1, la relazione che lega il coefficiente di perdita di carico ξ al grado di apertura \bar{a} della valvola:

$$\xi_{i,t} = \xi_i(\bar{a}_{i,t}) \quad 7.2$$

viene solitamente fornita dalle case costruttrici sotto forma di curva, interpolante di dati sperimentali di laboratorio, che può essere ben espressa tramite la forma logaritmica 5.14, ovvero, per il generico stato di moto permanente t , tramite la:

$$\log_{10} \xi_{i,t} = -\bar{C}_i \cdot \log_{10} \bar{a}_t + \bar{D}_i \quad 7.3$$

dove \bar{C}_i e \bar{D}_i sono parametri caratteristici della valvola inserita nel ramo i .

Per consentire la simulazione del controllo della valvola, nel modello è stata implementata l'equazione 5.8 dell'unità logica proporzionale, tenendo conto dei vincoli imposti dalla velocità dell'otturatore V_{ott_i} al ramo i :

$$\bar{a}_{i,T+\Delta t_{RTC}} = \bar{a}_{i,T} - \min \left\{ \frac{K_{p_i}}{a_{tot_i}} \cdot |H_{i,T} - H_{sp_i}|; \frac{V_{ott_i} \cdot \Delta t_{RTC}}{a_{tot_i}} \right\} \cdot \text{sign}(H_{i,T} - H_{sp_i}) \quad 7.4$$

dove T è il generico istante di controllo in cui viene operato il controllo, $\bar{a}_{i,T+\Delta t_{RTC}}$ è il grado di apertura per la valvola al ramo i determinato per l'istante di controllo successivo a quello di calcolo, $H_{i,T}$ e H_{sp_i} sono rispettivamente il carico piezometrico rilevato al nodo di controllo della valvola inserita al ramo i e il relativo carico desiderato, mentre K_{p_i} e a_{tot_i} sono rispettivamente i valori del parametro proporzionale dell'unità logica e la corsa dell'otturatore della valvola al ramo i .

E' bene chiarire che nel modello è stata implementata la possibilità di distinguere tra intervallo temporale di simulazione Δt_{sim} e intervallo temporale di controllo Δt_{RTC} , ovvero l'intervallo temporale che intercorre tra un controllo e il successivo. Tale distinzione è stata operata solo al fine di poter esaminare con maggior accuratezza i risultati delle simulazioni. Negli istanti in cui non viene operato il controllo, il nuovo grado di apertura viene banalmente determinato linearmente, in funzione della velocità dell'otturatore, sino al raggiungimento del valore calcolato tramite la 7.3.

Nel modello si tiene conto anche dell'imposizione della sensitività per il controllo, ovvero il calcolo del valore aggiornato del grado di apertura della valvola viene operato solo qualora:

$$|H_{i,T} - H_{sp_i}| \geq \text{sensitività} \quad 7.5$$

Nel modello sono anche state implementate alcune procedure specifiche che consentono di costruire automaticamente le curve di risposta del sistema all'azione sulla valvola a portata costante – di cui in Figura 5.6 e Figura 6.1 – necessarie al fine di applicare le procedure di calibrazione del parametro proporzionale. E' stata anche implementata la procedura per la determinazione dei nodi sensibili di controllo della rete, per come proposto in Campisano et al., 2010.

Inoltre il modello consente di autocalcolare i valori del parametro proporzionale – durante la regolazione – tramite la relazione 6.19, qualora soddisfatte le condizioni di cui alla 6.18.

Per quanto riguarda la legge di erogazione delle portate ai nodi, il modello consente di implementare la modalità *head-driven*, (Tanyimboh et al. 2001), determinando le portate erogate ai nodi in funzione delle pressioni secondo le relazioni:

- se $H_{i,t} < H_{min_i}$ $\rightarrow Q_{i,t} = 0$
- se $H_{min_i} \leq H_{i,t} \leq H_{des_i}$ $\rightarrow Q_{i,t} = Q_{dom_{i,t}} \cdot \left(\frac{H_{i,t} - H_{min_i}}{H_{des_i} - H_{min_i}} \right)^{0.5}$
- se $H_{i,t} > H_{des_i}$ $\rightarrow Q_{i,t} = Q_{dom_i}$

essendo Q_{dom_i} e $Q_{i,t}$ rispettivamente la portata domandata e quella erogata al nodo j , mentre H_{min_i} e H_{des_i} sono rispettivamente i carichi piezometrici minimo e desiderato per le condizioni di erogazione.

Infine, per quanto riguarda le perdite idriche il calcolo viene effettuato tramite il medesimo metodo usato in Araujo et al. (2006), ovvero concentrando su ogni nodo le portate perse nei rami in esso convergenti; in particolare la portata persa in ciascun metà ramo viene calcolata tramite la relazione:

$$QP_{i,j} = H_i^{1.18} \cdot \frac{L_{i,j}}{2} \cdot CP_{i,j} \tag{7.6}$$

dove $QP_{i,j}$ [l/s] è la portata persa nel ramo che collega il nodo i al nodo j , nella metà più prossima la nodo i , $L_{i,j}$ [m] è la lunghezza del ramo, $CP_{i,j}$ [l/s/m] è il coefficiente di perdita del ramo in funzione delle condizioni della tubazioni, e H_i [m] è il carico piezometrico al nodo i ; i valori calcolati con la 7.6 vengono dunque concentrati nelle equazioni di continuità dei nodi corrispondenti.

7.2 La rete di Jowitt and Xu

7.2.1 Le caratteristiche

La rete di letteratura scelta per le applicazioni è una ben nota rete di bench-test, proposta per la prima volta in Jowitt & Xu, 1990, composta da venticinque nodi, di cui tre serbatoi, e trentasette rami; in Figura 7.1 viene mostrato lo schema.

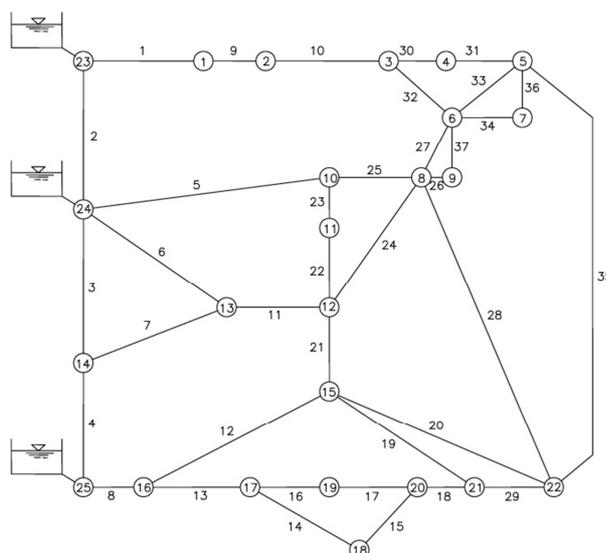


Figura 7.1: Schema della rete idrica adoperata nelle applicazioni (Jowitt and Xu, 1990)

Tale rete è stata adoperata recentemente in Campisano et al, 2010 per mostrare i benefici del controllo in tempo reale delle valvole di riduzione di pressione nelle reti di acquedotto; precedentemente è stata utilizzata da molti autori (Reis et al. 1997; Vairavamoorthy and Lumbers 1998; Pezzinga and Gueli 1999; Araujo et al. 2006) nel

campo della riduzione delle pressioni e delle perdite idriche. Tutti i dati della rete sono stati ricavati da Jowitt & Xu, 1990. In Tabella 7.I vengono riportate le principali caratteristiche geometriche e idrauliche della rete in esame e la configurazione base delle portate medie domandate ai nodi Q_{AV} . Le fluttuazioni del coefficiente orario delle portate domandate (compreso tra 0.6 e 1.4) e delle quote idriche dei serbatoi, sono riportate rispettivamente in Figura 7.2 e Figura 7.3.

Tabella 7.I: Caratteristiche idrauliche e geometriche della rete adoperata nelle applicazioni (Jowitt and Xu, 1990)

	Nodo	Quota	Q_{AV}	Ramo	Nodo	Nodo	L	D	Hazen
		[m]	[l/s]		iniz.	fin.	[m]	[m]	Williams coeff.
	1	18	5	1	23	1	606	0.457	110
	2	18	10	2	23	24	454	0.457	110
	3	14	0	3	24	14	2782	0.229	105
	4	12	5	4	25	14	304	0.381	135
	5	14	30	5	10	24	3382	0.305	100
	6	15	10	6	13	24	1767	0.475	110
	7	14.5	0	7	14	13	1014	0.381	135
	8	14	20	8	16	25	1097	0.381	6
	9	14	0	9	2	1	1930	0.457	110
	10	15	5	10	3	2	5150	0.305	10
	11	12	10	11	12	13	762	0.457	110
	12	15	0	12	15	16	914	0.229	125
	13	23	0	13	17	16	822	0.305	140
	14	20	5	14	18	17	411	0.152	100
	15	8	20	15	20	18	701	0.229	110
	16	10	0	16	19	17	1072	0.229	135
	17	7	0	17	20	19	864	0.152	90
	18	8	5	18	21	20	711	0.152	90
	19	10	5	19	21	15	832	0.152	90
	20	7	0	20	22	15	2334	0.229	100
	21	10	0	21	12	15	1996	0.229	95
	22	15	20	22	11	12	777	0.229	90
Reserv.	<u>23</u>	-	0	23	10	11	542	0.229	90
	<u>24</u>	-	0	24	8	12	1600	0.457	110
	<u>25</u>	-	0	25	8	10	249	0.305	105
				26	9	8	443	0.229	90
				27	6	8	743	0.381	110
				28	22	8	931	0.229	125
				29	22	21	2689	0.152	100
				30	4	3	326	0.152	100
				31	5	4	844	0.229	110
			32	6	3	1274	0.152	100	
			33	5	6	1115	0.229	90	
			34	7	6	615	0.381	110	
			35	5	22	1408	0.152	100	
			36	5	7	500	0.381	110	
			37	6	9	300	0.229	90	

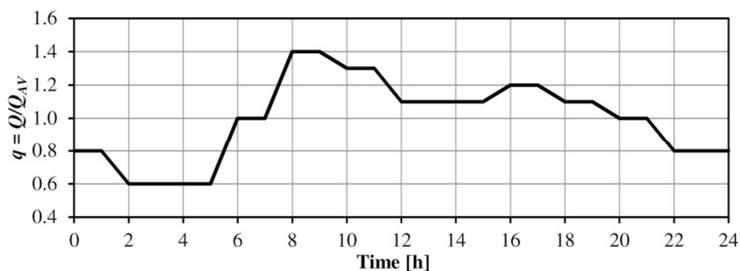


Figura 7.2: Coefficiente orario delle portate domandate ai nodi (Jowitt and Xu, 1990)

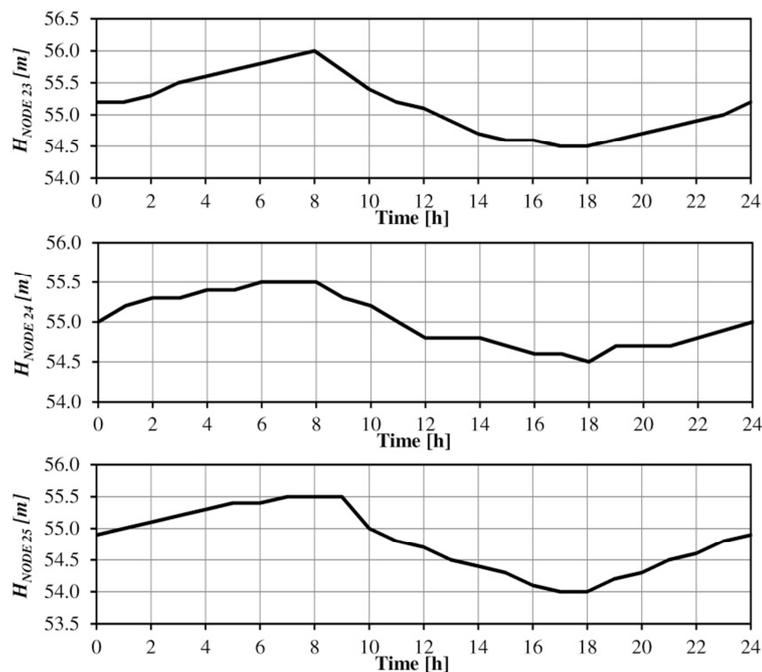


Figura 7.3: Fluttuazioni temporali delle quote idriche nei serbatoi (Jowitt and Xu, 1990)

Per la regolazione della valvola, come valore desiderato in termini di carico piezometrico a tutti i nodi di controllo è stato imposto $H_{sp}=30$ m.

Nella modellazione idraulica della rete è stato adoperato un approccio di tipo pressure-driven, così come esposto nel paragrafo precedente, avendo imposto $H_{min}=5$ m e $H_{des}=30$ m.

Come in Araujo et al. (2006), il coefficiente di perdite idriche, da inserire nella 7.6, è stato assunto costante per tutta la rete e imposto pari a $9.5 \cdot 10^{-6}$ l/s/m.

Le simulazioni del comportamento idraulico della rete sono state effettuate con un intervallo temporale di simulazione $\Delta t_{sim}=1$ s, mentre per l'intervallo temporale che intercorre tra un controllo della valvola e il successivo è stato imposto $\Delta t_{RTC}=5$ min. La differenziazione tra intervallo temporale di simulazione e di controllo, anche se non

provoca alcuna differenza in termini di modellazione del fenomeno, consente di effettuare analisi più approfondite dei risultati ottenuti.

Per comodità di confronto dei risultati ottenuti si è scelto di effettuare le simulazioni del RTC imponendo che il controllo avvenga in maniera rigida ogni intervallo Δt_{RTC} , nonostante tale tipologia di controllo peggiori notevolmente i risultati rispetto ad una modalità cry-out in cui il controllo viene effettuato non appena la grandezza monitorata supera il range di accettabilità.

Come valvola di regolazione è stata adottata una curva del coefficiente di perdita di carico reperibile in commercio; la curva, riportata in Figura 7.4, è definibile tramite i valori dei parametri $\bar{C} = 2.8$ e $\bar{D} = 1.5$ da inserire nella 5.14. Al fine di ottenere regolazioni più omogenee sono state adottate valvole con diametro inferiore a quello dei rami in cui vengono inserite.

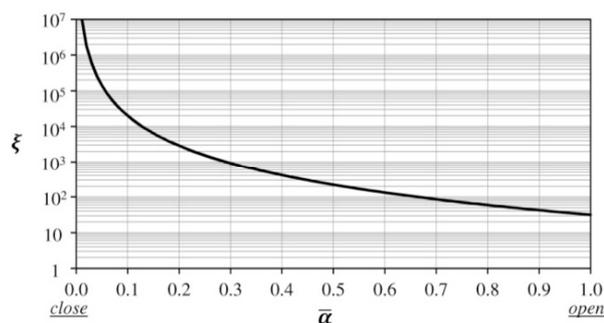


Figura 7.4: Curva del coefficiente di perdita di carico della valvola, adoperata nelle simulazioni, al variare del grado di apertura

La sensitività del sistema di RTC, ovvero la tolleranza entro la quale il sistema non agisce sulla valvola per compensare l'errore rilevato, è stata posta pari al 2% del carico di set-point.

L'ampiezza della corsa dell'otturatore della valvola è stata posta pari a $a_{tot}=100$ mm, mentre come velocità di movimento dello stesso è stato adottata $V_{ot}=0.5$ mm/s, dunque sufficientemente lenta da non innescare fenomeni di moto vario in rete.

Al fine di evitare regolazioni anomale della valvola è stato imposto per il grado di apertura valori sempre superiori a 0.1.

In linea con quanto fatto in Pezzinga & Gueli (1999) Araujo et al. (2006) e in Campisano et al (2010), le valvole sono state posizionate nel ramo 11 con controllo sul nodo 22, nel caso di una valvola, e nel ramo 1 con controllo sul nodo 2, nel caso di due valvole.

7.2.2 La calibrazione con le regole di Ziegler-Nichols

Seguendo l'approccio di Ziegler-Nichols (1942), è stato simulato il comportamento della rete in esame, per un arco temporale di 24 ore, aumentando gradualmente il valore del parametro proporzionale, al fine di determinare quale fosse il primo valore del "guadagno" tale da provocare oscillazioni permanenti nel controllo della valvola.

Per ciascun valore del parametro proporzionale K_p è stato calcolato il valore medio, nelle 48 ore, dello scarto del carico piezometrico al nodo 22 di controllo rispetto al valore desiderato di set-point; i risultati vengono riportati in Figura 7.5.

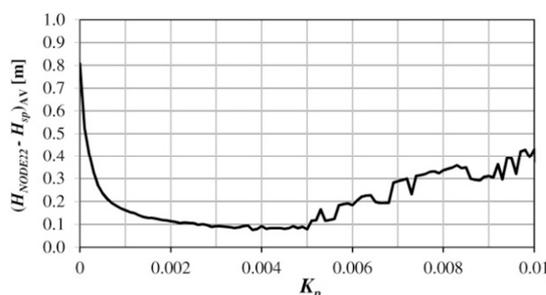


Figura 7.5: Media dello scarto del carico piezometrico al nodo 22 di controllo rispetto al valore di set-point sull'intera simulazione di 24 ore, al variare del valore di K_p

Dall'analisi della Figura 7.5 è stato possibile notare come vi sia un'impennata repentina dello scarto medio in corrispondenza del valore $K_p=0.0051$; osservando i relativi risultati della simulazione idraulica (riportati in Figura 7.6) nonché quelli relativi ai valori dei K_p più prossimi, si è potuto concludere come tale valore sia il primo a provocare nella regolazione oscillazioni permanenti.

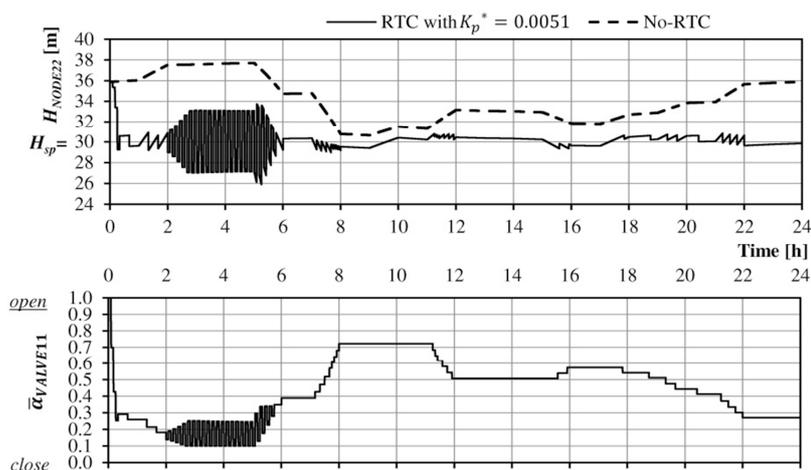


Figura 7.6: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu controllata in tempo reale tramite un'unità logica proporzionale con $K_p^* = 0.0051$, minimo valore del parametro che provoca oscillazioni permanenti nella regolazione del sistema

Di conseguenza, seguendo la procedura di Ziegler-Nichols, il valore del parametro proporzionale da adottare per il controllo del sistema in esame è pari a:

$$\text{Ziegler-Nichols} \rightarrow K_p^* = 0.0025 \qquad 7.7$$

7.3 Applicazione della strategia di calibrazione numerica

7.3.1 Determinazione del valore K_p^*

La rete di letteratura presa in considerazione è stata utilizzata per mostrare l'efficacia della strategia "numerica" esposta nel capitolo 0. A titolo esplicativo vengono riportati tutti i passaggi necessari per l'implementazione del metodo.

Il primo passo è la costruzione della curva di risposta del sistema nella condizione di portata erogata minima $\Phi = \Phi_{min}$ delle ore 5.00 ovvero, osservando la Figura 7.2 e la Figura 7.3, per il valore del coefficiente di portata $q=0.6$ e per le quote idriche nei serbatoi $H_{NODE23}=55.7$ m, $H_{NODE24}=55.4$ m e $H_{NODE25}=55.4$ m.

A tale scopo è stato usato il modello di simulazione di moto permanente appositamente modificato per calcolare il carico piezometrico al nodo di controllo per ogni grado di apertura della valvola. I risultati della modellazione vengono riportati in Figura 7.7.

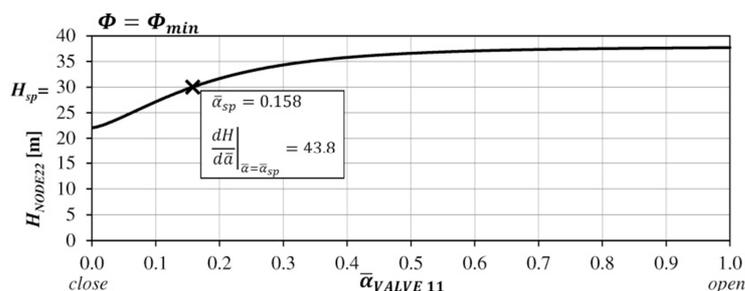


Figura 7.7: Curva di risposta della rete di Jowitt & Xu, in condizione minima di erogazione $\Phi = \Phi_{min}$, in termini di carico piezometrico al nodo di controllo 22 al variare del grado di apertura della valvola al ramo 11

Ricavati, dalla curva di risposta del sistema di Figura 7.7, i valori del grado di apertura di set-point e della derivata della curva al set-point:

$$\Phi = \Phi_{min} \rightarrow \bar{\alpha}_{sp} = 0.158 \quad \left. \frac{dH}{d\alpha} \right|_{\bar{\alpha}=\bar{\alpha}_{sp}} = 43.8 \quad 7.8$$

è possibile, tramite le relazioni 5.24 e 5.25, determinare i valori dei gruppi adimensionali del sistema idrico elementare equivalente alla rete in esame:

$$\Phi = \Phi_{min} \rightarrow \bar{A} = 0.0823 \quad \bar{B} = 1.48 \cdot 10^{-5} \quad 7.9$$

Tali valori dei gruppi adimensionali, insieme a quelli caratteristici della valvola $\bar{C} = 2.8$ e $\bar{D} = 1.5$, inseriti nell'equazione di regressione 5.29, forniscono il valore $\bar{K}_p^* = 0.9936$, e sfruttando la definizione 5.12 si ottiene in definitiva:

$$\Phi = \Phi_{min} \rightarrow K_p^* = 0.0033 \quad 7.10$$

Al fine di validare le considerazioni riportate nel §5.3.3 e di mostrarne gli effetti, la medesima procedura è stata applicata nella configurazione di erogazione massima

$\Phi = \Phi_{max}$ della rete, ovvero quella delle ore 8.00 per cui si ha come coefficiente di portata $q=1.4$ e come quote idriche nei serbatoi $H_{NODE23}=56.0$ m, $H_{NODE24}=55.5$ m e $H_{NODE25}=55.5$ m.

In Figura 7.8 viene riportata la curva di risposta del sistema in condizione di massima erogazione.

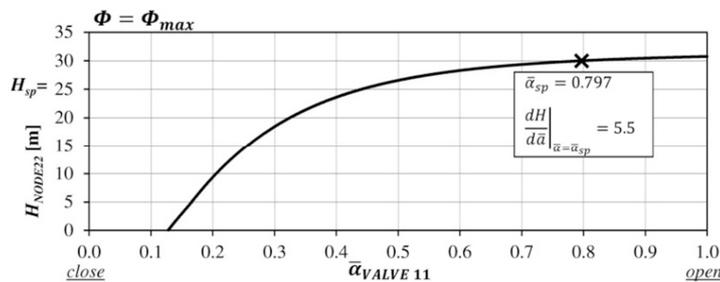


Figura 7.8: Curva di risposta della rete di Jowitt & Xu, in condizione massima di erogazione $\Phi = \Phi_{max}$, in termini di carico piezometrico al nodo di controllo 22 al variare del grado di apertura della valvola al ramo 11

Analogamente a quanto fatto sopra, si sono ottenuti i valori:

$$\Phi = \Phi_{max} \rightarrow \bar{A} = 0.052 \quad \bar{B} = 0.00087 \rightarrow \bar{K}_p^* = 8.44 \rightarrow K_p^* = 0.0281 \quad 7.11$$

E' evidente come il valore del parametro proporzionale, ottenuto in condizione di massima erogazione, risulti notevolmente superiore a quello ottenuto nella condizione di erogazione minima.

7.3.2 Risultati delle simulazioni della rete a portata variabile

I valori del parametro proporzionale, calcolati nei precedenti paragrafi, sono stati adoperati per effettuare le simulazioni idrauliche della rete controllata in tempo reale.

I risultati della regolazione, ottenuta con il valore $K_p^* = 0.0033$ calcolato in condizione di minima erogazione, vengono riportati in Figura 7.9 in termini di carico piezometrico al nodo 22 di controllo e in termini di grado di apertura della valvola al ramo 11. Nella figura è stato anche riportato il carico piezometrico, nelle ventiquattro ore, ottenuto al nodo 22 in assenza di valvole.

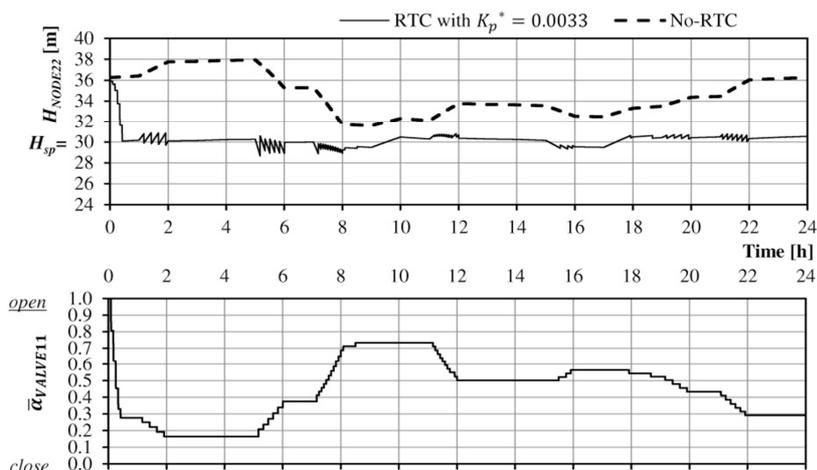


Figura 7.9: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu controllata in tempo reale tramite un'unità logica proporzionale con $K_p^* = 0.0033$ determinato con riferimento alla condizione minima di erogazione

Dalla Figura 7.9 è possibile notare come i risultati ottenuti in termini di regolazione, siano estremamente soddisfacenti in quanto il carico piezometrico al nodo di controllo risulta sempre allineato sul valore di set-point, con uno scostamento mai eccessivamente superiore al valore di sensibilità imposto, escludendo naturalmente la fase di avviamento.

Il sistema di controllo è dunque risultato sufficientemente reattivo da garantire il risultato desiderato, senza però provocare alcuna oscillazione nell'intorno del set-point.

Quelle che possono apparire oscillazioni, nel diagramma del carico piezometrico, sono soltanto le variazioni dovute all'azione della valvola per riportare il sistema nella condizione desiderata, il che è confermato dall'andamento del grado di apertura della valvola.

Nel caso di regolazioni troppo veloci infatti le oscillazioni permanenti verrebbero osservate anche sul diagramma del grado di apertura della valvola, come per altro accade in Figura 7.10, ove si riportano i risultati della simulazione ottenuta con il valore del parametro proporzionale $K_p^* = 0.0281$ determinato nella configurazione di massima erogazione. Tale valore del parametro, al contrario del precedente, restituisce una regolazione assolutamente inaccettabile in tutte gli istanti del controllo, fatta ovviamente eccezione per la fase in cui il sistema si trova in prossimità della configurazione di massima erogazione, ovvero la condizione per cui è stato ottenuto il valore del parametro.

Infine in Figura 7.11 si riportano i risultati della simulazione della rete controllata con il valore del parametro $K_p^* = 0.0025$, calcolato tramite le regole di Ziegler-Nichols.

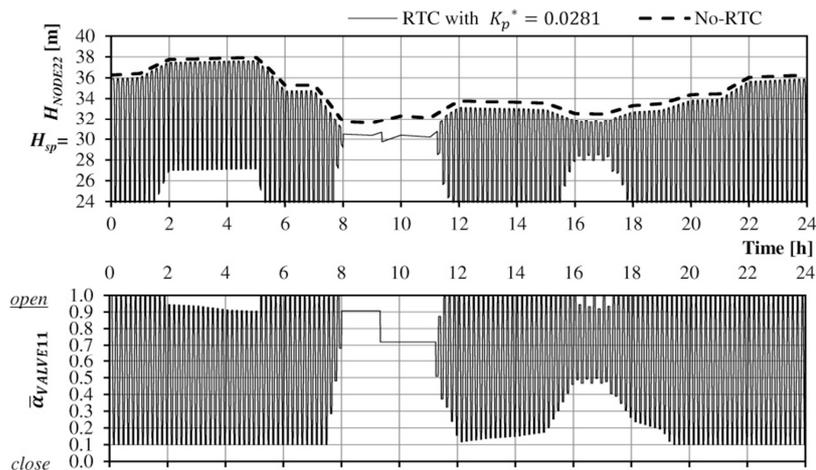


Figura 7.10: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu controllata in tempo reale tramite un'unità logica proporzionale con $K_p^* = 0.0281$ determinato con riferimento alla condizione massima di erogazione

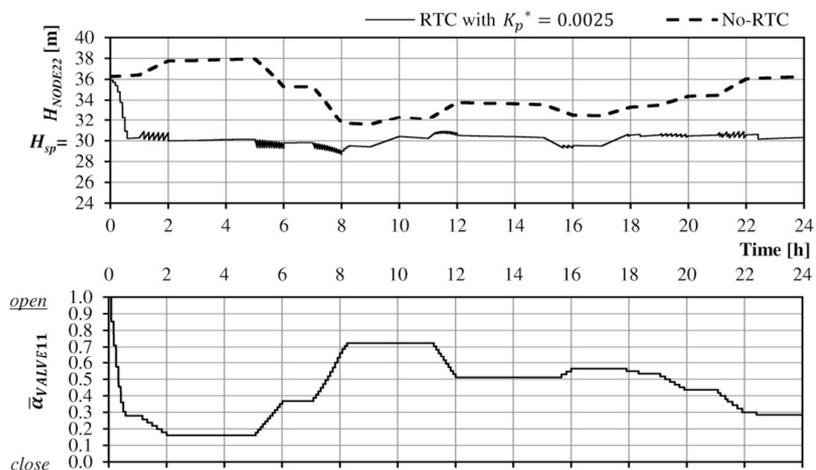


Figura 7.11: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu controllata in tempo reale tramite un'unità logica proporzionale con $K_p^* = 0.0021$ determinato tramite le regole di Ziegler-Nichols

I risultati di Figura 7.11 mostrano una performance del sistema di RTC estremamente soddisfacente; rispetto ai risultati di Figura 7.9, ottenuti con il valore del parametro proporzionale $K_p^* = 0.0033$ calcolato con la strategia numerica in condizione di portata minima, si notano controlli più frequenti e meno repentini.

Entrambe le strategie di calibrazione hanno dunque fornito valori del parametro proporzionale molto affidabili viste le regolazioni ottenute; tuttavia è da notare come mentre per l'applicazione delle regole di Ziegler-Nichols, metodologia basata su una tecnica try&error, è stato necessario effettuare un gran numero di simulazioni del sistema

a portata variabile, al fine di costruire la curva di Figura 7.5, al contrario l'implementazione della strategia numerica, proposta nel capitolo 5, ha richiesto una sola simulazione per determinare la risposta del sistema nell'intorno del set-point in condizione di minima erogazione.

7.3.3 La regolazione di più valvole in rete

Nel caso di più valvole, inserite nella rete di letteratura presa in esame, la calibrazione dei relativi parametri proporzionali è stata effettuata secondo le modalità di cui al §5.2.5; chiaramente la calibrazione è stata operata per la condizione di minima erogazione al fine di non rischiare di ricadere nel campo delle regolazioni con oscillazioni permanenti, così come meglio esposto nel §5.3.3.

In linea con le considerazioni contenute in Pezzinga e Gueli (1999), le valvole sono state posizionate nel ramo 11, nel caso di una sola valvola, nei rami 11 e 1, nel caso di due valvole.

Per la determinazione dei relativi nodi di controllo si è fatto riferimento alle considerazioni contenute in Campisano et al. (2010); è stato dunque imposto il nodo 22, come nodo di controllo della valvola al ramo 11, e il nodo 2 come nodo di controllo della valvola al ramo 1.

In Figura 7.12 viene riportato un riepilogo grafico della rete in esame con le due valvole inserite e i relativi nodi di controllo.

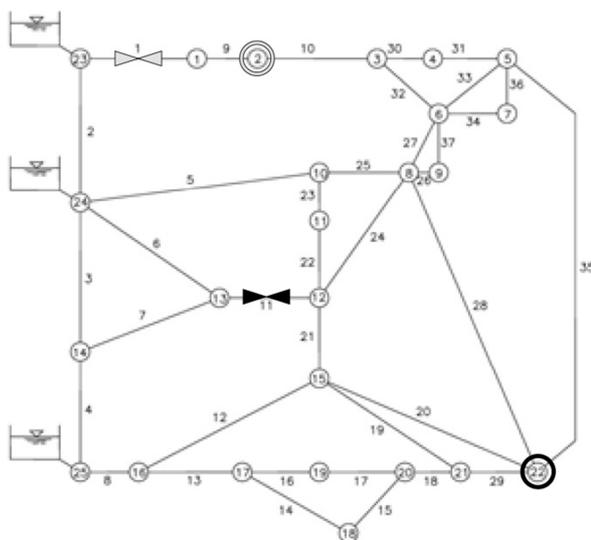


Figura 7.12: Schema della rete idrica adoperata nelle applicazioni (Jowitt and Xu, 1990), con visualizzazione delle valvole inserite e dei relativi nodi di controllo.

Per quanto riguarda la prima valvola in ordine di influenza gerarchica sulla rete, ovvero quella inserita al ramo 11, la relativa curva di risposta del sistema al nodo di controllo 22 è quella riportata in Figura 7.7; come già riportato al §7.3.1, per la sola

valvola posizionata al ramo 11 si ottengono i seguenti valori in termini di grado di apertura di set-point e di parametro proporzionale desiderato:

$$\text{valve 11: } (\bar{\alpha}_{sp})_{VALVE11} = 0.158 \quad (K_p^*)_{VALVE11} = 0.0033$$

La seconda valvola, in ordine di influenza, è quella inserita nel ramo 1, con il nodo 2 come relativo nodo di controllo. La corrispondente curva di risposta del sistema, riportata in Figura 7.13, è stata ottenuta imponendo la presenza della prima valvola nel ramo 11, con un grado di apertura costante pari a quello di set-point. Si chiarisce che, al fine di migliorare il range di regolabilità, sul ramo 1 è stata posizionata una valvola di diametro DN350, ovvero inferiore a quello del ramo stesso. In tali condizioni si è ottenuto:

$$\text{valve 1: } (\bar{\alpha}_{sp})_{VALVE1} = 0.144 \quad (K_p^*)_{VALVE1} = 0.0013$$

In Figura 7.14 vengono riportati i risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt&Xu con due valvole nei rami 11 e 1, in termini di grado di apertura delle valvole e di carico piezometrico ai relativi nodi di controllo.

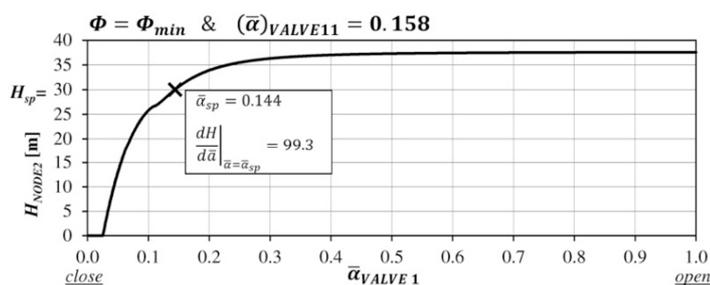


Figura 7.13: Curva di risposta della rete di Jowitt & Xu, in condizione di minima erogazione $\Phi = \Phi_{min}$, in termini di carico piezometrico al nodo di controllo 2 al variare del grado di apertura della valvola al ramo 1, avendo imposto sulla valvola del ramo 11 il grado di apertura costante di set-point $(\bar{\alpha}_{sp})_{VALVE11} = 0.158$

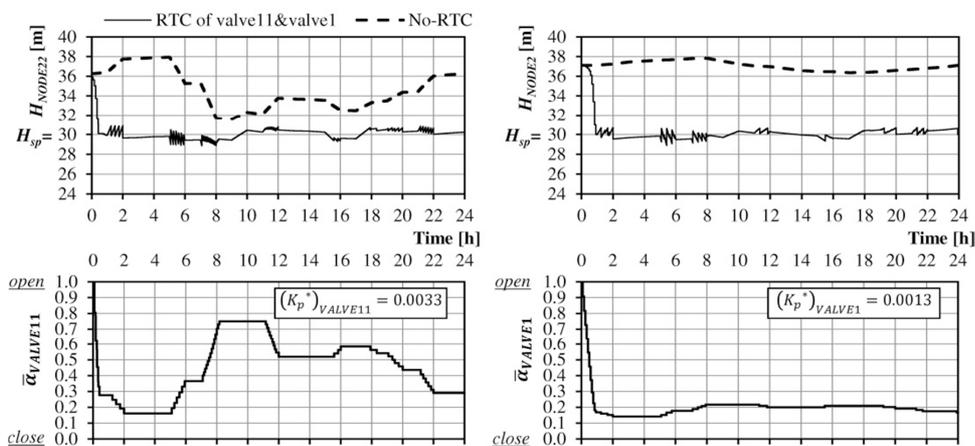


Figura 7.14: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt&Xu controllata in tempo reale mediante due valvole inserite al ramo 11 e al ramo 1.

I risultati della simulazione riportati in Figura 7.14 mostrano come sia la valvola posta al ramo 11 che quella al ramo 1, vengono regolate dal controller proporzionale in modo da garantire ai rispettivi nodi di controllo l'ottenimento del valore di set-point del carico piezometrico in ogni istante della simulazione. Da ciò si può dedurre come i valori dei parametri proporzionali adoperati per entrambe le valvole siano stati scelti correttamente garantendo regolazioni sufficientemente veloci da garantire il risultato desiderato senza innescare fenomeni di oscillazioni permanenti.

Allo scopo di mostrare l'effetto dell'inserimento e del controllo delle valvole di riduzione di pressione nella rete in esame, in Figura 7.15a) sono riportati i valori medi nelle 24 ore dei carichi piezometrici ai nodi della rete in assenza di valvole (*No-RTC*), con l'inserimento di una sola valvola al ramo 11 (*RTC of valve11*) e con l'inserimento di due valvole al ramo 11 e al ramo 1 (*RTC of valve11 & valve1*); in Figura 7.15b) viene inoltre riportata la variazione percentuale del carico piezometrico medio rispetto alla condizione in assenza di valvola.

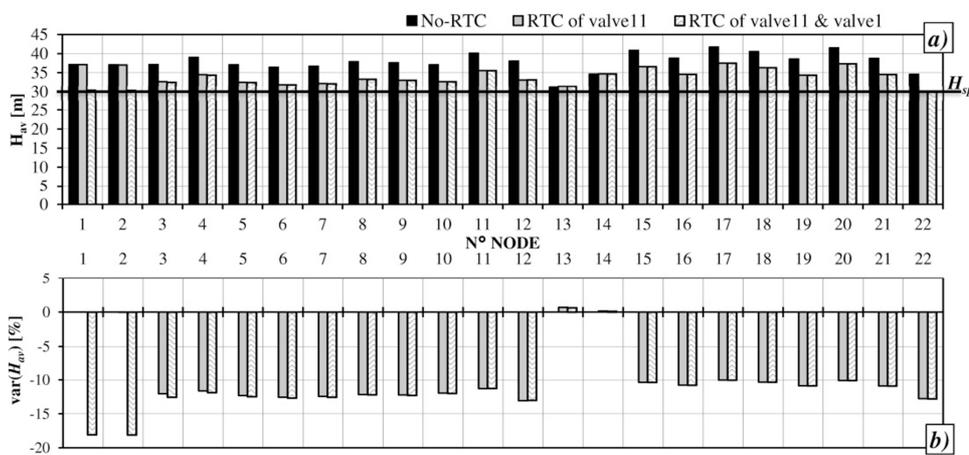


Figura 7.15: a) carico piezometrico medio nelle 24 ore ai nodi della rete di Jowitt&Xu
b) variazione percentuale del carico piezometrico medio rispetto alla condizione in assenza di valvola.

Dalla Figura 7.15 è possibile osservare una notevole riduzione del carico piezometrico sulla maggior parte dei nodi della rete, mediamente pari a circa il 12% del carico in assenza di valvola; tale risultato è dovuto quasi interamente all'inserimento della valvola sul ramo 11. Al contrario gli effetti della valvola inserita sul ramo 1 risultano evidenti solo sui nodi 1 e 2.

Al fine di quantificare i benefici ottenuti in termini di riduzione delle perdite idriche in seguito all'abbattimento delle pressioni in rete, sono state calcolate, per ciascuna simulazione, la portata media giornaliera complessivamente erogata ai nodi ($Q_{EROG.}$), la portata persa dagli impianti ($Q_{LEAK.}$) e quella complessivamente immessa in rete ($Q_{TOT.}$); il confronto dei risultati ottenuti in assenza di valvole, con una valvola o con due, viene riportato in Tabella 7.II.

Tabella 7.II: Valori della portata media giornaliera complessivamente erogata ai nodi ($Q_{EROG.}$), persa dagli impianti ($Q_{LEAK.}$) e immessa in rete (Q_{TOT})

	No-RTC	1 valve	2 valve
$Q_{EROG.}$ [l/s]	150.00	150.00	150.00
$Q_{LEAK.}$ [l/s]	26.44	23.56	22.75
leakage reduction	-	10.90%	3.42%
$Q_{TOT.}$ [l/s]	176.44	173.56	172.75
$Q_{LEAK.}$ [l/s]	14.98%	13.57%	13.17%

I dati mostrano che con l'inserimento della sola valvola nel ramo 11 si ottiene una riduzione delle perdite idriche pari al 10.90% del valore che si avrebbe in assenza di regolazione, mentre inserendo la seconda valvola nel ramo 1 si ottiene un ulteriore 3.42% di riduzione. Può dunque far riflettere come, nel caso specifico, in seguito ad un abbattimento medio dei carichi piezometrici pari a circa il 12% si sia ottenuto una riduzione dei volumi idrici persi in rete del 14.32%.

7.3.4 RTC della rete in differenti condizioni di erogazione

Al fine di testare l'affidabilità del sistema di RTC proposto e della relativa metodologia di calibrazione del parametro proporzionale, è stato simulato il comportamento della rete descritta nel §7.2.1 in condizioni di erogazione differenti da quelle prese in considerazione in Jowitt & Xu, 1990.

A tale scopo sono state prese in considerazione le tre configurazioni base delle portate medie domandate ai nodi riportate in Tabella 7.III. Tali configurazioni sono state generate in maniera casuale secondo una distribuzione normale con coefficiente di variazione pari al 30% e media pari alla configurazione base originale di Tabella 7.I (Campisano et al., 2010), la prima, e pari alla medesima configurazione incrementata e decrementata del 20%, rispettivamente la seconda e la terza.

Tabella 7.III: Configurazioni delle portate medie domandate ai nodi

Node	$(Q_{AV})_{\text{node demand}}$ [l/s]			
	Q_{JX}	Q_{random} (0-24 h)	$Q_{\text{random}+20\%}$ (25-48 h)	$Q_{\text{random}-20\%}$ (49-72 h)
1	5	2.1	4.6	3.9
2	10	16.4	8.7	6.7
3	0	0	0	0
4	5	6.2	5.1	3.8
5	30	37.0	35.4	6.2
6	10	15.4	11.7	10.0
7	0	0	0	0
8	20	20.4	24.3	12.9
9	0	0	0	0
10	5	2.4	5.6	2.8
11	10	13.3	13.3	7.2
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	5	2.3	6.1	3.8
15	20	16.0	23.9	24.2
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	5	3.2	5.1	5.4
19	5	7.5	3.3	3.2
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	20	7.8	28.4	26.1
TOT	150.0	150.0	175.5	116.2

Il comportamento idraulico della rete è stato esaminato facendo un'unica simulazione di 72 ore; con riferimento alla Tabella 7.III, nell'intervallo temporale 0-24 ore è stata imposta la configurazione Q_{random} delle portate medie erogate ai nodi, nell'intervallo 25-48 ore la configurazione $Q_{\text{random}+20\%}$, e infine nell'intervallo 49-72 ore la configurazione $Q_{\text{random}-20\%}$.

La simulazione è stata condotta avendo imposto l'inserimento di due valvole rispettivamente sui rami 11 e 1 e, secondo le modalità già messe in evidenza nel

paragrafo precedente, sono stati impostati i rispettivi valori dei parametri proporzionali $(K_p^*)_{VALVE11} = 0.0033$ e $(K_p^*)_{VALVE1} = 0.0013$.

In Figura 7.16 vengono mostrati i risultati della simulazione in termini di andamento nelle 72 ore del carico piezometrico ai nodi di controllo e di grado di apertura delle valvole; in particolare viene riportato anche il carico piezometrico ottenuto in assenza di valvole.

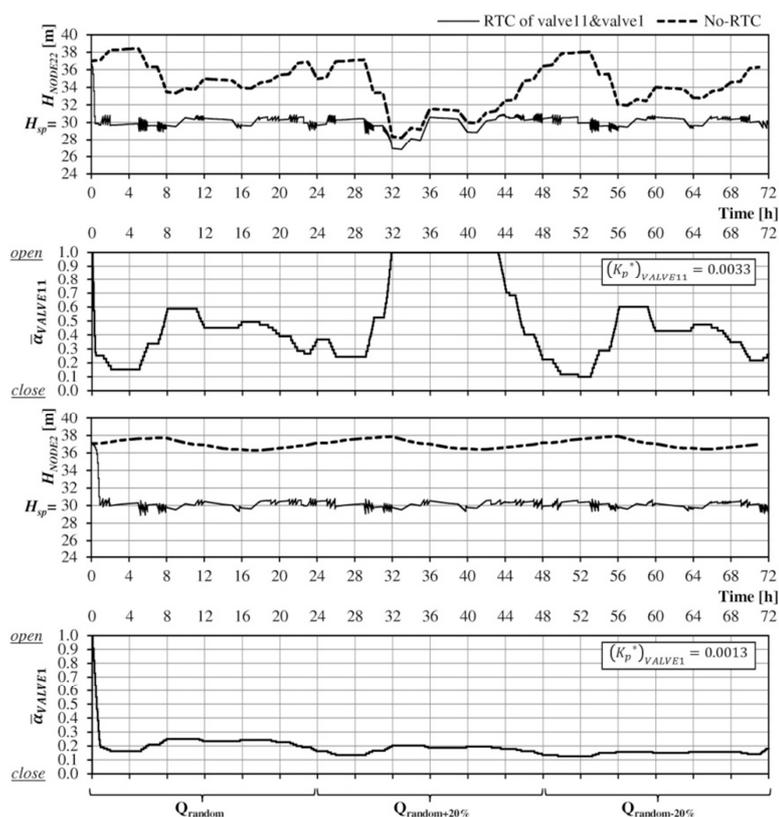


Figura 7.16: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu, nella condizione di erogazione di Tabella 7.III, controllata in tempo reale tramite due valvole inserite nei rami 11 e 1.

Dalla Figura 7.16 è possibile notare come le regolazioni ottenute garantiscano in quasi tutti gli istanti di simulazione il raggiungimento del carico desiderato di set-point; fa eccezione al nodo 22 la condizione osservata tra la trentaduesima e la trentaseiesima ora ove il carico piezometrico risulta notevolmente inferiore al carico desiderato nonostante la valvola in quegli istanti risulti del tutto aperta. Tale comportamento non è chiaramente imputabile al controllo delle valvole ma alle condizioni di erogazione della rete eccessivamente estreme. La dimostrazione di ciò sta nel fatto che nell'arco temporale in esame si può osservare come anche in assenza di valvola il carico piezometrico risulterebbe inferiore a quello desiderato; la condizione viene aggravata, in maniera

modesta, dalla presenza della valvola la quale provoca perdite di carico concentrate anche in condizione di totale apertura.

Anche per questa simulazione in Figura 7.17a) vengono riportati i valori medi, nelle 72 ore, del carico piezometrico ai nodi rispettivamente nelle condizioni di assenza di valvole (*NO-RTC*), con una valvola inserita al ramo 11 (*RTC of valve11*) e con due valvole inserite ai rami 11 e 1 (*RTC of valve11 & valve1*); in Figura 7.17b) vengono inoltre riportate le variazioni percentuali dei carichi piezometrici ai nodi ottenute grazie all'inserimento delle valvole.

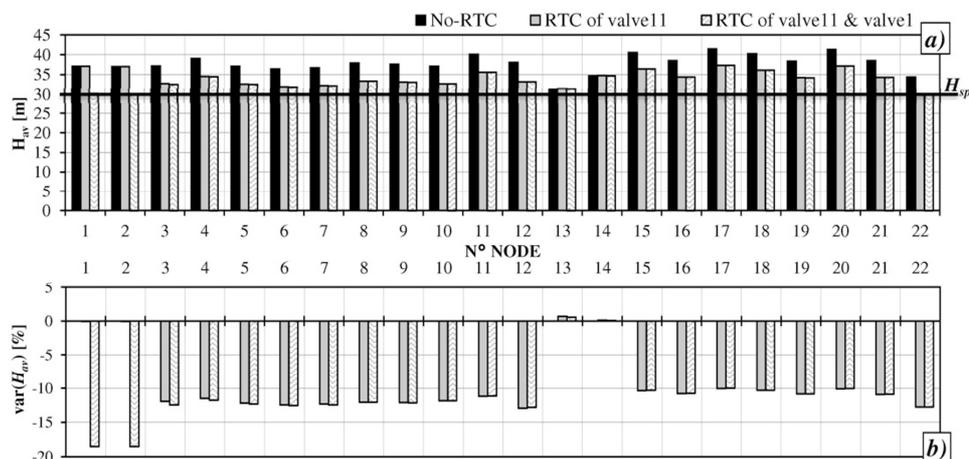


Figura 7.17: a) carico piezometrico medio nelle 24 ore ai nodi della rete di Jowitt&Xu nella condizione di erogazione di Tabella 7.III b) variazione percentuale del carico piezometrico medio rispetto alla condizione in assenza di valvola.

Infine in Tabella 7.IV viene riportato il confronto tra le tre condizioni di regolazione della portata media complessivamente erogata ai nodi ($Q_{EROG.}$) persa dagli impianti ($Q_{LEAK.}$) e immessa in rete ($Q_{TOT.}$).

I risultati ottenuti dalle simulazioni della rete in condizione di erogazioni non previste mostrano un comportamento molto simile a quello osservabile in condizione di normale erogazione; tale circostanza mostra le ottime doti di adattabilità del sistema di controllo in tempo reale adottato, ovvero l'unità logica proporzionale, nonché l'adeguatezza dei valori scelti per il relativo parametro di controllo anche in condizioni differenti da quelle imposte nella fase di calibrazione.

Tabella 7.IV: Valori della portata media giornaliera complessivamente erogata ai nodi ($Q_{EROG.}$), persa dagli impianti ($Q_{LEAK.}$) e immessa in rete ($Q_{TOT.}$), nella condizione di erogazione di Tabella 7.III

	No-RTC	1 valve	2 valve
$Q_{EROG.}$ [l/s]	147.25	147.25	147.25
$Q_{LEAK.}$ [l/s]	26.37	23.52	22.77
leakage reduction	-	10.83%	3.16%
$Q_{TOT.}$ [l/s]	173.62	170.76	170.02
$Q_{LEAK.}$ [l/s]	15.19%	13.77%	13.40%

7.4 Applicazione della procedura di auto-calibrazione “analitica”

7.4.1 Implementazione della procedura “analitica”

La metodologia, proposta nel capitolo 6, per la calibrazione del parametro proporzionale per il RTC delle valvole di riduzione di pressione nelle reti di acquedotto, è stata applicata alla rete di Jowitt & Xu, adoperando le caratteristiche e le grandezze riportate al §7.2.1.

Nelle simulazioni, come valore iniziale del parametro proporzionale, è stato imposto 0.01; il valore iniziale non ha alcuna influenza sul calcolo dei successivi valori del parametro proporzionale e dunque tale scelta non risulta rilevante nella validazione della metodologia proposta.

In particolare la procedura di calibrazione “analitica” è stata implementata nella forma auto-adattativa, così come meglio esposto nel §6.3.3; tale procedura prevede il calcolo del parametro proporzionale, secondo la relazione 6.19, ogni qual volta l’andamento temporale del carico piezometrico al nodo di controllo interseca il valore di set-point.

I risultati della simulazione vengono riportati in Figura 7.18 in termini di andamento temporale del carico piezometrico al nodo di controllo e di grado di apertura della valvola.

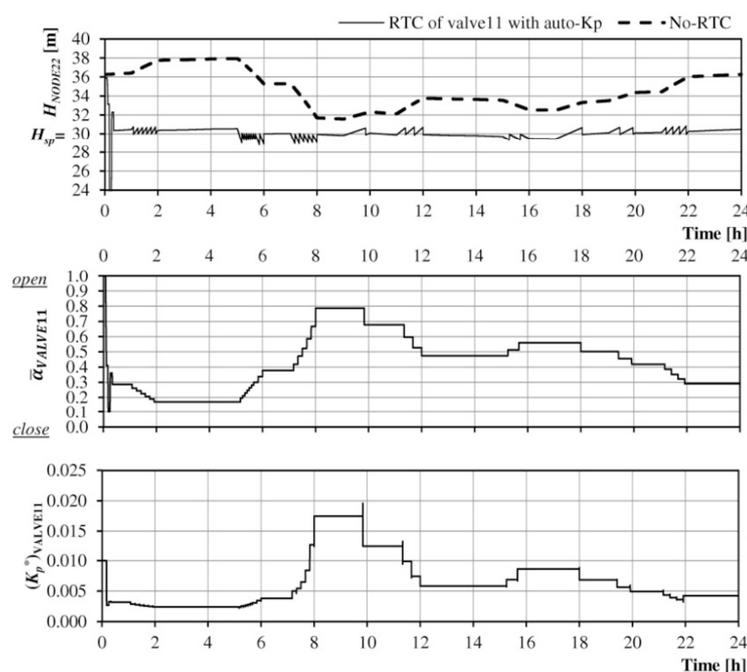


Figura 7.18: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu con valvola sul ramo 11 in RTC con parametro proporzionale auto-adattativo

Dai risultati di Figura 7.18 si può osservare come il sistema di auto-calibrazione risulti estremamente dinamico in tutte le fasi della simulazione; l'andamento dei valori del parametro proporzionale, calcolati dall'algoritmo di auto-calibrazione, segue perfettamente quello del grado di chiusura della valvola, determinando dunque regolazioni più impulsive quando la valvola è maggiormente aperta e regolazioni più prudenti quando la valvola è maggiormente chiusa. Questo risultato è fortemente gradito, nonché atteso, vista la curva di perdita di carico della valvola adoperata (Figura 7.4); la curva della valvola presenta infatti una pendenza fortemente decrescente all'aumentare del grado di apertura della valvola.

La regolazione così ottenuta, in termini di grado di apertura della valvola, risulta molto più decisa, rispetto alle regolazioni ottenute con parametro proporzionale costante, in particolare nelle condizioni di massima erogazione della rete, senza che ciò abbia comportato, in nessuna fase della regolazione, la minima insorgenza di oscillazioni. Ovviamente fanno eccezione gli istanti iniziali della simulazione visto il valore casuale scelto per il valore iniziale del parametro. In effetti si può osservare qualche sporadico errore nella determinazione del valore del parametro proporzionale, che viene però compensato all'istante successivo grazie alla complessiva dinamicità del sistema.

Si può inoltre osservare come i valori del parametro proporzionale, ottenuti tramite il sistema di calibrazione analitico, nella condizione di minima erogazione risultino molto simili al valore ottenuto tramite il metodo di calibrazione "numerico", anche se lievemente inferiori; tale circostanza conferma la validità di entrambe le procedure, vista anche l'efficacia delle regolazioni rispettivamente ottenute.

7.4.2 La procedura "analitica" nel caso di più valvole in rete

La procedura analitica di auto-calibrazione è stata adoperata anche nel caso di inserimento di due valvole di regolazione in rete; in Figura 7.19 si riportano i risultati della simulazione idraulica della rete ove sono state inserite due valvole di regolazione ai rami 11 e 1, essendo i nodi 22 e 2 i rispettivi nodi di controllo, utilizzando la procedura semi-rigida di auto-calibrazione dei relativi parametri proporzionali.

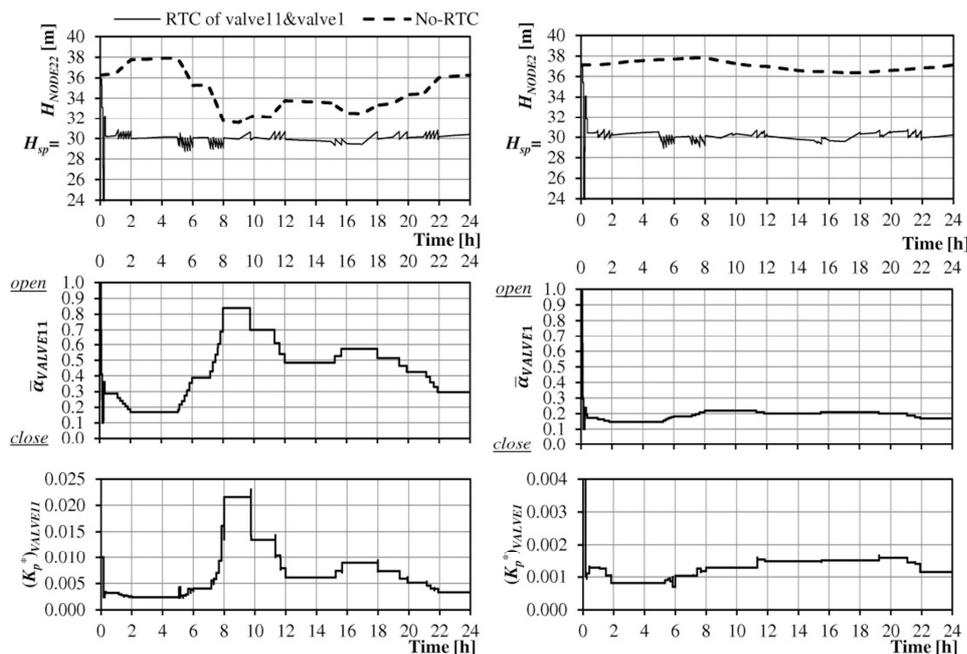


Figura 7.19: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu con due valvole sul ramo 11 e sul ramo 1 in RTC con parametro proporzionale auto-adattativo

Dalla Figura 7.19 è possibile confermare come con l’inserimento di due valvole in rete la procedura analitica di auto-calibrazione restituisca valori del parametro proporzionale estremamente efficaci; anche in questo caso l’andamento dei valori dei parametri segue pedissequamente l’andamento del grado di apertura delle due valvole. Inoltre l’efficienza, in termini di raggiungimento e mantenimento del carico piezometrico desiderato, risulta estremamente soddisfacente. Chiaramente, per quanto attiene la valvola al ramo 1, essendo modesta la variazione del grado di apertura, risulta modesta anche la variazione del parametro proporzionale; tuttavia è visibile una notevole dinamicità e precisione di calcolo del sistema.

Infine in Figura 7.20 vengono riportati i risultati della simulazione della rete, nella condizione di erogazione di Tabella 7.III, così come definite nel §7.3.4, con le due valvole inserite ai rami 11 e 1 in RTC con sistema di auto-calibrazione analitica del parametro proporzionale.

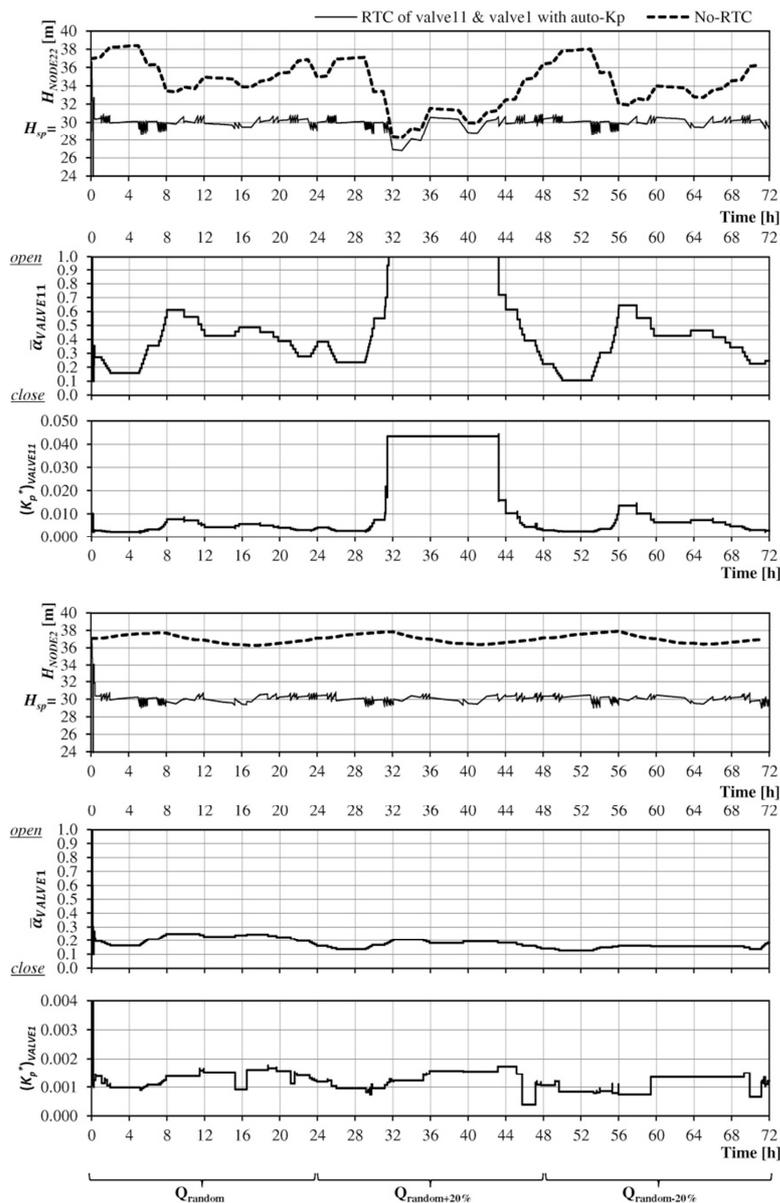


Figura 7.20: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu, nella condizione di erogazioni di Tabella 7.III, controllata in tempo reale tramite due valvole inserite nei rami 11 e 1 in RTC con parametro proporzionale auto-adattativo

I risultati di Figura 7.20, in termini di efficacia nel raggiungimento del carico piezometrico desiderato ai nodi di controllo, risultano molto soddisfacenti e simili a quelli di Figura 7.16, ottenuti avendo imposto valori costanti del parametro proporzionale calcolati tramite la strategia numerica.

Si può osservare come, ancora una volta, i valori auto-determinati del parametro proporzionale hanno il medesimo andamento del grado di apertura delle valvole; tale risultato conferma la bontà di stima del sistema di auto-calibrazione.

Per la valvola al ramo 1 non si osservano grandi variazioni dei valori auto-determinati del parametro proporzionale, in quanto il range di regolazione del grado di apertura risulta molto modesto nell'arco della simulazione.

Il sistema analitico di auto-calibrazione dimostra ottimi livelli di dinamicità e precisione il che può aumentare, nei sistemi di RTC controllati tramite unità logiche proporzionali, le doti di flessibilità nella regolazione di sistemi idrici con forti variazioni delle condizioni di erogazione.

7.5 Gli effetti sul RTC del “rumore” nei segnali di pressione

Nelle reti idriche reali i segnali delle misure di pressione sono spesso caratterizzati dalla presenza di micro-oscillazioni, o rumore di misura, del valore rilevato nel tempo.

Le cause di tale fenomeno possono essere ricercate negli errori di misurazione e nei micro-fenomeni di moto vario che normalmente accadono nelle reti di distribuzione.

Normalmente, nelle simulazioni idrauliche, non si tiene conto di tali fenomeni in quanto vengono ritenuti trascurabili.

Tuttavia, visto che le strategie di controllo in tempo reale delle valvole di regolazione, sin qui esaminate, sono basate sull'utilizzo delle misure di pressione, è possibile che i rumori nelle misure di pressione possa inficiare i livelli di performance della regolazione ottenuta.

Per verificare tale circostanza sono state condotte delle apposite simulazioni preliminari.

Al fine di esaminare gli effetti del rumore delle misure di pressione sul RTC delle valvole di regolazione, è stato simulato il comportamento dei misuratori imponendo che nella modellazione idraulica il valore del carico piezometrico ai nodi di controllo $(H_{control\ node})_{MODEL}$, prima di essere preso alla base del calcolo del grado di apertura per l'istante temporale successivo, venisse “sporcato” utilizzando la semplice relazione:

$$(H_{control\ node})_{RUMORS} = (H_{control\ node})_{MODEL} \cdot (1 + C_{NORM2\%})$$

dove $C_{NORM2\%}$ è un numero casuale con distribuzione di probabilità normale a media 0 e deviazione standard del 2%; in Figura 7.21 si riporta un esempio di rumore nella “misura” del carico piezometrico ad un generico nodo di controllo.

In Figura 7.22 vengono riportati i risultati della simulazione della rete di Jowitt & Xu con una valvola, inserita nel ramo 11, in RTC con parametro proporzionale pari a $(K_p^*)_{VALVE11} = 0.0033$ e rumore nelle misure di pressione.

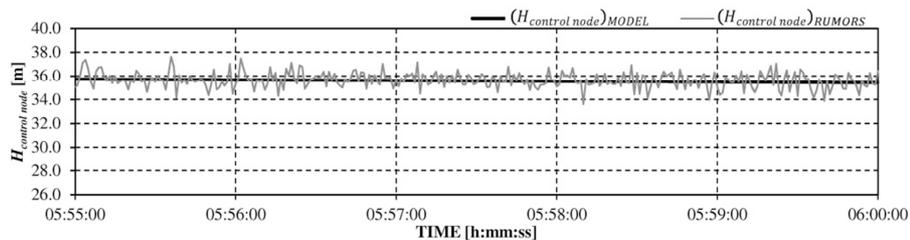


Figura 7.21: esempio di andamento del carico piezometrico affetto da “rumore” di misura.

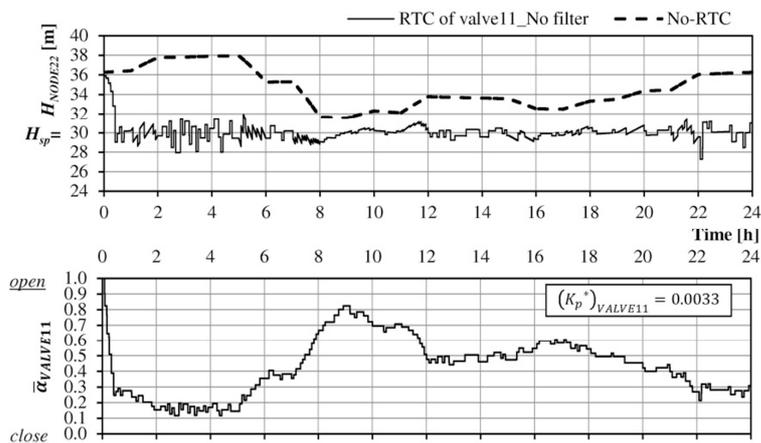


Figura 7.22: risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu in RTC con misure di pressione al nodo di controllo affette da rumore

Dalla Figura 7.22 è possibile osservare come il rumore nelle “misure” di pressione provochi un peggioramento nell’efficienza del controllo della valvola al ramo 11 e di conseguenza un complessivo aumento dello scostamento del carico piezometrico dalla condizione desiderata di set-point.

Per evitare tale peggioramento nelle prestazioni del sistema di RTC, è possibile adoperare delle tecniche di filtrazione del segnale, ovvero una “pulizia” dell’andamento temporale dei valori del carico piezometrico al nodo di controllo prima che questi vengano utilizzati dal sistema di RTC. A tale scopo è stato banalmente adoperato il metodo dei minimi quadrati allo scopo di operare una regressione dell’andamento del carico piezometrico misurato al nodo di controllo negli ultimi 5 minuti prima del controllo, al fine di ottenere un valore mediato dai rumori.

I risultati della simulazione della rete in RTC, con rumore nelle misure di pressione e filtraggio prima del controllo, vengono riportati in Figura 7.23.

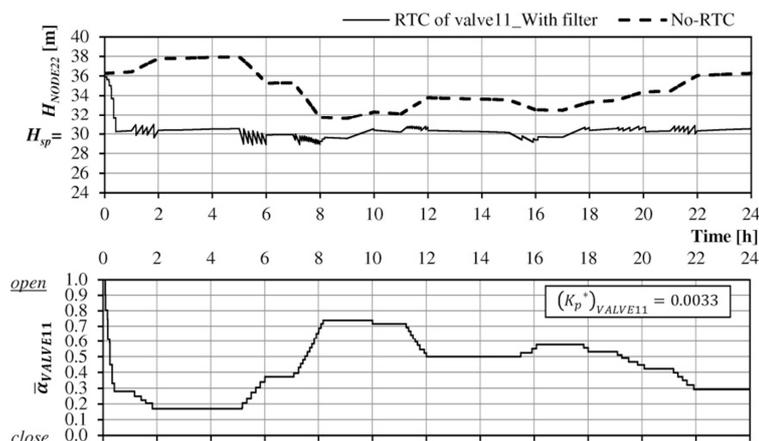


Figura 7.23: risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu in RTC con misure di pressione al nodo di controllo affette da rumore e filtrate

Il risultati di Figura 7.23 mostrano come la filtrazione abbia restituito risultati estremamente soddisfacenti in termini di regolazione; il carico piezometrico al nodo di controllo risulta nell'intorno del set-point per tutta la durata della simulazione e l'andamento del grado di apertura della valvola non presenta alcuna sovra-elongazione né oscillazione.

Si può concludere che una semplice fase di filtrazione, tra la misurazione del carico piezometrico e il calcolo del grado di apertura all'istante successivo, è sufficiente per eliminare le imprecisioni del RTC delle valvole dovute al rumore nelle misure del carico piezometrico ai nodi di controllo. Anche la sensibilità del sistema di controllo, se appositamente determinata, può risultare un ottimo strumento per il contenimento degli effetti del rumore nelle misure di pressione.

E' bene precisare che quelle riportate nel presente paragrafo sono da considerarsi delle simulazioni preliminari.

Al fine di meglio comprendere il problema in esame, potrebbero essere effettuate apposite simulazioni della rete con modelli in moto vario.

Sembrerebbe inoltre opportuno effettuare specifiche analisi di campo per comprendere la reale entità del fenomeno, in termini di ampiezza e frequenza, al fine di mettere a punto idonei filtri, da adoperare per le misure, prima di effettuare il controllo.

7.6 Confronto tra gli effetti di un'idro-valvola stabilizzatrice della pressione di valle e una in RTC

Come riportato nei capitoli precedenti, oltre alle valvole di riduzione di pressione controllate in tempo reale, esistono in commercio delle idrovalvole che consentono di imporre, a valle del punto in cui sono inserite, un valore di pressione desiderato; tale risultato viene ottenuto tramite sistemi idraulici che regolano il grado di apertura della valvola in funzione della pressione rilevata a monte e a valle del punto di inserimento.

Da un punto di vista modellistico la sola differenza tra le due soluzioni di controllo consiste nel fatto che con l'RTC è possibile scegliere un qualunque nodo della rete su cui operare il controllo, mentre con le idro-valvole stabilizzatrici di pressione è necessario scegliere il punto di inserimento della valvola stessa come punto di controllo della rete.

Quest'aspetto determina una forte differenza nelle condizioni di regolazione della pressione media di esercizio in rete; come viene rappresentato schematicamente infatti in Figura 7.24a, il valore della pressione da imporre a valle dell'idro-valvola (H_{valle}) deve essere determinato in modo da garantire che nella condizione di massima erogazione (Q_{max}) il cielo piezometrico in rete rispetti i vincoli in termini di pressione minima di esercizio (H_{sp}). Ciò comporta che la rete subisce gli eccessi di pressione dovuti alla variazione del cielo piezometrico tra la condizione di massima (Q_{max}) e quella di minima (Q_{min}) erogazione.

Al contrario, come si può intuire dalla Figura 7.24b, usando la valvola in RTC, i vincoli, in termini di pressione minima di esercizio, vengono fissati direttamente al nodo di controllo della rete, scelto appositamente come il nodo con minore pressione (ovvero alla quota più elevata); di conseguenza, in tale condizione, la valvola compensa maggiormente le oscillazioni del cielo piezometrico, avendo l'effetto di farlo "ruotare" attorno al punto vincolato della rete, con una conseguente riduzione della pressione media di esercizio della rete.

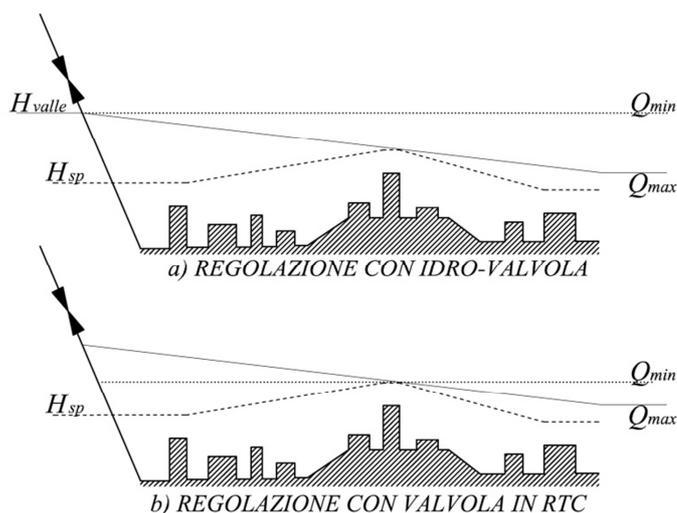


Figura 7.24: immagine esplicativa delle differenze, in termini di regolazione del cielo piezometrico, tra i risultati ottenibili tramite a) un'idrovalvola di stabilizzazione della pressione di valle e b) una valvola regolata in RTC

Per dimostrare quanto finora detto, è stato simulato il comportamento della rete di Jowitt & Xu avendo inserito al ramo 11 una idro-valvola stabilizzatrice di pressione.

Il primo elemento da valutare, per l'utilizzo di una idro-valvola, è il carico piezometrico che si desidera imporre a valle dell'idro-valvola stessa; tale quantità deve essere valutata in modo da garantire, in tutti gli altri nodi della rete, il rispetto dei vincoli sulle pressioni minime di esercizio. Per la rete di letteratura in esame, al fine di rispettare

le condizioni minime di pressione di esercizio, l'idro-valvola inserita nel ramo 11 deve avere un carico imposto a valle pari a $H_{valle}=35m$.

In Figura 7.25 vengono riportati i risultati della simulazione della rete di Jowitt & Xu con idro-valvola inserita nel ramo 11 e carico imposto pari a 35m; i risultati vengono mostrati in termini di grado di apertura dell'idro-valvola e di carico piezometrico al nodo 22. Tale scelta è dovuta al fatto che il nodo 22 risulta essere il nodo con le pressioni di esercizio minori della rete. Inoltre in Figura 7.26 viene riportato il confronto tra i valori medi, dei carichi piezometri ai nodi, ottenuti in assenza di regolazione (No-RTC), con la valvola al ramo 11 controllata in tempo reale con $K_p^*=0.0033$ (RTC valvola11) e con l'idro-valvola con carico di valle a 35m (Idro-valvola11 $H_{VALLE}=35m$). In più in Tabella 7.V viene riportato il confronto, in termini di portate medie complessivamente erogate ai nodi ($Q_{EROG.}$), perse ($Q_{PERD.}$) e immesse in rete ($Q_{TOT.}$), delle tre condizioni di regolazione, mettendo in evidenza la riduzione percentuale di perdite rispetto alla condizione di assenza di regolazione, nonché la quota di volumi persi rispetto a quelli complessivamente immessi in rete.

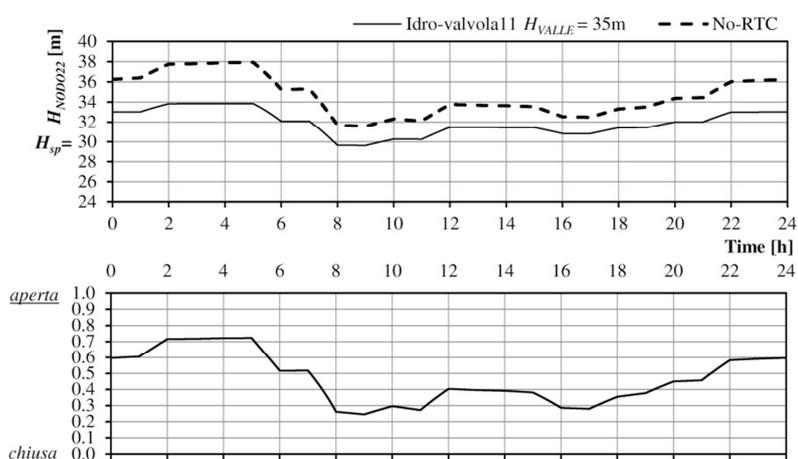


Figura 7.25: Risultati della simulazione della rete di Jowitt & Xu con un'idro-valvola inserita al ramo 11 con carico imposto a valle della stessa pari a 35 m, in termini di carico piezometrico al nodo 22 e di grado di apertura dell'idro-valvola

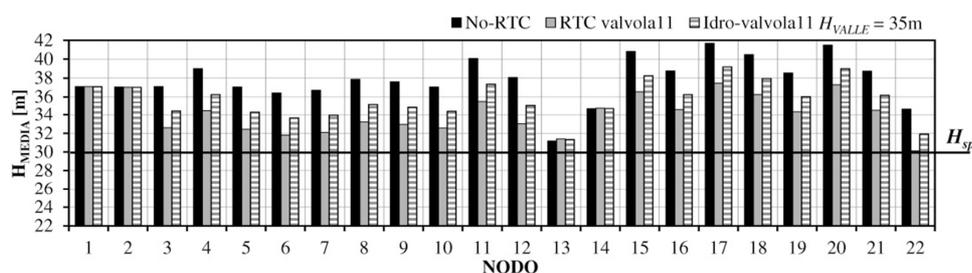


Figura 7.26: Confronto dei valori medi nelle 24 ore dei carichi piezometrici ai nodi della rete di Jowitt & Xu nella condizione di assenza di regolazione (No-RTC), con una valvola al ramo 11 in RTC con nodo di controllo 22 (RTC of valve11) e con idro-valvola con carico di valle $H_{VALLE}=35 m$.

Tabella 7.V: Valori della portata media giornaliera erogata ai nodi ($Q_{EROG.}$), persa dagli impianti ($Q_{PERD.}$) e immessa in rete ($Q_{TOT.}$), in tre differenti condizioni di regolazione.

	No-RTC	RTC valvola11	Idro-valvola11 $H_{VALLE}=35m$
$Q_{EROG.}$ [l/s]	150	150	150
$Q_{PERD.}$ [l/s]	26.44	23.53	24.69
Riduzione perdite	-	-11.00%	-6.62%
$Q_{TOT.}$ [l/s]	176.44	173.53	174.69
% perdite	14.98%	13.56%	14.13%

Dai risultati ottenuti è possibile dedurre come, nel caso di inserimento al ramo 11 di un'idro-valvola, avendo imposto un carico di valle della stessa pari a 35 metri, è stata garantita al nodo 22 la condizione in termini di carico piezometrico minimo, come si può osservare in Figura 7.25; ciò però ha provocato un aumento complessivo dei carichi medi nelle 24 ore su tutti i nodi della rete, rispetto alla condizione in cui la regolazione della valvola al ramo 11 viene effettuata in RTC direttamente sul nodo 22 (vedi Figura 7.26). Le conseguenze in termini di riduzione delle perdite sono dunque chiare dalla Tabella 7.V: mentre con l'inserimento dell'idro-valvola si ottiene una riduzione delle perdite del 6.62%, l'RTC della valvola inserita nel medesimo ramo 11 ma in RTC direttamente sul nodo 22 garantisce una riduzione dell'11.00%.

Per concludere nel presente paragrafo è stato mostrato come l'inserimento di un'idro-valvola implica la stabilizzazione del carico piezometrico a valle della stessa e necessita di simulazioni preliminari per l'identificazione del carico da imporre al fine di evitare che negli altri nodi della rete il carico piezometrico non scenda al di sotto del carico desiderato, nella condizione di massima erogazione; ciò comporta che, in tutte le altre condizioni di erogazione, il carico piezometrico dei nodi a valle della valvola risultano superiori a quello desiderato.

Al contrario con l'RTC la valvola può essere regolata sulla base di misure della pressione effettuate su qualunque nodo della rete, garantendovi l'ottenimento del carico desiderato in tutte le condizioni di erogazione; effettuando correttamente la scelta del nodo di controllo, così come proposto in Campisano et al., 2010, vengono dunque garantiti i carichi minimi su tutti i nodi della rete, ottimizzandone implicitamente la riduzione delle pressioni e massimizzando, di conseguenza, la riduzione delle perdite idriche.

Capitolo 8

Conclusioni

Le perdite idriche costituiscono uno dei principali problemi da affrontare per una corretta e sostenibile gestione dei sistemi acquedottistici.

Per far fronte a tale problema, tradizionalmente si è fatto riferimento a campagne di ricerca e riparazione delle rotture degli impianti che, seppur necessarie, risultano estremamente costose e di lunga e complessa attuazione; inoltre tali tecniche hanno scarsa efficacia sul contenimento delle perdite di sottofondo che, pur essendo caratterizzate da modesta entità se considerate singolarmente, hanno un grande impatto a causa della larga diffusione in rete.

Una decisa riduzione delle perdite idriche può essere ottenuta, in maniera efficace ed economica, affiancando, ai sistemi tradizionali, l'implementazione di tecniche di contenimento delle pressioni di esercizio nelle reti di acquedotto. Sfruttando dunque il legame diretto tra perdite idriche e pressioni di esercizio, tramite interventi localizzati, è possibile ottenere una riduzione diffusa delle perdite idriche, sia con riferimento alle perdite per rottura che alle perdite di sottofondo; inoltre una complessiva riduzione delle pressioni di esercizio genera un minore livello di sollecitazione degli impianti e, conseguentemente, una minore probabilità di accadimento delle rotture.

Il contenimento delle pressioni di esercizio può essere dunque ottenuto mediante l'installazione di apposite valvole di regolazione che consentono di provocare, in idonei punti della rete, perdite di carico concentrate tali da ridurre gli esuberi di pressione nel sistema.

Per ottenere risultati ottimali in termini di riduzione delle perdite, le valvole di regolazione devono essere opportunamente posizionate e tarate all'interno della rete di distribuzione; a tale scopo è possibile utilizzare vari metodi di ottimizzazione che, sulla base di risultati di modelli di simulazione idraulica, determinano la posizione e la taratura delle valvole di regolazione al fine di minimizzare una funzione obiettivo, spesso rappresentata dalle perdite idriche complessive in rete.

L'utilizzo di metodi di ottimizzazione presuppone la conoscenza delle condizioni di erogazione del sistema; tale ipotesi non è però verificata per i sistemi idrici reali. E' noto infatti come nelle reti reali di acquedotto, il cielo piezometrico subisca forti oscillazioni nel tempo, in funzione delle variazioni delle portate domandate dalle utenze e dei livelli idrici nei serbatoi. Tali variazioni risultano difficilmente prevedibili a priori, quantomeno per gli scopi in esame.

L'adozione di tecniche di controllo in tempo reale consente di regolare le valvole, in maniera automatica e continua, sulla base di sole misure di pressione effettuate in particolari nodi di controllo della rete; in tal modo è possibile mantenere le quote del cielo piezometrico entro i valori desiderati, nonostante le variazioni delle condizioni di erogazione della rete.

L'identificazione dei nodi di controllo deve essere operata verificando che il nodo scelto sia sufficientemente sensibile alle regolazioni sulla valvola e che il raggiungimento della condizione desiderata garantisca il rispetto dei vincoli, in termini di carichi minimi di servizio, su tutti gli altri nodi della rete.

Nell'implementazione di un sistema di controllo in tempo reale è necessario definire la logica con cui operare il controllo; in tal senso le unità logiche di controllo proporzionali (P) si distinguono per l'affidabilità e la semplicità d'uso. Tali unità definiscono la correzione, da imporre nella regolazione della valvola, sulla base dello scostamento della pressione rilevata al nodo di controllo rispetto al valore desiderato, secondo un coefficiente di proporzionalità.

Al fine di ottenere regolazioni efficaci della valvola tramite l'unità logica proporzionale, è necessario calibrare con cura il valore del coefficiente di proporzionalità, in funzione delle caratteristiche del processo che si intende controllare.

Sono state dunque proposte due strategie di calibrazione.

La prima strategia si basa su un'indagine numerica condotta facendo riferimento a un sistema idrico elementare fornito di una valvola di regolazione che, da una condizione iniziale di completa apertura, tramite successivi movimenti dell'otturatore determinati dall'unità proporzionale, mira a provocare perdite di carico concentrate tali da condurre gradualmente, il carico piezometrico nel nodo di erogazione di valle, al prescelto valore di *set-point*.

Per la generalizzazione dei risultati, si è utilizzato un approccio adimensionale, considerando campi delle grandezze adimensionali utili per le pratiche applicazioni. I risultati dell'indagine hanno consentito di determinare una legge di regressione per la determinazione, in condizioni di portata erogata costante, dei valori del parametro proporzionale in funzione delle grandezze adimensionali che descrivono le caratteristiche geometriche e idrauliche del sistema esaminato.

Dalle analisi effettuate, si è riscontrato come il valore ottimale del parametro proporzionale, risulti fortemente dipendente dalle condizioni di erogazione del sistema; è stato mostrato come, nel caso di portate erogate variabili, al fine di determinare un unico valore del parametro proporzionale, da adottare per tutta la durata della regolazione, sia necessario, nell'applicazione della relazione di regressione, far riferimento alla condizione di erogazione minima della rete di distribuzione.

E' stata inoltre proposta una semplice procedura che consente di estendere i risultati ottenuti alle reti di distribuzione reali; in tal modo la legge di regressione può essere utilizzata nelle pratiche applicazioni.

La seconda strategia si basa invece su considerazioni di carattere fisico-analitico; tale approccio ha consentito di mettere a punto una semplice relazione che consente il calcolo diretto del valore del parametro proporzionale, in funzione della risposta del sistema di distribuzione reale all'azione della valvola.

La semplicità d'uso di tale relazione ha consentito l'implementazione di un sistema di calibrazione auto-adattivo del parametro. In tal modo il sistema di controllo viene calibrato in continuo, durante la regolazione, in funzione delle condizioni di funzionamento della rete, aumentando così i livelli di performance del controllo effettuato.

Le due strategie di calibrazione sono state applicate ad una rete ben nota in letteratura e, per le elaborazioni, è stato utilizzato un modello di simulazione idraulica di reti di condotte in pressione in moto permanente, appositamente adattato per tenere conto degli effetti del controllo in tempo reale delle valvole di riduzione di pressione.

Dai risultati delle elaborazioni è stato possibile dedurre come, entrambe le metodologie di calibrazione, restituiscano valori del parametro che consentono di ottenere regolazioni estremamente efficaci, in termini di raggiungimento e mantenimento della pressione desiderata ai nodi di controllo della rete. I risultati mostrano infatti come la pressione venga mantenuta, al variare delle condizioni di erogazione della rete, nell'intorno del valore desiderato ed in particolare sempre entro il range di sensibilità imposto per la regolazione.

Al fine di testare l'affidabilità del sistema di controllo in tempo reale e delle strategie di calibrazione proposte, è stato simulato il comportamento della rete di letteratura in condizioni di erogazione non previste, ovvero generando casualmente le portate erogate ai nodi. Dai risultati delle simulazioni è possibile osservare come il sistema di regolazione dimostri grandi doti di adattabilità, anche in condizioni differenti rispetto a quelle utilizzate per la sua messa a punto.

I risultati più soddisfacenti sono stati ottenuti tramite la seconda strategia. Dall'analisi dei risultati delle regolazioni, infatti, è stato possibile osservare come l'andamento, dei valori autodeterminati del parametro proporzionale, rispecchi quello del grado di apertura della valvola; in particolare, valori del parametro proporzionale più elevati vengono calcolati quando la regolazione necessita di maggiore reattività, ovvero quando le portate erogate risultano maggiori e la valvola opera in una parte della curva di regolazione con minore sensibilità (gradi di apertura elevati), mentre, valori più modesti del parametro vengono calcolati in condizioni di maggiore stress del sistema, ovvero quando le portate in rete sono modeste, le pressioni elevate e la valvola deve operare in condizioni di elevata chiusura, ove la curva di regolazione risulta molto più sensibile. Tale risultato è estremamente gradito e consente di ottimizzare la regolazione del sistema, al variare delle condizioni di comportamento della rete.

In termini di perdite idriche, per la rete in esame si è ottenuta una riduzione superiore al 10% delle portate complessivamente perse, a fronte di una riduzione media delle pressioni di esercizio di circa il 10%. Si può dunque comprendere come, per reti con surplus di pressioni ben superiori rispetto a quelli della rete in esame, si possano ottenere ingenti riduzioni delle perdite idriche.

Infine, sono state mostrate le differenze, in termini di regolazione del cielo piezometrico, tra l'utilizzo di un'idrovalvola di stabilizzazione della pressione di valle e di una valvola controllata in tempo reale. E' stato messo in evidenza come la principale differenza tra le due soluzioni è che mentre l'idro-valvola stabilizza la pressione nel punto della rete in cui è inserita, la valvola in RTC viene regolata sulla base di misure effettuate in qualunque nodo della rete. In termini di risultati, le valvole in RTC

consentono di minimizzare più efficacemente le pressioni in rete con conseguente maggiore riduzione delle perdite idriche.

Al fine di validare le considerazioni contenute nel presente lavoro di tesi si dovrà prevedere, negli sviluppi futuri della ricerca, di implementare un sistema di RTC su reti pilota o su reti di acquedotto reali, al fine di mettere in luce eventuali deficienze della modellazione numerica; alcuni dubbi rimangono infatti in merito alla possibilità che micro fenomeni di moto vario, di cui non si tiene conto normalmente nella modellazione delle reti di condotte in pressione, possa influire negativamente sulle performance della regolazione della valvola. In realtà, anche a mezzo di alcune simulazioni preliminari, si è visto come tali possibili inconvenienti possano facilmente essere risolti tramite una pre-filtrazione del segnale di misura delle pressioni. In ogni caso un'applicazione reale potrebbe risultare molto utile per definire anche eventuali problemi legati ai tempi di trasmissione e a quelli di attuazione.

Ringraziamenti

Intendo riservare il mio primo ringraziamento al Prof. Carlo Modica che, durante questi tre anni di dottorato, ha seguito tutte le mie attività con costanza e dedizione, insegnandomi giorno per giorno i metodi e gli approcci per poter condurre attività di ricerca scientifica con consapevolezza e umiltà; spero che abbia idea della stima e dell'affetto che ho nei suoi confronti.

Un grande ringraziamento va al Prof. Alberto Campisano; i suoi consigli e il suo aiuto hanno consentito che una parte dei miei lavori venissero pubblicati su una rivista internazionale; mi onora l'aver potuto lavorare, durante questi anni, con una persona così esperta e appassionata alla ricerca.

Intendo ringraziare anche l'Ing. Enrico Creaco; all'inizio della mia esperienza di dottorato, per solo pochi mesi a causa del suo imminente trasferimento a Ferrara, mi ha insegnato tantissimo, in termini sia operativi che teorici; se solo avessi potuto lavorare per più tempo con lui.....

Non potrò mai ringraziare abbastanza la mia anima gemella (seppur eterozigoti!!!) Paola: solo lei riesce a darmi la forza e l'aiuto per ultimare tutti i passi importanti della mia vita.

Il più grande ringraziamento va a mia madre e mio padre: grazie alle loro "enormi" aspettative nei miei confronti mi spingono ad essere una persona migliore.

Infine un saluto alla mia cara nonnina Lisetta, scomparsa mentre redigevo questa tesi, e a mio nonno Pippo, mio spirito guida.

Elenco delle tabelle

Tabella 2.I:	Componenti del bilancio idrico standard proposto dall'IWA	13
Tabella 2.II:	indicatori di performance IWA per le perdite e l'acqua non fatturata (Fantozzi, 2008).....	16
Tabella 2.III:	Allocazione dei valori di ILI nel sistema di classificazione del WBI (Fantozzi, 2008).....	17
Tabella 3.I:	valori proposti in letteratura per l'esponente n della legge monomia	31
Tabella 5.I:	andamento delle tre componenti dell'unità PID in funzione di quello dell'errore (Veronesi, 2011)	67
Tabella 5.II:	regole di Ziegler-Nichols per la taratura delle unità logiche PID	68
Tabella 5.III:	Ranges di valori adottati nelle simulazioni per le grandezze adimensionali A, B, C, D	77
Tabella 7.I:	caratteristiche idrauliche e geometriche della rete adoperata nelle applicazioni (Jowitt and Xu, 1990).....	98
Tabella 7.II:	valori della portata media giornaliera complessivamente erogata ai nodi ($Q_{EROG.}$), persa dagli impianti ($Q_{LEAK.}$) e immessa in rete ($Q_{TOT.}$)	109
Tabella 7.III:	Configurazioni delle portate medie domandate ai nodi	110
Tabella 7.IV:	valori della portata media giornaliera complessivamente erogata ai nodi ($Q_{EROG.}$), persa dagli impianti ($Q_{LEAK.}$) e immessa in rete ($Q_{TOT.}$), nella condizione di erogazione di Tabella 7.III	112
Tabella 7.V:	valori della portata media giornaliera erogata ai nodi ($Q_{EROG.}$), persa dagli impianti ($Q_{PERD.}$) e immessa in rete ($Q_{TOT.}$), in tre differenti condizioni di regolazione.....	122

Elenco delle figure

Figura 2.1:	Immagini di tre tipologie di perdite a) perdite di sottofondo b) perdite da rotture non segnalate c) perdite da rotture segnalate	15
Figura 2.2:	Modalità di gestione delle perdite idriche reali (modificato da Farley e Trow, 2003).....	18
Figura 2.3:	Rappresentazione grafica dei costi totali connessi al livello di perdite (Farley & Trow, 2003).....	20
Figura 2.4:	Operatore con geofono per la ricerca perdite idriche (TecnoMB s.r.l.).....	22
Figura 2.5:	Correlatore acustico per l'individuazione delle perdite (TecnoMB s.r.l.) .	23
Figura 2.6:	Schema di rete di correlatori in comunicazione WiFi per l'individuazione delle perdite (TecnoMB s.r.l.).....	24
Figura 2.7:	Sistema elettroacustico di individuazione delle perdite Sahara® (WRc -Water Research Centre).....	25
Figura 2.8:	Sistema di individuazione acustico delle perdite SmartBall®: a) schema di funzionamento, b) sfera in gommapiuma con componenti all'interno, c) strumento di inserimento in condotta, d) strumento di recupero della sfera (Pure Technologies).....	25
Figura 2.9:	Operatore con Georadar multiantenna (IDS - Ingegneria Di Sistemi S.p.A.)	26
Figura 2.10:	Visualizzazione della scansione di una tubazione nel terreno tramite Georadar (IDS - Ingegneria Di Sistemi S.p.A.).....	27
Figura 3.1:	Esempio di una popolazione di stringhe A,B,...,P di lunghezza l (Reis et al., 1997).....	35
Figura 3.2:	Rappresentazione degli operatori di un algoritmo genetico a) operatore di crossover b)operatore di mutazione (Reis et al., 1997).....	36
Figura 4.1:	Schematizzazione delle componenti hardware e software di un sistema di RTC complesso (EPA, 2006)	47
Figura 4.2:	Immagini di misuratori di portata: a) misuratore a turbina, b) misuratore elettromagnetico, c) misuratore a ultrasuoni.....	50
Figura 4.3:	Immagini di misuratori di pressione: a) sensore piezoelettrico, b) sensore piezoresistivo, c) sensore capacitivo.....	51
Figura 4.4:	Immagini di idrometri analogici a galleggiante	52
Figura 4.5:	Immagine di a) un idrometro a ultrasuoni e b) della modalità di installazione.....	53
Figura 4.6:	Immagini di a) valvola a saracinesca (a ghigliottina), b) valvola a farfalla	54

Figura 4.7:	Sezione di una valvola a sfera parzialmente aperta	54
Figura 4.8:	Immagine di valvola a fuso a) particolari costruttivi, b) schema di funzionamento	55
Figura 4.9:	Curve di perdita di carico in funzione del grado di apertura di valvole a fuso, al variare del cestello anticavitazione utilizzato (Pam Italia S.p.A. – Saint Gobain).....	56
Figura 4.10:	Schema di funzionamento di un'idrovalvola di regolazione a membrana (Pam Italia S.p.A. – Saint Gobain)	57
Figura 4.11:	Immagine di un'idrovalvola a membrana sezionata (Pam Italia S.p.A. Saint Gobain).....	57
Figura 4.12:	Immagine di dispositivi PLC e RTU (HAWE Hydraulik)	59
Figura 4.13:	raffigurazione di un sistema di controllo applicato ad una rete di acquedotto	63
Figura 5.1:	Schema di controllo con unità logiche PID	65
Figura 5.2:	Azione proporzionale, integrativa, derivativa (Veronesi, 2011).....	67
Figura 5.3:	Tipi di regolazioni ottenute tramite l'unità logica P al variare del parametro K_p	70
Figura 5.4:	Schema del sistema idrico elementare	72
Figura 5.5:	Andamento tipico della quantità δ al variare di \bar{K}_p	73
Figura 5.6:	Esempio di curve $\bar{H} = \bar{H}(\bar{\alpha})$ di un WDN e dell'equivalente SHS	75
Figura 5.7:	Confronto tra i valori di \bar{K}_p^* ottenuti tramite le simulazioni e quelli corrispondenti calcolabili tramite la relazione 5.29.....	78
Figura 5.8:	Grafico esplicativo della variazione del punto di set-point del sistema idrico elementare in funzione dell'aumento di ciascun gruppo adimensionale ...	79
Figura 5.9:	Diagramma giornaliero di portata, riferito alla portata minima Q_{min} (Milano, 1996).....	81
Figura 5.10:	Risultati delle simulazioni numeriche del sistema idrico elementare in condizione di portata variabile in termini di carico piezometrico adimensionalizzato \bar{H} e di grado di apertura della valvola $\bar{\alpha}$	81
Figura 6.1:	Curva di risposta di una rete idrica di letteratura, per una data configurazione delle portate erogate ai nodi, in termini di carico piezometrico al nodo di controllo al variare del grado di apertura della valvola di regolazione.....	84
Figura 6.2:	Confronto esplicativo tra le tre tipologie di curve di previsione del grado di apertura atteso $\bar{\alpha}_{t+1}$ e dell'errore atteso $err(\bar{\alpha}_{t+1})$	85
Figura 6.3:	Classificazione dei possibili andamenti della curva di previsione al variare del valore adottato per il parametro proporzionale K_p	87
Figura 6.4:	Confronto tra i valori di \bar{K}_p^* ottenuti con l'approccio analitico (eq. 6.11) e quelli ottenuti applicando l'equazione di regressione 5.29.....	89
Figura 6.5:	Schematizzazione del processo numerico per l'auto-calibrazione del parametro proporzionale K_p durante la fase di regolazione	92

Figura 7.1:	Schema della rete idrica adoperata nelle applicazioni (Jowitt and Xu, 1990).....	97
Figura 7.2:	Coefficiente orario delle portate domandate ai nodi (Jowitt and Xu, 1990).....	99
Figura 7.3:	Fluttuazioni temporali delle quote idriche nei serbatoi (Jowitt and Xu, 1990).....	99
Figura 7.4:	Curva del coefficiente di perdita di carico della valvola, adoperata nelle simulazioni, al variare del grado di apertura.....	100
Figura 7.5:	Media dello scarto del carico piezometrico al nodo 22 di controllo rispetto al valore di set-point sull'intera simulazione di 24 ore, al variare del valore di K_p	101
Figura 7.6:	Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu controllata in tempo reale tramite un'unità logica proporzionale con $K_p^* = 0.0051$, minimo valore del parametro che provoca oscillazioni permanenti nella regolazione del sistema.....	101
Figura 7.7:	Curva di risposta della rete di Jowitt & Xu, in condizione minima di erogazione $\Phi = \Phi_{min}$, in termini di carico piezometrico al nodo di controllo 22 al variare del grado di apertura della valvola al ramo 11	102
Figura 7.8:	Curva di risposta della rete di Jowitt & Xu, in condizione massima di erogazione $\Phi = \Phi_{max}$, in termini di carico piezometrico al nodo di controllo 22 al variare del grado di apertura della valvola al ramo 11	103
Figura 7.9:	Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu controllata in tempo reale tramite un'unità logica proporzionale con $K_p^* = 0.0033$ determinato con riferimento alla condizione minima di erogazione.....	104
Figura 7.10:	Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu controllata in tempo reale tramite un'unità logica proporzionale con $K_p^* = 0.0281$ determinato con riferimento alla condizione massima di erogazione.....	105
Figura 7.11:	Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu controllata in tempo reale tramite un'unità logica proporzionale con $K_p^* = 0.0021$ determinato tramite le regole di Ziegler-Nichols.....	105
Figura 7.12:	Schema della rete idrica adoperata nelle applicazioni (Jowitt and Xu, 1990), con visualizzazione delle valvole inserite e dei relativi nodi di controllo.....	106
Figura 7.13:	Curva di risposta della rete di Jowitt & Xu, in condizione di minima erogazione $\Phi = \Phi_{min}$, in termini di carico piezometrico al nodo di controllo 2 al variare del grado di apertura della valvola al ramo 1, avendo imposto sulla valvola del ramo 11 il grado di apertura costante di set-point $(\bar{\alpha}_{sp})_{VALVE11} = 0.158$	107
Figura 7.14:	Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt&Xu controllata in tempo reale mediante due valvole inserite al ramo 11 e al ramo 1.....	107
Figura 7.15:	a) carico piezometrico medio nelle 24 ore ai nodi della rete di Jowitt&Xu b) variazione percentuale del carico piezometrico medio rispetto alla condizione in assenza di valvola.....	108

- Figura 7.16: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu, nella condizione di erogazione di Tabella 7.III, controllata in tempo reale tramite due valvole inserite nei rami 11 e 1..... 111
- Figura 7.17: a) carico piezometrico medio nelle 24 ore ai nodi della rete di Jowitt&Xu nella condizione di erogazione di Tabella 7.III b) variazione percentuale del carico piezometrico medio rispetto alla condizione in assenza di valvola. 112
- Figura 7.18: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu con valvola sul ramo 11 in RTC con parametro proporzionale auto-adattativo..... 113
- Figura 7.19: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu con due valvole sul ramo 11 e sul ramo 1 in RTC con parametro proporzionale auto-adattativo 115
- Figura 7.20: Risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu, nella condizione di erogazioni di Tabella 7.III, controllata in tempo reale tramite due valvole inserite nei rami 11 e 1 in RTC con parametro proporzionale auto-adattativo 116
- Figura 7.21: esempio di andamento del carico piezometrico affetto da “rumore” di misura. 118
- Figura 7.22: risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu in RTC con misure di pressione al nodo di controllo affette da rumore 118
- Figura 7.23: risultati della simulazione idraulica della rete di Jowitt & Xu in RTC con misure di pressione al nodo di controllo affette da rumore e filtrate 119
- Figura 7.24: immagine esplicativa delle differenze, in termini di regolazione del carico piezometrico, tra i risultati ottenibili tramite a) un'idrovalvola di stabilizzazione della pressione di valle e b) una valvola regolata in RTC..... 120
- Figura 7.25: Risultati della simulazione della rete di Jowitt & Xu con un'idro-valvola inserita al ramo 11 con carico imposto a valle della stessa pari a 35 m, in termini di carico piezometrico al nodo 22 e di grado di apertura dell'idro-valvola 121
- Figura 7.26: Confronto dei valori medi nelle 24 ore dei carichi piezometrici ai nodi della rete di Jowitt & Xu nella condizione di assenza di regolazione (No-RTC), con una valvola al ramo 11 in RTC con nodo di controllo 22 (RTC of valve11) e con idro-valvola con carico di valle HVALLE=35 m..... 121

Bibliografia

- L. 5.01.1994, n. 36 e s.m.i., Disposizioni in materia di risorse idriche, G.U. 19.01.1994, n. 14. (1994).
- D.P.C.M. 04.03.1996, Disposizioni in materia di risorse idriche, G.U. 14.03.1996, n.62. (1996).
- D.M. LL.PP. 08.01.1997, n. 99, Regolamento sui criteri e sul metodo in base ai quali valutare le perdite degli acquedotti e delle fognature, G.U. 18.04.1997, n. 90. (1999).
- Alegre, H., & al. (2000). *Performance indicator for water supply services. Manual of best practice*. IWA Publishing.
- Araujo, L., Ramos, H., & Coelho, S. (2003). Estimation of distributed pressure-dependent leakage and consumer demand in water supply networks. *Advance in Water Supply Management*. Imperial College London, UK.
- Araujo, L., Ramos, H., & Coelho, S. (2006). Pressure control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Res. Management*, 20(1), p. 133-149.
- Ardakanian, R., & Ghazali, A. (2003). Pressure-leakage relation in urban water distribution systems . *Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction*. Baltimore.
- Artina, S., Bragalli, C., & Sacchi, S. (2003). Simulazione perdite, domanda vincolata ed erogazione turnata. *Seminario su "La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto"* (p. 17-31). Perugia: Morlacchi Editore.
- Bimbo, S., & Colaicovo, E. (2006). *Sistemi SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition*. APOGEO.
- Bovolin, V., Lubritto, M., & Villani, P. (2007). Analisi delle perdite in un sistema di distribuzione idrica in pressione: relazione tra leggi di efflusso locale e globale. *Atti del III seminario su "La ricerca delle perdite e la gestione delle reti d acquedotto"*. Perugia.
- Brand, W. (2008). Prelocalizzazione e localizzazione delle perdite mediante tecniche acustiche e di altro tipo. In B. Brunone, M. Ferrante, & S. Meniconi, *Ricerca e controllo delle perdite nelle reti di condotte* (p. 276-332). Città Studi Edizioni.
- Briggs, R., Meredith, W., & Solman, A. (1985). Developments in Sensor Technology . In T. Telford, *New Technologies in Water Services*. London.
- Brunone, B. (1989). Una tecnica per la verifica dell'integrità di emissari sottomarini. *Atti del convegno su "immissione di acque reflue in mare"* (p. 223-236). Napoli: CUEN.

- Brunone, B. (1999). Transient test-based technique for leak detection in out-fall pipes. *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 125(5), p. 302-306.
- Brunone, B., & Ferrante, M. (2001). Detecting leaks in pressurised pipes by means of transient. *J. of Hydr. Res.*, 39(5), p. 539-547.
- Brunone, B., Ferrante, M., & Meniconi, S. (2008). Portable pressure wave-maker for leak detection and pipe system characterization. *Journal of AWWA*, 100(4), p. 108-116.
- Burnell, D., & Race, J. (2000). Water distribution systems analysis: patterns in supply-pipe leakage. *Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management*. Minneapolis.
- Campisano, A., Creaco, E., & Modica, C. (2010). RTC of Valves for Leakage Reduction in Water Supply Network. *J. Water Resour. Plann. Manag.*, 136(11), p. 138-141.
- Campisano, A., Modica, C., & Vetrano, L. (2010b). Calibrazione di unità logiche proporzionali per il controllo in tempo reale di valvole di riduzione di pressione in acquedotto. *Atti del XXXII convegno nazionale di idraulica e costruzioni idrauliche*. Palermo.
- Campisano, A., Modica, C., & Vetrano, L. (2011). Calibration of proportional controllers for the RTC of pressures in water distribution networks. *J. Water Resour. Plann. Manag.*, 11, p. 138-141.
- Cassar, A., & Dettemar, J. (1996). Components for the real time control of an urban drainage system. *Seventh International Conference on Urban Storm Drainage*, 2, p. 815-820. Hannover.
- Covas, D., & Ramos, H. (2001). Hydraulic transient used for leakage detection in water distribution systems. *Proc. of the 4th Int. Conf. Water Pipeline Systems* (p. 227-242). Cranfield: BHR Group.
- Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. London: Murray.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Gisonni, C., & Iervolino, M. (2009). Caratterizzazione della legge di perdita e di domanda in una rete di distribuzione idrica. *IV Seminario "La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto"*. Aversa.
- EPA. (2006). *Real Time Control of Urban Drainage Networks*. EPA.
- Fantozzi, M. (2008). Bilancio idrico e indicatori di performance per la gestione delle perdite secondo l'approccio dell'International Water Association (IWA). In B. Brunone, M. Ferrante, & S. Meniconi, *Ricerca e controllo delle perdite nelle reti di condotte* (p. 45-69). Città Studi Edizioni.
- Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks. A practitioner's guide to assessment, monitoring and control*. Londra: IWA Publishing.
- Germanopoulos, G., & Jowitt, P. W. (1989). Leakage Reduction by excessive pressure minimization in a water supply network. *Proc. Inst. of Civil Engr.*, 87(2), p. 195-214.
- Gueli, R., & Pezzinga, G. (1998). Algoritmi genetici per la regolazione di valvole ai fini della riduzione delle perdite. *XXVI Convegno di Idraulica e costruzioni idrauliche*, (p. 103-114). Catania.

- Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Press Ann Arbor, Michigan.
- IAWPRC. (1989). Real time control of urban drainage systems. The state of-the-art. *IAWPRC Scientific and Technical Report N°2*. Schilling, W. (ED.). Pergamon Press. London.
- Jørgensen, M. (1994). Parameter analysis for RTC in sewer systems. *Report. Dep. Env. Eng. Technical University of Denmark*. Denmark.
- Jowitt, P., & Xu, C. (1990). Optimal valve control in water distribution networks. *J. of Water Res. Plann. and Man.*, 116(4), p. 455-472.
- Khadam, M., Shammas, N. K., & Al-Feraiheedi, Y. (1991). Water Lossess from Municipal Utilities and their Impacts. *Water International*, 16, p. 254-261.
- Khaled, H., Sendil, U., & Al-Dhowalia. (1992). Relationship between pressure and leakage in a water distribution network. *Proc. of the AWWA Conference*.
- Krishnakumar, K. (1989). Micro-genetic algorithms for stationary and non-stationary function optimization. *SPIE, Intelligent Control and Adaptive Systems*, p. 289-296.
- Lambert, A. (2000). What do we know about Pressure-Leakage Relationshio in Distribution Systems? *Proceeding of the AWWA Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management*.
- Lambert, A. (2001). System approach to leakage control and water distribution systems management. *Proc. of IWA Conference*. Brno.
- Lambert, A. (2003). *Water Losses management and techniques*. IWA International Report 2003.
- Lambert, A., Farley, M., Trow, S., & al. (1994). *Managing Leakage*. U.K. Water Industry & WRc.
- Lee, P., Vitkovsky, J., Lambert, M., Simpson, A., & Liggett, J. (2005). Frequency domain analysis for detecting pipelines leaks. *J- of Hydr. Enrg.*, 131(7), p. 934-955.
- Liberatore, S., & Sechi, G. (2005). Optimal valve location in rehabilitation and design of pipes networks using a scutter search metaheuristic procedure. *Eighth Intern. Conf. on Computing and Control for the Water Industry*. Exeter: CCWI.
- Liberatore, S., & Sechi, G. (2007). Ottimizzazione dell'uso di valvole per il controllo in tempo reale della pressione nelle reti acquedottistiche. *Approvvigionamento e Distribuzione Idrica: Esperienza, Ricerca ed Innovazione. Atti del convegno*. Ferrara.
- Liberatore, S., & Sechi, G. (2009). Location and Calibration of Valves in Water Ditribution Networks Using a Scatter-Search Meta-heuristic Approach. *Water Res. Man.*, 23, p. 1479-1495.
- Liberatore, S., & Sechi, G. M. (2006). Ottimizzazione dell'uso delle valvole per il controllo in tempo reale della pressione nelle reti acquedottistiche. *Atti del XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, (p. 305-315). Ferrara.
- Liberatore, S., & Sechi, G. M. (2009). Inserimento delle valvole nelle reti di distribuzione: abbinamento di tecniche di ottimizzazione meta-euristiche e di

- strategie di riduzione del grafo della rete. *IV Seminario "La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto"*, (p. 159-162). Aversa.
- Liggett, J., & Chen, L. (1994). Inverse transient analysis in pipe networks. *J. of Hydr. Engrg.*, 131(7), p. 934-955.
- Lingireddy, S., & Wood, D. (1998). Improved operation of water distribution system using variable speed pumps. *Journal of Energy Engineering* 124(3), 90-103.
- Martin, D., & Peters, G. (1963). The application of Newton's method to network analysis by digital computer. *J. Inst. Of Water Engineers* 17(2), 115-129.
- Martinez, F., Conejos, P., & Vercher, J. (1999). Developing an Integrated Model of Water Distribution Systems Considering both Distributed Leakage and Pressure Dependent Demands. *Proc. ASCE Water Resources Planning and Management Division Conference*. Tempe.
- May, J. (1994). Leakage, pressure and control. *BICS Int. Conf. on Leakage Control Investigation in Underground Assets*.
- Mazzola, M., & Bazzurro, N. (2008). Aspetti economici nelle strategie di gestione delle perdite idriche. In B. Brunone, M. Ferrante, & S. Meniconi, *Ricerca e controllo delle perdite nelle reti di condotte* (p. 3-44). Città Studi Edizioni.
- McKenzie, R., & Lambert, A. (2002). *Econoleak Economic Model For Leakage Management For Water Suppliers in South Africa, User Guide*. WRC.
- McKinney, D., & Lin, M. D. (1994). Genetic algorithm solution of groundwater management models. *J. Water Resour. Res.*, 30(6), p. 1897-1906.
- Michalewicz, Z. (1994). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin: Springer-Verlag.
- Milano, V. (1996). *Acquedotto, guida alla progettazione*. Milano: Hoepli.
- Mpesha, W., Gassman, S., & Chaundhry, M. (2001). Leak detection in pipes by frequency response method. *J. of Hydr. Engrg.*, 127(2), p. 134-147.
- Nicolini, M., & Zovatto, L. (2009). Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 135(3), p. 178-187.
- Nicolini, M., Giacomello, C., & Deb, K. (2011). Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network. *J. Water Resour. Plan. Mngm.*(1), p. 134-142.
- Ortolano, L. (1996). *Environmental regulation and impact assessment*. New York: John Wiley & Sons.
- Pearce, D. W., Mourato, S., & Atkinson, G. (2006). *Recent development in environmental cost-benefit analysis*. Parigi: OECD.
- Pezzinga, G. (1994). Modelli per la regolazione della piezometria ai fini della riduzione delle perdite in rete. *Atti del XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. II*. Napoli: CUEN.
- Pezzinga, G., & Gueli, R. (1999). Discussion of "Optimal Location of Control Valves in pipe Networks by Genetic Algorithms". *J. Wat. Res. Plan. Man.*, 125(1), p. 65-67.
- Pulci Doria, G. (1992). *Metodologie moderne di misure idrauliche e idrodinamiche*. Padova: CUEN.

- Reis, L., Porto, R., & Chaudry, F. (1997). Optimal Location of Control Valves in Pipe Network by Genetic Algorithms. *J. Wat. Res. Plan. Man.*, 123(6), p. 317-326.
- Riztel, B., & Eheart, W. (1994). Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem. *J. Water Resour. Res.*, 30(5), p. 1589-1603.
- Rudolph, G. (1994). Convergence analysis of Canonical Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(1), p. 96-101.
- Savic, D., & Walters, G. (1995). An evolution program for optimal pressure regulation in water distribution networks. *Eng. Optimiz.*, 24, p. 197-219.
- Savic, D., & Walters, G. (1995). Integration of a Model for Hydraulic Analysis of Water Distribution Network with an Evolution Program for Pressure Regulation. *Microcomputers in Civil Engineering*, 10, p. 219-229.
- Schilling, W. (1994). Smart sewer systems improved performance by real time control. *Eur. Water Pollut. Control*, 4(5), p. 24-31.
- Schilling, W., Andersson, B., Nyberg, U., Aspergren, H., Rauch, W., & Harremoës, P. (1996). Real time control of wastewater systems. *Journal fo Hydraulic Research, ASCE*, 34(6), 785-797.
- Schütze, M., Campisano, A., Colas, H., Schilling, W., & Vanrolleghem, P. (2004). Real time control of urban wastewater systems—where do we stand today? *J. Hydrol*, 299(3-4), p. 335–348.
- Seago, C., & al. (2005). International benchmarking of leakage from water reticulation system. *Proc. of IWA Leakage 2005 Conference*. Halifax.
- Sendil, U., & Al-Dhowalia, K. (1992). Relationship between pressure and leakage in a water distributon network. *Proc. of the AWWA Annual Conference*, (p. 665-685). Vancouver.
- Simpson, A., Dandy, G., & Murphy, L. (1994). Genetic algorithms compared to other techinques for pipe optimization. *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 120(4), p. 423-443.
- Stathis, J. A., & Loganathan, G. (1999). Analysis of Pressure-Dependent Leakage in Water Distribution Systems. *Proc. ASCE Water Resources Planning and Management Division Conference*. Tempe.
- Tanyimboh, T., Tabesh, M., & Burrows, R. (2001). Appraisal of Source Head Methods for Calculating Reliability of Water Distribution Networks. *J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE*, 127(4), 206-213.
- Thornton, J., & al. (2002). *Water loss control manual*. New York: Mc Graw Hill.
- Thornton, J., & al. (2003). Managing Leakage by managing pressure. *J. Water*, 21.
- Thornton, J., & Lambert, A. (2005). Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships. *Proc. of IWA Special Conference "Leakage 2005"*. Halifax.
- Tullis, J. (2003). Valve selection and application, Pumps, Electromechanical Devices and Systems Applied to Urban Water Management. 613-622. The Netherland: Balkema Publishers.

- Turner, R. K., Pearce, D., & Bateman, I. (2003). *Economia ambientale*. Bologna: Il Mulino.
- Vairavamorthy, K., & Lumbers, J. (1998). Leakage reduction in water distribution systems: optimal valve control. *J. Hydraul. Eng.*, 124(11), p. 1146-1154.
- Veronesi, M. (2011). *Regolazione PID: tecniche di taratura, schemi di controllo, valutazione delle prestazioni*. Franco Angeli.
- Vitkovsky, J., Simpson, A., & Lambert, M. (2000). Leak detection and calibration using transient and genetic algorithms. *J. Water Resour. Plng, and Mgmt.*, 126(4), p. 262-265.
- Wang, X., Lambert, M., Simpson, A., Liggett, J., & Vitkovsky, J. (2002). Leak detection in pipelines using the damping of fluid transient. *J. of Hydr. Engrg.*, 128(7), p. 697-711.
- Weyand, M. (1990). Classification characteristic of local control devices in combined sewer system. *Fifth International Conference on Urban Storm Drainage*, 3, p. 1347-1352. Osaka.
- Young, R. A. (1996). *Measuring economic benefits for water investments and policies*. Washington D.C.: World Bank.
- Ziegler, J., & Nichols, N. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Trans.*, 64, p. 759-768.