



**Università  
degli Studi  
di Ferrara**

**DOTTORATO DI RICERCA IN  
"SCIENZA DELL'INGEGNERIA"**

**CICLO XXXV**

**COORDINATORE Prof. Stefano Trillo**

---

**Il ruolo del monitoraggio e dello smart metering  
per il contenimento delle perdite idriche nei  
sistemi di distribuzione acquedottistici**

**Settore Scientifico Disciplinare ICAR/02**

**Dottoranda**

**Dott.ssa Irene Marzola**

**Tutor**

**Prof. Marco Franchini  
Prof. Stefano Alvisi**

**Anni 2019/2022**



## *Sommario*

I sistemi di distribuzione idrica sono fondamentali per garantire l'accesso all'acqua potabile, in quanto bene essenziale per la vita e indispensabile per la salute individuale. Negli ultimi anni, tuttavia, la richiesta idrica è in continuo aumento a causa dell'incremento della popolazione mondiale, mentre, dall'altra parte, le risorse idriche stanno diminuendo per via dei cambiamenti climatici e dell'inquinamento. Pertanto, gli enti gestori sono chiamati a una gestione efficiente dell'acqua, per limitarne il più possibile gli sprechi, ma le loro reti presentano una grande criticità che limita la salvaguardia della risorsa idrica, ovvero le perdite idriche.

Più nel dettaglio, con perdita idrica si intende l'acqua potabile che viene persa dal gestore idrico poiché fuoriesce dalla rete senza un'azione controllata. Esse consistono sia in vere e proprie dispersioni di acqua causate da cedimenti strutturali, da disconnessioni dei giunti o da eventuali rotture delle condotte, sia in acqua potabile che viene effettivamente consumata ma che non viene misurata e quindi non fatturata, come nel caso di allacci abusivi o errori di misura dei contatori. Questa grave e diffusa problematica ha ripercussioni economiche, sociali e soprattutto ambientali in quanto si tratta di spreco di una risorsa fondamentale per la vita e non inesauribile.

Purtroppo, in media in Italia all'incirca il 42% dell'acqua immessa nella rete viene persa. Chiaramente, una rete di distribuzione senza perdite è un obiettivo irrealizzabile sia tecnicamente che economicamente. Per questo, il gestore è chiamato a un utilizzo sempre più attento e sostenibile della risorsa idrica, tramite l'esecuzione di programmi efficienti per il contenimento delle perdite idriche.

Questa tesi si inserisce nell'importante contesto appena descritto, e vuole fornire un approccio innovativo alle tecniche e ai metodi già presenti nella letteratura e normalmente applicati dai gestori per il contenimento delle perdite idriche. In particolare l'attenzione sarà focalizzata su come la digitalizzazione, l'introduzione di sistemi di monitoraggio e l'installazione di smart meter possano aiutare ad

efficientare le varie fasi necessarie per la riduzione dei volumi di acqua persi. Infatti, negli ultimi anni si è potuto assistere a una vera e propria evoluzione digitale, che sta avendo un impatto anche sul settore idrico, in quanto ad oggi è possibile monitorare dettagliatamente i parametri principali delle reti tramite sensori e i consumi idrici delle utenze tramite smart meter. Essendo questo sviluppo tecnologico molto recente, l'obiettivo di questa tesi è quello di analizzare quanto l'aumento della conoscenza delle reti e la disponibilità di una maggior quantità di dati di campo possano rendere più efficienti e ottimali le fasi per il contenimento delle perdite idriche, ovvero la loro quantificazione, caratterizzazione e localizzazione.

Questa tematica è stata sviluppata approfonditamente in una prima fase considerando i metodi del MNF (Minimum Night Flow) per la valutazione del livello di perdita e i modelli dell'equazione di potenza e FAVAD (Fixed And Variable Area Discharges) per la caratterizzazione della perdita idrica in funzione della pressione. Essi sono stati analizzati e applicati in un distretto idrico monitorato tramite smart meter a livello di singola utenza, i quali hanno permesso di ottenere gli andamenti nel tempo dei consumi idrici di ogni utenza. I risultati dell'applicazione come da letteratura di queste metodologie sono stati confrontati con quelli ottenuti integrando le informazioni dettagliate sul consumo delle utenze, ovvero, più nel dettaglio, è stata effettuata un'analisi di affidabilità del metodo del MNF e un'analisi su vari approcci per il calcolo dei coefficienti dei due modelli di caratterizzazione.

In secondo luogo, due metodi model-based per la localizzazione delle perdite idriche sono stati applicati ad un caso studio sintetico, ovvero un sistema di distribuzione acquedottistico di cui si conosce la storia delle perdite, e si dispone sia di dati di pressione misurati nella rete sia di un modello idraulico perfetto, contenente una precisa topologia e gli esatti pattern di consumo delle utenze. È stata quindi valutata l'accuratezza dei due metodi scelti ipotizzando casistiche diverse di gestione dei dati, diversi gradi di conoscenza della rete, ovvero di

accuratezza del modello idraulico, e diversi numeri di sensori di pressione, in modo da riprodurre diverse situazioni di monitoraggio a cui il gestore idrico può fare riferimento.

Inoltre, considerando un caso studio reale, si è evidenziato come la digitalizzazione delle reti e il monitoraggio smart dei consumi consenta al gestore di ottenere le informazioni necessarie per una corretta caratterizzazione del funzionamento del sistema. Questo è fondamentale per la successiva messa a punto del modello idraulico necessario per applicare le metodologie precedentemente descritte per la localizzazione delle perdite idriche. In particolare, l'utilizzo di smart meter ha permesso di caratterizzare correttamente i consumi idrici anche a fronte di situazioni anomale. Infatti, un'ampia campagna di monitoraggio dei consumi idrici durante il periodo di lockdown da COVID-19 ha permesso di valutare come le restrizioni imposte per prevenire il contagio abbiano modificato le abitudini delle utenze e, quindi, come abbiano impattato sui loro consumi idrici.

Infine, sono state analizzate le problematiche che i gestori idrici possono riscontrare nel passaggio alla digitalizzazione e nell'utilizzo di questi nuovi strumenti di misura.



## *Abstract*

Water distribution systems are fundamental to ensure access to drinking water, as it is essential for life and indispensable for human health. However, on one hand water demand is continuously increasing due to world population growing, while, on the other hand, water resources are decreasing due to climate changes and pollution. Therefore, water utilities are required to efficiently manage water, in order to limit its wastage as much as possible, although their networks present a critical issue that limits the conservation of water resources, namely water leakages.

More specifically, a leakage is defined as the amount of water which escapes from the pipe network by means other than through a controlled action. They consist both in real water losses caused by structural failures or broken pipes, and in drinking water that is actually consumed but not metered and therefore not billed, as in the case of unauthorised connections or meter errors. This serious and widespread problem has economic, social and, above all, environmental consequences, as a resource that is fundamental to life and not inexhaustible is wasted.

Unfortunately, on average in Italy the amount of water lost is about the 42% of the system input. Clearly, a distribution network without leakages is an unrealistic target, both technically and economically. However, the water utility is required to use water resources more carefully and sustainably through efficient water loss control programmes.

This thesis is set in the important context just described, and aims to provide an innovative approach to the techniques and methodologies already available in the literature and normally used by water utilities for leakage control. In particular, the thesis will be focused on how the digitisation, the introduction of monitoring systems and the installation of smart meters can help to reduce the volumes of water lost more efficiently. In fact, digital evolution and transformation has

affected the world in the last years, impacting also on the water sector, as it is now possible to monitor in detail both the main parameters of networks by means of sensors and the users' water consumption by means of smart meters. Because this technological development is recent, the aim of this thesis is to analyse how the increased knowledge of the networks and the availability of more field data can improve the efficiency and optimise the steps for water loss control, i.e. leakage evaluation, characterisation and localisation.

This topic was developed in detail in a first phase by considering the MNF (Minimum Night Flow) methodology for the evaluation of the leakage level and the power equation and FAVAD (Fixed And Variable Area Discharges) model for the characterisation of leakages as a function of pressure. They were analysed and applied to a water district monitored by smart meters, thanks to which the time series of the water consumption of each user were available. The results of the application of these methodologies based on literature values were compared with those obtained by integrating the detailed information of the users' consumption, i.e., more in detail, an analysis of the accuracy of the MNF method and an analysis on different approaches for the evaluation of the coefficients of the two characterisation models were carried out.

Secondly, two model-based methods for leakage localisation were applied to a synthetic case study, i.e. a water distribution system whose leakage history is known, and for which both measured pressure data and a perfect hydraulic model containing a precise topology and the exact users' consumption patterns are available. Therefore, the accuracy of the two chosen methods was assessed by using different data exploitation cases and by assuming various levels of network knowledge, i.e. by changing the accuracy of the hydraulic model, and using different numbers of pressure sensors, in order to reproduce different situations to which the water utilities can relate.

Furthermore, with reference to a real case study, it was highlighted how the network digitalisation and the smart monitoring of water consumption allows the water utilities to obtain the information needed for a correct characterisation of the system. This is fundamental for the subsequent development of the hydraulic model needed to apply the leakage localisation methodologies above described. In particular, the use of smart meters has allowed the correct characterisation of water consumption even during anomalous situations. In fact, an extensive monitoring during the lockdown period due to COVID-19, allowed to assess how the restrictions imposed to prevent contagion changed users' habits and, therefore, the impact on their water consumption.

Finally, the problems and issues that water utilities can face in the transition to digitalisation and the use of these new measuring instruments were examined.



# Indice

<i>Sommario</i> .....	i
<i>Abstract</i> .....	v
Indice .....	ix
Lista delle abbreviazioni .....	xiii
Simbologia utilizzata .....	xiii
Capitolo 3 .....	xiii
Capitolo 4 .....	xiv
Capitolo 5 .....	xv
Lista delle figure .....	xvii
Lista delle tabelle .....	xix
1. Introduzione.....	1
1.1 Struttura della tesi .....	8
2. Literature Review .....	11
2.1 Quantificazione del livello di perdita.....	14
2.2 Caratterizzazione delle perdite idriche.....	17
2.3 Localizzazione delle perdite idriche.....	19
3. Il sostegno della digitalizzazione delle reti al metodo del MNF e al modello FAVAD.....	27
3.1 Metodi .....	30
3.1.1 MNF.....	30
3.1.2 Equazione di Potenza.....	31
3.1.3 Modello FAVAD .....	33
3.2 Caso studio .....	35
3.3 Analisi effettuate e risultati .....	39

3.3.1	Analisi dell'affidabilità del metodo del MNF.....	39
3.3.2	Analisi di diverse parametrizzazioni per l'equazione di potenza e il modello FAVAD .....	42
3.4	Conclusioni .....	49
4.	Valutazione delle potenzialità e delle criticità dei metodi model-based per la localizzazione delle perdite.....	51
4.1	Metodi model-based.....	56
4.1.1	Sensitivity Matrix .....	56
4.1.2	Linear Approximation.....	58
4.2	Caso studio .....	60
4.3	Analisi effettuate .....	62
4.3.1	Analisi A .....	63
4.3.2	Analisi B1-B6 .....	66
4.3.3	Analisi C1-C2 .....	68
4.3.4	Analisi D .....	70
4.4	Risultati e discussioni.....	71
4.4.1	Analisi A .....	71
4.4.2	Analisi B1-B6 .....	73
4.4.3	Analisi C1-C2 .....	75
4.4.4	Analisi D .....	76
4.5	Conclusioni .....	78
5.	Lo smart meter per la caratterizzazione dei consumi e la messa a punto dei modelli idraulici.....	81
5.1	Effetti della pandemia da COVID19 sui consumi idrici delle utenze.....	86
5.1.1	Caso studio.....	87
5.1.2	Analisi effettuate.....	88

5.1.3	Risultati e discussioni .....	92
5.1.4	Conclusioni .....	99
5.2	Criticità e problematiche legate all'utilizzo degli smart meter per il monitoraggio dei consumi idrici .....	101
6.	Conclusioni.....	105
	Ringraziamenti.....	109
	Bibliografia .....	111



## Lista delle abbreviazioni

BattLeDIM – Battle of the Leakage Detection and Isolation Methods

DMA – District Metered Area

FAVAD – Fixed And Variable Area Discharges

GIS – Sistema informativo geografico

IoT – Internet of Things

IWA – International Water Association

LA – Linear Approximation

MNF – Minimum Night Flow

SM – Sensitivity Matrix

## Simbologia utilizzata

### Capitolo 3

$A$  = area della perdita

$A_0$  = area della perdita iniziale nel modello FAVAD

$A_0^\gamma$  = valore stimato dell'area della perdita iniziale per il giorno  $\gamma$

$\bar{A}_0$  = valore stimato dell'area della perdita iniziale utilizzando i dati mediati

$C$  = coefficiente della perdita nell'equazione di potenza

$C_\gamma$  = valore stimato del coefficiente di perdita per il giorno  $\gamma$

$\bar{C}$  = valore stimato del coefficiente di perdita utilizzando i dati mediati

$C_q$  = coefficiente di portata nell'equazione di Torricelli e nel modello FAVAD

$g$  = accelerazione di gravità

$\gamma$  = giorno generico del periodo di dati a disposizione per il distretto di Gorino Ferrarese (1, 2, ... 45)

$h$  = carico di pressione

$h_1$  = carico di pressione prima di una manovra di riduzione della pressione

$h_2$  = carico di pressione dopo una manovra di riduzione della pressione

$h_2^\gamma$  = carico di pressione dopo la manovra di riduzione della pressione del giorno  $\gamma$

$h_1^\gamma$  = carico di pressione prima della manovra di riduzione della pressione del giorno  $\gamma$

$\bar{h}_1$  = carico di pressione medio prima delle manovre di riduzione della pressione

$\bar{h}_2$  = carico di pressione medio dopo le manovre di riduzione della pressione

$H$  = ora del giorno (1, 2, ... 24)

$m$  = pendenza tra area e pressione nel modello FAVAD

$m_\gamma$  = valore stimato della pendenza tra area e pressione per il giorno  $\gamma$

$\bar{m}$  = valore stimato della pendenza tra area e pressione utilizzando i dati mediati

$N1$  = esponente della perdita nell'equazione di potenza

$N1_\gamma$  = valore stimato dell'esponente della perdita per il giorno  $\gamma$

$\bar{N1}$  = valore stimato dell'esponente della perdita utilizzando i dati mediati

$Q$  = flusso della perdita

$Q_1$  = flusso della perdita prima di una manovra di riduzione della pressione

$Q_2$  = flusso della perdita dopo una manovra di riduzione della pressione

$Q_2^\gamma$  = flusso di perdita dopo la manovra di riduzione della pressione del giorno  $\gamma$

$Q_1^\gamma$  = flusso di perdita prima della manovra di riduzione della pressione del giorno  $\gamma$

$\bar{Q}_1$  = flusso di perdita medio prima delle manovre di riduzione della pressione

$\bar{Q}_2$  = flusso di perdita medio dopo le manovre di riduzione della pressione

## Capitolo 4

$C_j$  = coefficiente di perdita iniziale associato ai due nodi adiacenti alla condotta  $j$

$E_j$  = differenza tra pressioni misurate e simulate associando la perdita alla condotta  $j$

$h_{j_1}$  = carico di pressione del nodo  $j_1$

$h_{j_2}$  = carico di pressione del nodo  $j_2$

$H$  = ora del giorno (1, 2, ... 24)

$i$  = nodo generico in cui è stato installato un sensore di pressione

$j$  = condotta generica della rete

$j_1$  = primo nodo adiacente alla condotta  $j$

$j_2$  = secondo nodo adiacente alla condotta  $j$

$n_{pipe}$  = numero di condotte

$n_{sen}$  = numero di sensori di pressione

$p_{i,base}$  = pressione simulata dal modello idraulico nel nodo  $i$  in assenza di perdita

$p_{i,base}(t)$  = pressione simulata dal modello idraulico nel nodo  $i$  in assenza di perdita corrispondente al passo temporale  $t$

$\bar{p}_{i,base}(H)$  = pressione simulata dal modello idraulico nel nodo  $i$  in assenza di perdita corrispondente all'ora  $H$

$p_{i,misurata}$  = pressione misurata dal sensore di pressione nel nodo  $i$

$p_{i,misurata}(t)$  = pressione misurata dal sensore di pressione nel nodo  $i$  corrispondente al passo temporale  $t$

$\bar{p}_{i,misurata}(H)$  = pressione misurata dal sensore di pressione nel nodo  $i$  corrispondente all'ora  $H$

$p_{i,perturbata_j}$  = pressione simulata dal modello idraulico nel nodo  $i$  con perdita allocata nella condotta  $j$

$p_{i,perturbata_j}(t)$  = pressione simulata dal modello idraulico nel nodo  $i$  con perdita allocata nella condotta  $j$  corrispondente al passo temporale  $t$

$\bar{p}_{i,perturbata_j}(H)$  = pressione simulata dal modello idraulico nel nodo  $i$  con perdita allocata nella condotta  $j$  corrispondente all'ora  $H$

$Q$  = flusso di perdita

$R$  = vettore dei residui

$S$  = matrice di sensitività

$t$  = passo temporale di 5 minuti durante una giornata (1, 2, ... 288)

$X_j$  = nuovo coefficiente di perdita calcolato per i due nodi adiacenti alla condotta  $j$

## Capitolo 5

$c$  = singola utenza commerciale (1, ...,  $NC$ )

$d$  = giorno generico del periodo di dati considerato a seconda dell'analisi per il distretto di Rovigo

$D$  = numero di giorni inclusi nel periodo di dati considerato a seconda dell'analisi per il distretto di Rovigo

$\overline{\Delta v}_{r,H}$  = differenza tra i volumi medi orari consumati durante il periodo di lockdown e il corrispondente periodo del 2019 per ciascun utenza residenziale  $r$

$\overline{\Delta v}_u$  = differenza tra il volume medio giornaliero di acqua consumato da ogni singolo utente  $u$  durante il periodo di lockdown e il corrispondente periodo del 2019

$\eta_H$  = coefficienti di consumo orario

$H$  = ora del giorno (1, 2, ... 24)

$K$  = numero di classi in cui sono stati suddivisi i profili orari di consumo idrico di ogni singolo utente residenziale  $r$  tramite algoritmo K-means

$NC$  = numero di utenze commerciali

$NR$  = numero di utenze residenziali

$NT$  = numero di utenze totali

$r$  = singola utenza residenziale (1, ...,  $NR$ )

$T$  = il numero di giorni feriali o di fine settimana/festivi inclusi nel periodo di dati considerato a seconda dell'analisi per il distretto di Rovigo

$u$  = singola utenza generica (1, ...,  $NT$ )

$UC$  = insieme delle sole utenze commerciali

$UR$  = insieme delle sole utenze residenziali.

$UT$  = insieme di tutte le utenze

$v_{r,H}^d$  = volume consumato dall'utenza residenziale  $r$  durante l'ora  $H$  del giorno  $d$

$v_{u,H}^d$  = volume consumato dall'utenza  $u$  durante l'ora  $H$  del giorno  $d$

$V^d$  = volume giornaliero di acqua consumato da tutte le utenze durante il giorno  $d$

## Lista delle figure

<b>Figura 3.1.</b> a) Immagine satellitare e b) layout della rete e degli allacci del distretto idrico di Gorino Ferrarese.....	36
<b>Figura 3.2.</b> Andamento della pressione su di un periodo di due giorni, evidenziando tramite ellissi la manovra di riduzione di pressione .....	37
<b>Figura 3.3.</b> Andamento a passo di 5 minuti del flusso in ingresso al distretto (rosso) e della somma di tutti i consumi delle utenze (blu), in un giorno di riferimento .....	38
<b>Figura 3.4.</b> Andamento a passo orario della perdita idrica del distretto lungo tutti i 45 giorni monitorati .....	38
<b>Figura 3.5.</b> a) Consumi notturni di ogni giorno monitorato per il set 1 (punti vuoti neri) e valori medi (punti pieni neri) interpolati da una retta, e consumi notturni di ogni giorno monitorato per il set 2 (punti vuoti gialli) e il loro valore medio (punto pieno giallo), confrontati con i valori stimati da letteratura (punti verdi); b) aggiunta del minimo flusso in ingresso (blu) e dei consumi notturni totali del set 3 (magenta) .....	40
<b>Figura 3.6.</b> Estrapolazione dei valori di perdita e pressione dalle relative serie temporali, prima e dopo la manovra di abbassamento della pressione.....	43
<b>Figura 3.7.</b> Serie temporale della pressione (rosso) e della perdita (blu) su tutti i 45 giorni monitorati a passo orario .....	45
<b>Figura 3.8.</b> a-e) valori del coefficiente $m$ in funzione del passo temporale stimati con i diversi approcci P1-P5; f-j) valori del coefficiente $N1$ in funzione del passo temporale stimati con i diversi approcci P1-P5 .....	47
<b>Figura 3.9.</b> Andamento dell'equazione del modello FAVAD con i coefficienti stimati considerando un passo temporale di 60 minuti con a) i metodi A1 (blu), A2 (magenta) e A3 (verde) e b) i metodi A4 (grigio) e A5 (nero) .....	48
<b>Figura 4.1.</b> Diagramma del metodo Sensitivity Matrix .....	58
<b>Figura 4.2.</b> Diagramma del metodo Linear Approximation .....	60

<b>Figura 4.3.</b> La rete considerata nel caso studio. I punti in cui sono installati i sensori di pressione sono evidenziati con dei pallini verdi mentre le condotte che presentano perdita sono evidenziate con croci rosse .....	61
<b>Figura 4.4.</b> Serie temporali della portata di a) una perdita dovuta a una rottura improvvisa (burst) e b) una perdita incipiente; il giorno considerato per la localizzazione è evidenziato da un cerchio rosso .....	63
<b>Figura 4.5.</b> Evoluzione della portata delle due perdite incipienti considerate per l'applicazione dei metodi .....	70
<b>Figura 4.6.</b> Errori di localizzazione del metodo LA (punto) e del metodo SM (asterisco) considerando la totalità dei sensori e i set ottenuti con l'approccio uniforme nell'analisi C1 .....	76
<b>Figura 4.7.</b> Andamento dell'errore di localizzazione per LA (linea continua blu) e SM (linea tratteggiata blu) per ogni giorno di evoluzione delle due perdite incipienti considerate .....	77
<b>Figura 5.1.</b> Andamento del volume giornaliero di acqua $V^d$ consumato dall'insieme $UT$ nel periodo compreso tra il 1° Febbraio e il 3 Maggio 2020 .....	92
<b>Figura 5.2.</b> Distribuzione di frequenza relativa delle variazioni $\overline{\Delta v}_u$ tra i volumi medi giornalieri consumati da ogni singolo utente $u$ ( $u = 1, \dots, NT$ ) durante il mese di Aprile 2020 e il mese di Aprile 2019 .....	94
<b>Figura 5.3.</b> Coefficienti di consumo orario ( $\eta_H$ ) nei mesi di Aprile 2019 (linea continua) e Aprile 2020 (linea tratteggiata) per l'intero sottoinsieme $UR$ : (a) nei giorni feriali; e (b) nei fine settimana/ giorni festivi.....	95
<b>Figura 5.4.</b> Box-plot delle differenze ( $\overline{\Delta v}_{r,H}$ ) tra i consumi medi orari nei giorni feriali di Aprile 2020 e quelli di Aprile 2019 per le utenze del set $UR$ .....	96
<b>Figura 5.5.</b> Risultati dell'algorithm K-means. Ogni pannello include i profili dei consumi idrici residenziali nei giorni feriali dell'Aprile 2019 e dell'Aprile 2020 ( $\eta_H$ , in grigio) per le 4 classi individuate e il cluster (in nero) associato a ciascuna classe.....	97
<b>Figura 5.6.</b> Consumi medi orari nei giorni feriali nei mesi di Aprile 2019 (linea continua) e Aprile 2020 (linea tratteggiata) di (a) una farmacia; (b) una ferramenta; (c) un centro benessere; e (d) un parrucchiere .....	99

## Lista delle tabelle

<b>Tabella 3.1.</b> Consumi notturni stimati per le utenze a seconda della località.....	31
<b>Tabella 4.1.</b> Riassunto delle analisi effettuate per i bursts.....	69
<b>Tabella 4.2.</b> Riassunto delle analisi effettuate sulle perdite incipienti.....	71
<b>Tabella 4.3.</b> Errori di localizzazione ottenuti per ogni metodo dall'Analisi A, ovvero con i diversi approcci nell'utilizzo dei dati, dalle Analisi B1-B6, ovvero con diverse imprecisioni nei dati e nel modello, e dalle analisi C1-C2 con l'approccio uniforme e, tra parentesi, l'approccio random.....	72
<b>Tabella 5.1.</b> Confronto tra il consumo medio giornaliero di acqua degli insiemi <i>UT</i> , <i>UR</i> e <i>UC</i> di Aprile 2020 rispetto ad Aprile 2019 .....	93
<b>Tabella 5.2.</b> Percentuali delle utenze residenziali assegnate a ciascuna delle quattro classi ad Aprile 2019 (periodo pre-lockdown) e ad Aprile 2020 (periodo del lockdown) .....	98



# **Introduzione**

Questo capitolo presenta il contesto relativo all'attività di ricerca effettuata, seguito da una spiegazione degli obiettivi principali di questa tesi e dalla descrizione della struttura dei vari capitoli.



L'acqua è un bene essenziale per la vita, e l'accesso all'acqua potabile è indispensabile per la salute individuale e per il normale svolgimento delle attività quotidiane. Negli ultimi anni, tuttavia, la risorsa idrica sta diventando sempre più scarsa e, pertanto, i sistemi di distribuzione acquedottistica sono chiamati a una gestione efficiente dell'acqua, per limitarne il più possibile gli sprechi. Per garantire un approvvigionamento idrico sostenibile varie soluzioni possono essere messe in atto, dalla limitazione dei consumi al riuso delle acque depurate.

Tuttavia le criticità più importanti dei sistemi di distribuzione acquedottistica per quel che riguarda la salvaguardia della risorsa idrica sono le perdite idriche (Farley et al. 2013).

Con *perdita idrica* si intende l'acqua potabile che viene persa dal gestore idrico poiché fuoriesce dalla rete idrica senza un'azione controllata. Si stima che in media in Italia all'incirca il 42% dell'acqua immessa nella rete venga persa (Istat 2019). Come definito dall' IWA (International Water Association) (Canto Ríos et al. 2014; Lambert 2002) le perdite idriche possono essere suddivise in due categorie, apparenti e reali. Le prime consistono nell'acqua potabile che viene consumata ma che non viene misurata e quindi non fatturata, come nel caso di allacci abusivi o errori di misura dei contatori. Le perdite reali invece consistono in vere e proprie dispersioni di acqua causate da cedimenti strutturali, da disconnessioni e inadeguatezze dei giunti, o da eventuali rotture delle condotte dovute alla loro vetustà ovvero al decadimento della loro resistenza strutturale (Farley and Trow 2003; van Zyl and Clayton 2007). Queste si manifestano per l'effetto combinato del deterioramento delle caratteristiche della rete e della

## Capitolo 1

variazione della pressione, nonché per l'intervento di fattori esterni non prevedibili (Ghedini et al. 2010), ed è proprio su quest'ultima categoria di perdite, ovvero le perdite idriche reali, che vengono maggiormente concentrati gli sforzi di riduzione da parte del gestore.

Chiaramente, le perdite idriche rappresentano una grave problematica e hanno importanti ripercussioni su diversi fronti. Innanzitutto sono una pesante perdita economica per il gestore idrico, che si ritrova a disposizione meno fondi da poter investire per efficientare le proprie reti. La loro presenza è peraltro dannosa per le condizioni strutturali della rete, poiché portano a un'accelerazione del deterioramento delle infrastrutture con conseguente formazione di ulteriori perdite. Inoltre, le perdite idriche impattano anche sugli utenti finali, i quali possono essere soggetti a periodi di interruzione della fornitura idrica, con conseguenti disagi. Tuttavia, l'impatto più grave è proprio sull'ambiente, in quanto i cambiamenti climatici, l'inquinamento dei corpi idrici e l'incremento della popolazione mondiale stanno aggravando la disponibilità di acqua potabile, la quale, quindi, non può essere sprecata (Ferrandez-Gamot et al. 2015; Steffelbauer et al. 2014; Zhou et al. 2019).

La crescente attenzione verso un utilizzo attento, sostenibile ed economicamente efficiente della risorsa idrica ha reso di primaria importanza le tematiche delle perdite idriche e della gestione efficiente dei sistemi idrici. Una rete di distribuzione senza perdite è un obiettivo irrealizzabile sia tecnicamente che economicamente, tuttavia ogni gestore idrico dovrebbe essere in grado di a) calcolare accuratamente il proprio livello di perdita, b) caratterizzare e modellare correttamente le perdite idriche in funzione della pressione per una loro gestione ottimale, e c) attuare un programma di localizzazione e quindi di contenimento delle perdite, che consenta di raggiungere e mantenere livelli di efficienza elevati (Fantozzi 2004).

La valutazione del livello di perdita, ovvero la quantificazione del volume perso di acqua, viene generalmente effettuata tramite un bilancio idrico. Più nel dettaglio, esso consiste nel calcolare la differenza tra il volume che viene immesso nella rete e il volume consumato dagli utenti, ponendosi in una determinata finestra temporale (Butler 2009). Tuttavia, soltanto il flusso in ingresso alla rete è monitorato in continuo dal gestore idrico, mentre la conoscenza dei consumi delle utenze si limita alle letture dei volumi cumulati effettuate ogni 4-6 mesi a fini di bollettazione, e su finestre temporali diverse da utente a utente. Questa mancanza di accuratezza nei dati comporta l'ottenimento soltanto di una stima di massima e non affidabile del livello di perdita. Alternativamente, in mancanza di dati di consumo, è possibile applicare il metodo del MNF (Minimum Night Flow), il quale consiste nel sottrarre i consumi notturni delle utenze, generalmente stimati da letteratura, dal flusso notturno in ingresso alla rete. Anche in questo caso, tuttavia, la stima del livello di perdita è fortemente influenzata dall'accuratezza dei consumi notturni considerati (Thornton et al. 2008).

Per la modellazione e caratterizzazione delle perdite idriche, varie equazioni sono state analizzate e proposte nella letteratura scientifica per definire la relazione che intercorre tra perdita idrica e pressione, come il modello FAVAD (Fixed And Variable Area Discharges) o l'equazione di potenza (van Zyl et al. 2017; van Zyl and Malde 2017). Queste equazioni presentano generalmente una serie di parametri che devono essere stimati in funzione della rete idrica di riferimento, per ottenere una relazione la più accurata possibile. In realtà, a causa della imprecisione o della mancanza di dati relativi al livello di perdita, i gestori idrici spesso usano valori dei parametri definiti da letteratura. Questo comporta, tuttavia, l'ottenimento di relazioni tra perdita e pressione che possono essere molto distanti dall'andamento reale, e, allo stesso modo, l'ottenimento di non realistiche stime degli effetti dei cambiamenti di pressione in rete sul livello di perdita.

Per quel che riguarda la fase successiva di localizzazione, si procede generalmente con le riparazioni delle rotture evidenti, ovvero quelle che provocano allagamenti in strada o che sono state segnalate dagli utenti in quanto hanno rilevato problematiche al servizio (Salguero et al. 2019). Tuttavia solo in pochi casi gli effetti delle rotture affiorano in superficie, poiché restano più spesso “nascosti” al di sotto della superficie del terreno. Per rilevare quest’ultime, il gestore idrico generalmente utilizza metodi classici, presenti da lungo tempo nella pratica e ormai consolidati, ovvero i metodi acustici, basati sul rilievo delle onde sonore prodotte dall’acqua in uscita da una rottura. Tuttavia, le campagne di sopralluoghi e mappatura della rete tramite ricerche acustiche richiedono molto tempo e sono molto costose poiché necessitano di strumenti particolari e di personale addestrato (Guo et al. 2021; Hunaidi et al. 2004). Più recenti sono invece i cosiddetti metodi model-based, ovvero metodi basati sull’utilizzo di modelli idraulici. Più nel dettaglio, essi permettono di localizzare le perdite idriche tramite il confronto dei dati ottenuti dalle simulazioni idrauliche con i corrispettivi dati di campo (Hu et al. 2021). Per applicare questi ultimi approcci è quindi fondamentale avere a disposizione un modello che riproduca fedelmente le caratteristiche del sistema idrico. Tuttavia, i gestori normalmente hanno un modello idraulico generico e di riferimento che non caratterizza nel dettaglio lo stato della rete, in quanto consente di simulare soltanto una particolare giornata di riferimento, come quella di maggior consumo, e non segue quindi il funzionamento del sistema quasi in tempo reale.

Tuttavia, la conoscenza sempre più approfondita e in tempo reale delle reti idriche sta diventando possibile grazie al recente sviluppo tecnologico. Infatti, negli ultimi anni si è potuto assistere a una vera e propria evoluzione digitale, ovvero un enorme sviluppo tecnologico, tuttora in continuo essere. La capacità di immagazzinare informazioni è aumentata, le batterie elettriche hanno sempre più capacità, computer e software sono sempre più all’avanguardia e performanti. Più in particolare, fondamentale è stato lo sviluppo di nuovi sistemi di invio e raccolta dati come l’Internet of Things (IoT), tecnologia che permette di massimizzare le

capacità di raccolta e di utilizzo dei dati da una moltitudine di sorgenti in tempo reale.

Questo progresso sta avendo un impatto anche sul settore idrico, nel quale si assiste a una quotidiana nascita di nuove soluzioni per la digitalizzazione delle reti idriche, ovvero l'integrazione delle tecnologie digitali alle reti e agli impianti per accrescere la conoscenza stessa delle infrastrutture. Più in generale, si tratta di monitorare con precisione, in continuo e in tempo reale i principali parametri all'interno della rete, ovvero misurare valori di pressione e portata tramite sensori posizionati in vari punti all'interno della rete, e valutare l'andamento dei consumi delle utenze tramite smart meter (contatori intelligenti). Questa evoluzione sta permettendo ai gestori idrici di approfondire nel dettaglio la conoscenza del funzionamento delle loro complesse e articolate reti di distribuzione idrica.

Essendo questo sviluppo tecnologico molto recente, l'obiettivo di questa tesi è quello di analizzare quanto l'aumento della conoscenza delle reti e la disponibilità di una maggior quantità di dati di campo possano rendere più efficiente e ottimale le fasi precedentemente elencate per il contenimento delle perdite idriche, ovvero valutare quanto la digitalizzazione, l'introduzione di sistemi di monitoraggio, e l'installazione di smart meter siano efficaci e vantaggiose per la quantificazione, la caratterizzazione e la localizzazione delle perdite idriche.

Più nel dettaglio questa tematica viene sviluppata approfonditamente in primo luogo attraverso la quantificazione del livello di perdita e la caratterizzazione delle perdite idriche in una rete idrica reale monitorata a livello di singola utenza tramite smart meter. I risultati sono confrontati con quelli che si sarebbero ottenuti in mancanza dei dati accurati di consumo, per analizzare l'efficacia e l'importanza di un monitoraggio completo della rete. In secondo luogo due metodi model-based per la localizzazione delle perdite idriche vengono applicati ad un caso studio, e la loro accuratezza viene analizzata ipotizzando diversi gradi di conoscenza della rete, ovvero di accuratezza del modello idraulico considerato. Infine, vengono descritti sia i vantaggi che gli smart meter portano al gestore nell'ambito

dell'acquisizione delle informazioni sul sistema, sia le problematiche che gli stessi gestori idrici possono riscontrare nel passaggio alla digitalizzazione e nell'utilizzo di questi nuovi strumenti di misura.

### 1.1 Struttura della tesi

La tesi è organizzata in 6 capitoli, per ognuno dei quali viene fornita qui di seguito una breve descrizione della loro struttura.

Il Capitolo 1 (*Introduzione*) inquadra la tematica della ricerca e definisce le motivazioni e gli obiettivi della tesi.

Il Capitolo 2 (*Literature Review*) contiene una revisione della letteratura scientifica relativamente ai metodi per quantificare, caratterizzare e localizzare le perdite idriche nei sistemi di distribuzione acquedottistica.

Il Capitolo 3 (*Il sostegno della digitalizzazione delle reti al metodo del MNF e al modello FAVAD*) presenta un'applicazione del metodo del MNF per la quantificazione del livello di perdita, e dell'equazione potenza e del modello FAVAD per la caratterizzazione e modellazione delle perdite idriche. In particolare, i metodi sono applicati a un distretto idrico reale monitorato tramite smart meter a livello di singola utenza. I risultati ottenuti vengono confrontati con i risultati che si sarebbero ottenuti applicando i metodi senza i dati di consumo idrico forniti dagli smart meter per evidenziare l'importanza di un accurato monitoraggio.

Il Capitolo 4 (*Valutazione delle potenzialità e delle criticità dei metodi model-based per la localizzazione delle perdite*) presenta un'applicazione di due metodi model-based per la localizzazione delle perdite idriche ad un caso studio, e la loro efficienza viene analizzata considerando diversi livelli di conoscenza e di monitoraggio della rete idrica, per poter valutare varie casistiche che un gestore idrico può avere nelle sue reti.

Il Capitolo 5 (*Lo smart meter per la caratterizzazione dei consumi e la messa a punto dei modelli idraulici*) evidenzia l'importanza del monitoraggio e della

caratterizzazione dei consumi delle utenze tramite smart metering, in quanto conoscenza fondamentale per l'affinamento del modello idraulico del sistema e per la successiva localizzazione delle perdite, ma descrive anche alcune delle maggiori problematiche che possono essere riscontrate dai gestori idrici in merito all'utilizzo degli smart meter, all'apprendimento dei loro software e alle capacità di invio dei dati in situazioni di installazione reale e non teoriche.

Il Capitolo 6 (*Conclusioni*) riassume i principali risultati e le conclusioni di questo lavoro.



## **Literature Review**

Questo capitolo contiene una revisione della letteratura esistente relativa alle fasi di quantificazione, caratterizzazione, e localizzazione delle perdite idriche necessarie per una gestione efficiente, attenta e sostenibile dei sistemi di distribuzione acquedottistica. Inoltre viene presentata una breve panoramica sull'importanza dell'utilizzo di sistemi di acquisizione dati e degli smart meter, e della loro integrazione alle metodologie di contenimento perdite.



I sistemi di distribuzione acquedottistica hanno lo scopo di erogare acqua potabile direttamente all'utente e provvedere così ai suoi fabbisogni idrici. Tuttavia, la disponibilità di acqua potabile si sta aggravando. Infatti, da una parte l'uso di acqua potabile è in continuo aumento a causa dell'incremento della popolazione mondiale e del suo utilizzo nell'industria, mentre, dall'altra parte, le risorse idriche stanno diminuendo e sono sottoposte a grandi stress a causa dei cambiamenti climatici, ovvero dell'aumento delle temperature, e dell'inquinamento. I gestori idrici sono quindi chiamati ad intervenire sulle proprie reti, al fine di garantire un utilizzo efficiente e responsabile della risorsa idrica, e limitare al minimo il suo spreco tramite la riduzione delle perdite idriche.

Più nel dettaglio, le perdite idriche rappresentano l'acqua potabile che viene persa dal gestore idrico poiché fuoriesce dalla rete idrica senza un'azione controllata. L'IWA ha classificato le perdite idriche in due categorie, ovvero perdite apparenti e reali (Canto Ríos et al. 2014; Lambert 2002). Con perdite apparenti si intendono i volumi idrici che sono stati effettivamente consumati ma non contabilizzati. Essi possono fare riferimento ad esempio ai volumi d'acqua utilizzati per servizi pubblici quali idranti, lavaggio strade o fontane, i quali sono autorizzati dal gestore idrico ma non vengono misurati. Anche gli allacci abusivi, rappresentativi di acqua prelevata illegalmente rientrano in questa categoria, così come i volumi d'acqua consumati dagli utenti ma non misurati a causa di imprecisioni e malfunzionamenti dei contatori. Dall'altra parte, con perdite reali si intende l'acqua che effettivamente fuoriesce dal sistema di distribuzione disperdendosi nel

sottosuolo a causa di corrosione, deterioramento, rotture nelle tubazioni o di giunzioni difettose.

Il livello di perdita idrica medio in Italia si attesta intorno al 42%, ovvero per ogni 100 litri immessi nel sistema, ben 42 non sono consegnati agli utenti finali (Istat 2019). La situazione è simile anche all'estero, in quanto in Europa il livello di perdita medio è circa il 26% e alcune grandi città del Nord America hanno riportato tassi di perdita del 30% e oltre. Inoltre, in alcuni paesi in via di sviluppo, le perdite idriche arrivano a raggiungere addirittura il 70% (Nickel Institute 2020).

Per quanto non possa esistere un acquedotto senza perdite, è fondamentale che il gestore controlli il livello di perdita presente nelle sue reti (Fantozzi 2004). Infatti, l'entità delle perdite idriche ha grandi ripercussioni sia sociali, in quanto possono causare danni e irregolarità nel servizio agli utenti, sia economiche, in quanto l'acqua persa, oltre ad essere stata potabilizzata e pompata, non viene fatturata, ma soprattutto ambientali, in quanto si tratta di spreco di una risorsa fondamentale per la vita e non inesauribile.

Per ottimizzare la gestione della risorsa idrica e ridurre lo stato di perdita presente all'interno del sistema acquedottistico, è necessario seguire 3 step fondamentali che verranno descritti nei paragrafi successivi: quantificare il livello di perdita, caratterizzare le perdite idriche e, infine, localizzarle per poter procedere alla loro riparazione.

### **2.1 Quantificazione del livello di perdita**

Con quantificazione del livello di perdita si intende la valutazione della quantità di acqua potabile che viene persa all'interno della rete. Vari metodi sono stati presentati nella letteratura scientifica, i quali differiscono in base alle informazioni necessarie sul sistema idrico e all'analisi effettuata su di essi.

Il metodo più utilizzato e diffuso per quantificare il livello di perdita è il bilancio idrico, che consiste nel calcolare la differenza tra il volume idrico immesso nella rete e quello consumato dagli utenti in un assegnato intervallo temporale, ricavando una perdita identificativa di tutto il sistema acquedottistico. Per poter confrontare dati di realtà diverse a livello internazionale, l'IWA ha introdotto un approccio standard per la sua applicazione (AL-Washali et al. 2016; Lambert and Hirner 2000), definendo con il termine “non-revenue water” la perdita idrica composta dalle due componenti reale e apparente, come descritto precedentemente.

L'applicazione del bilancio idrico è una fase fondamentale per arrivare a conoscere il livello di efficienza del sistema idrico e capire come agire successivamente per il contenimento delle perdite idriche, in quanto solo conoscendo l'entità della portata persa è possibile generare strategie di riduzione perdite e settare target realistici per il futuro (Fantozzi 2004; Liemberger 2002).

Tuttavia, normalmente, i gestori hanno a disposizione un quantitativo limitato di dati di consumo delle utenze, composto dai volumi cumulati raccolti a solo scopo di bollettazione su finestre temporali di circa 4 o 6 mesi diverse da utente a utente. Questo si traduce in una stima del livello di perdita che può essere effettuata solo su di un lungo periodo, influenzata da tutte le incertezze connesse ai dati utilizzati. Inoltre, non sempre il valore del volume cumulato a disposizione è una lettura reale. Infatti, nei casi in cui non sia stato possibile accedere al contatore, il valore viene stimato in base ai consumi dei periodi precedenti oppure viene considerato un valore medio di riferimento a seconda della tipologia dell'utenza. Tuttavia questa stima può risultare molto erronea in caso di improvvisi cambiamenti nei consumi dovuti a forze esterne o circostanze eccezionali. Queste variazioni sono molto difficili da stimare se non attraverso un monitoraggio di dettagliato dei consumi delle utenze.

Per questo motivo, sono stati sviluppati approcci che permettono di calcolare l'entità della perdita presente nella rete utilizzando soltanto informazioni del flusso in ingresso, ovvero senza necessitare dei dati di consumo delle utenze. In

genere questi metodi si applicano a livello di DMA (District Metered Area), ovvero a livello di distretti idrici isolati dal resto del sistema, normalmente serviti da un unico ingresso in modo da poter facilmente misurare la portata totale immessa nella rete (Thornton et al. 2008).

Nel metodo proposto da Buchberger e Nadimpalli (2004), l'entità della perdita idrica presente nel distretto considerato è calcolata tramite un'analisi statistica della serie temporale della portata in ingresso in orario notturno. Per quanto il metodo sia molto accurato, i valori della portata devono essere campionati ad alta frequenza, ovvero ogni 5-10 secondi; spesso questa frequenza non è ammissibile dai misuratori generalmente installati dai gestori, che, anche nei casi più "smart", arrivano ad un campionamento ogni 5-10 minuti. Inoltre è anche difficile per il gestore idrico immagazzinare e gestire questa enorme mole di dati. Diversamente, nel metodo proposto da Mazzolani et al. (2016, 2017), la serie temporale della portata in ingresso può essere raccolta ad un passo più ampio, fino a un intervallo di 60 minuti. L'approccio utilizzato consiste in un data assimilation, ovvero tutti i dati osservati vengono accumulati in un modello matematico che rifletta le caratteristiche fisiche della rete, la cui risoluzione permette di identificare i consumi delle utenze, e quindi, per differenza, il livello di perdita. Tuttavia, è necessario sottolineare che il metodo può essere applicato soltanto in periodi nei quali non sono avvenuti cambiamenti sul livello di perdita presente, ovvero non si sono formate o riparate perdite. Inoltre, il valore del volume perso ricavato contiene anche le perdite interne alle utenze.

Un altro metodo che è possibile applicare se i dati di consumo delle utenze non sono a disposizione del gestore idrico, è quello del MNF. Più nel dettaglio, il MNF è il flusso minimo che entra nel distretto, che normalmente si ha tra le ore 2 e le ore 4 di notte, quando i consumi sono al minimo e quindi le perdite sono una percentuale elevata di questa portata immessa. La perdita viene valutata sottraendo da questo flusso i consumi notturni delle utenze, generalmente stimati da letteratura. Diversi valori sono suggeriti a seconda del caso studio considerato

per la loro stima e dell'area geografica, con il valore più comune pari a 1.7 L/h per utenza (Butler 2009).

L'accuratezza della stima del livello di perdita dipende dall'accuratezza di questi valori ed è necessario sottolineare che essi non tengono in considerazione eventuali consumi notturni irregolari come perdite idriche interne alle abitazioni o irrigazione notturna. Inoltre è difficile stimare il consumo notturno di particolari utenze commerciali o di aree industriali, e quindi il metodo è applicato per lo più a distretti residenziali.

In questa tesi, nel Capitolo 3, il metodo del MNF appena presentato verrà applicato ad un caso studio reale. Disponendo di informazioni dettagliate sul consumo delle utenze grazie al monitoraggio con smart meter, sarà possibile valutare l'efficacia e l'affidabilità dei valori di consumo stimati da letteratura, fornendo quindi ai gestori un'indicazione sugli errori che si possono commettere nell'applicazione di questo metodo, ed evidenziando l'importanza di un monitoraggio accurato dei consumi delle utenze.

## **2.2 Caratterizzazione delle perdite idriche**

Per ottenere una gestione efficiente della risorsa idrica, successivamente alla fase di valutazione della quantità di acqua persa, è necessario caratterizzare le perdite idriche. Più nel dettaglio, questa seconda fase consiste nell'identificare l'evoluzione della perdita idrica al variare della pressione della rete.

Infatti, nei sistemi di distribuzione acquedottistici viene mantenuto un livello di pressione tale da soddisfare su tutta la rete e in ogni momento della giornata un valore minimo, necessario per l'erogazione a tutti gli utenti. Tuttavia questo livello minimo viene raggiunto solo in alcuni periodi, ovvero in corrispondenza dei momenti di maggior consumo. Di conseguenza durante il resto della giornata la rete risulta sottoposta ad un eccesso di pressione rispetto a quanto necessario. Riducendo, quindi, gli eccessi di pressione nell'arco della giornata è possibile ridurre i volumi d'acqua persi (Portolano 2018).

Per poter valutare quantitativamente gli effetti che un cambiamento della pressione, sia esso riduzione o innalzamento, provoca sul livello di perdita, è necessario definire matematicamente la relazione tra pressione e perdita. A questo scopo esistono vari modelli in letteratura. La classica equazione Torricelliana, la quale descrive la portata uscente da un orifizio in funzione della pressione a cui è sottoposto, nella pratica non fornisce un modello soddisfacente per il comportamento della perdita idrica in un sistema idrico (van Zyl and Cassa 2011). Essa quindi è stata generalizzata nell'equazione di potenza, ovvero una legge monomia tra pressione e perdita idrica. Questo modello è tuttora il più utilizzato da parte dei gestori idrici per la caratterizzazione delle perdite ed è stato adottato anche dall'IWA (Deyi et al. 2014; Greyvenstein and van Zyl 2007). È necessario sottolineare, tuttavia, che, per la sua origine, questo modello consiste in una pura equazione empirica la quale non ha rapporti con la meccanica dei fluidi, e quindi non tiene conto, ad esempio, delle proprietà del materiale o delle proprietà idrauliche del sistema.

Per analizzare più nel dettaglio il meccanismo che lega pressione e volume perso e ottenere un modello più rappresentativo fisicamente, sono stati condotti studi sperimentali basati sugli elementi finiti (Cassa and van Zyl 2013; Ferrante 2012a; Ferrante et al. 2013). Grazie a questi, si è potuta confermare, per i materiali elastici, una relazione lineare tra area della rottura e il carico a cui la condotta è sottoposta. Il modello più dettagliato che considera questo comportamento è il modello FAVAD, inizialmente proposto da May (1994) e poi studiato ed analizzato nei suoi dettagli da van Zyl (van Zyl et al. 2017; van Zyl and Cassa 2014, 2011). Questo modello è quindi rappresentativo del comportamento delle perdite presenti nei materiali elastici. Al contrario, le rotture presenti nelle condotte in materiale plastico, come PVC o PEAD, possono presentare isteresi, ovvero è necessario per loro un modello che dipenda non più solo dalla pressione e dall'area della rottura ma anche dalla storia del carico, cioè tempo e sua variazione (Ferrante et al. 2011).

Ancora oggi si continuano a ricercare equazioni e modelli sempre più dettagliati, in funzione di parametri sempre più specifici del materiale quali il modulo di

Young o il diametro interno, per cercare di riprodurre il più fedelmente possibile il comportamento fisico delle perdite idriche (Cassa and van Zyl 2008, 2013; Ferrante et al. 2011).

È evidente, quindi, che per la caratterizzazione delle perdite sia fondamentale individuare la legge più adatta possibile al sistema idrico di distribuzione. Nondimeno, un altro aspetto molto importante è la stima dei parametri a cui le equazioni fanno riferimento. Questi parametri, infatti, devono essere determinati specificatamente in funzione della rete che si sta considerando, per poter valutare realisticamente gli effetti che il controllo della pressione genera sul livello di perdita.

In questa tesi, nel Capitolo 3, i parametri dell'equazione di potenza e del modello FAVAD sopra descritti verranno calcolati per un caso studio reale di cui si dispongono dati di campo grazie al monitoraggio con smart meter. I parametri verranno valutati con diversi approcci, differenti per il numero di dati considerati dal monitoraggio accurato della rete.

## **2.3 Localizzazione delle perdite idriche**

Le due fasi sopra delineate di quantificazione del livello di perdita e di caratterizzazione delle perdite idriche sono passaggi fondamentali per ottenere una fotografia precisa e una descrizione dettagliata dello stato attuale della rete. Queste due fasi da sole non sono sufficienti, tuttavia, per agire e contenere le perdite idriche, in quanto è anche necessario che siano localizzate e quindi riparate. È bene, tuttavia, sottolineare che la localizzazione delle perdite non è l'unica azione necessaria per contrastare le perdite ed evitare che permangano a lungo tempo. Infatti, le perdite più piccole non sono direttamente localizzabili, anche se rappresentano purtroppo la maggior parte dei volumi di perdita alla scala annuale. In questo caso è necessario un controllo adeguato della pressione nella rete e l'applicazione di piani di riabilitazione efficaci per la diretta sostituzione di condotte.

## Capitolo 2

I metodi di localizzazione sono comunque fondamentali per individuare all'interno della rete la posizione di tutte le perdite di maggiore entità all'interno della rete. Diversi di questi metodi sono stati sviluppati in letteratura, che variano in funzione del tipo di dato utilizzato, dell'analisi dei dati effettuata e della loro precisione.

Il metodo classico e più utilizzato dai gestori idrici per la localizzazione delle perdite idriche è il metodo acustico. Esso si basa sul principio che un flusso fuoriuscente da una condotta in pressione genera un'onda acustica nel suo passaggio attraverso la rottura. Particolari sensori acustici posizionati all'esterno della condotta possono individuare queste onde durante la loro propagazione e determinare la loro origine, in quanto il segnale è più potente quanto più è vicino alla rottura (Li et al. 2015; Yang et al. 2013).

Tra i sensori acustici che possono essere utilizzati, i geofoni, sia meccanici che elettronici, sono i più economici. Essi sono altamente sensibili e permettono di ascoltare le onde sonore all'interno delle condotte nel sottosuolo. Ovviamente, la loro accuratezza nella localizzazione delle perdite dipende dall'esperienza e dall'interpretazione dell'operatore (El-Zahab and Zayed 2019). Uno strumento molto più potente ma altamente costoso è, invece, il correlatore, il quale automaticamente individua la posizione della perdita. Esso è composto da due idrofoni o accelerometri, i quali vengono posizionati a diretto contatto con la condotta (di solito su idranti o valvole) in due posizioni diverse che delimitano il punto in cui si sospetta la presenza di una perdita, non superando generalmente i 500 m di distanza. I segnali registrati vengono poi trasmessi direttamente al correlatore, il quale li confronta. Poiché, nella maggior parte dei casi, la perdita è situata in modo asimmetrico tra i due punti di misura, è presente un ritardo temporale tra i segnali di perdita misurati. Il correlatore permette di calcolare questo sfasamento temporale, e, di conseguenza, anche la posizione della perdita lungo la tubazione (Gao et al. 2004, 2005, 2017)

È bene sottolineare che, per avvalersi di questi metodi acustici, è necessario avere già delimitato il campo di ricerca, ovvero devono essere applicati a un range

limitato di condotte, in quanto richiedono molto tempo. Inoltre vengono generalmente utilizzati per perdite che si verificano in condotte metalliche, in quanto le condotte in materiale plastico tendono a smorzare e attenuare molto le onde sonore (Hunaidi and Chu 1999).

Altri metodi molto accurati come quelli acustici appena descritti, ma più invasivi, consistono nell'utilizzo di gas traccianti o di radar. Nel primo caso, un gas non tossico, insolubile e più leggero dell'aria, come elio o idrogeno, viene iniettato all'interno della condotta. Esso successivamente fuoriesce in corrispondenza della rottura, permeando sulla superficie del terreno, ed è così possibile individuare la sua posizione utilizzando rilevatori di gas molto sensibili. Nel secondo caso, vengono utilizzate onde elettromagnetiche per identificare cambi nelle proprietà magnetiche del suolo attorno alla condotta, ovvero cambiamenti di densità e di contenuto d'acqua dovuti alla perdita idrica (Adedeji et al. 2017; Puust et al. 2010).

Alternativamente, una tecnica di localizzazione non invasiva e semplice da performare è basata sui transitori. Infatti, quando il sistema idrico è sottoposto a una perturbazione, le onde di pressione che si propagano lungo le condotte vengono riflesse quando incontrano la presenza delle perdite idriche (Gong et al. 2013; Jonsson and Larson 1992; Meniconi et al. 2018, 2021b; a). Generando, quindi, dei transitori artificiali all'interno della rete, tramite ad esempio la chiusura o apertura di valvole, e analizzando ad alta frequenza le variazioni di pressione che si verificano nel sistema, è possibile determinare la posizione della perdita. Queste tecniche consentono così in poco tempo di ottenere informazioni su lunghi tratti di condotte, fino a migliaia di metri di lunghezza (Bohorquez et al. 2020; Brunone and Ferrante 2001; Covas and Ramos 2010; Ferrante et al. 2007). Per effettuare queste analisi diversi approcci possono essere adottati come l'inverse transient analysis (Covas and Ramos 2001; Kapelan et al. 2003; Liggett and Chen 1994) la frequency domain analysis (Covas et al. 2005; Mpesha et al. 2001), la wavelet analysis (Meniconi et al. 2011, 2015), oppure anche utilizzando

tecniche di machine learning (Levinas et al. 2021; Manzi et al. 2019). Tuttavia, questi metodi possono essere difficili da applicare nel caso di reti complesse o magliate, in quanto i transitori di pressione indotti potrebbero essere fortemente smorzati oppure le onde di pressione potrebbero essere riflesse per altre cause, come la regolazione di valvole, giunzioni di condotte o cambiamenti nel consumo idrico (Wu et al. 2010).

Grazie al progresso dei processi digitali e alla continua innovazione tecnologica, si sta diffondendo l'uso dei metodi data-driven (Li et al. 2015). Queste tecniche processano i dati acquisiti sulla rete in modo da identificare i valori che si discostano dal normale andamento delle portate e delle pressioni e che possono essere causati dalla formazione di una perdita. Si possono applicare sia semplici analisi statistiche per identificare gli outlier, ossia le variazioni indotte dalla presenza di perdite (Lee et al. 2016; Loureiro et al. 2016) sia modelli più complessi come le reti neurali o gli alberi decisionali. Questi ultimi vengono inizialmente addestrati tramite i dati storici a disposizione del gestore, affinché possano imparare ad identificare l'influenza delle perdite, e vengono poi usati o per classificare direttamente i dati misurati sulla rete (Aksela et al. 2009; Mounce et al. 2002), o per prevedere i valori di pressione e portata che la rete dovrebbe mostrare in condizioni normali e confrontarli con i valori effettivamente misurati (Mounce et al. 2002; Ye and Fenner 2011). Tuttavia, soprattutto per quanto riguarda questi ultimi due casi, sono necessari lunghi tempi di calcolo ed elevate capacità computazionali, oltre alla disponibilità di una grande quantità di dati storici relativi sia a situazioni standard sia a diversi casi di perdite; tali dati non sono sempre a disposizione dei gestori (Chan et al. 2019; Wu and Liu 2017).

Recentemente, per la localizzazione delle perdite stanno avendo sempre più interesse i metodi model-based. In generale, questi metodi consentono di determinare la posizione delle perdite in un distretto idrico utilizzando dati di campo di portata e pressione e i corrispondenti valori simulati da un modello idraulico (Chan et al. 2019; Hu et al. 2021). Più nel dettaglio i dati di campo di

portata e pressione misurati tramite sensori a bassa frequenza di campionamento (ad esempio di 5 o 15 minuti) vengono confrontati con i corrispettivi valori simulati dal modello idraulico della rete, il quale è stato precedentemente calibrato in termini sia di caratteristiche della rete che di andamenti dei consumi. Nella maggior parte dei casi, vengono considerati solo i dati ricavati da sensori di pressione, in quanto sono più economici rispetto ai misuratori di portata, e possono essere facilmente installati in diversi punti della rete e distribuiti in modo uniforme.

Normalmente, i valori di pressione misurati concordano con quelli simulati se il modello è accurato e rappresenta realisticamente il comportamento fisico della rete. Tuttavia, se si forma una nuova perdita nella rete di cui non si conosce né l'entità né la posizione, i valori misurati non coincideranno più con quelli simulati. Infatti, la perdita idrica aumenterà le perdite di carico nella rete, portando a valori di più pressione misurata più bassi. Sebbene entità e posizione della nuova perdita non siano noti, il modello idraulico può essere utilizzato per simulare molteplici e diversi scenari di perdita, permettendo la sua localizzazione nel nodo o nella condotta della rete che minimizza le differenze tra i valori di pressione simulati e osservati.

Proprio per il concetto alla base di questi metodi, ovvero il fatto che i valori simulati vengono confrontati con i reali valori della rete, la loro efficienza e performance è fortemente influenzata da vari aspetti.

Nel Capitolo 4, tramite l'applicazione di due metodi model-based ad un caso studio sintetico, si analizzerà, infatti, come l'efficienza di questi metodi vari a seconda del numero dei sensori di pressioni installati nella rete, dell'accuratezza dei dati di pressione misurati, e, soprattutto, del livello di accuratezza del modello idraulico. Infatti, il modello idraulico deve essere in grado di rappresentare realisticamente il comportamento fisico della rete e deve quindi contenere sia dettagli accurati delle caratteristiche delle condotte in termini di planimetria, lunghezze, diametri e scabrezze, sia accurati andamenti del consumo idraulico delle utenze.

In realtà, i gestori idrici non dispongono normalmente di modelli idraulici accurati delle loro reti. Se, da una parte, le caratteristiche fisiche della rete, come le lunghezze, i diametri e i materiali delle condotte, possono essere ottenute da un database GIS (sistema informativo geografico) aggiornato, dall'altra parte è difficile avere informazioni sui consumi idrici. Infatti, le letture periodiche dei contatori sono effettuate su lunghi intervalli temporali, in genere di 6 mesi, mentre i modelli idraulici sono utilizzati per stimare il funzionamento della rete su brevi intervalli temporali, come 5 minuti (simulazioni con intervalli temporali superiori restano validi per finalità diverse, come ad esempio la pianificazione della riabilitazione o lo studio di strategie di distrettualizzazione delle reti). Ecco che, quindi, la caratterizzazione della domanda e la sua allocazione nel modello idraulico sono punti cruciali per ottenere una corretta modellazione idraulica rappresentativa del sistema di riferimento (Kara et al. 2016).

L'allocazione delle domande ai nodi del modello è generalmente effettuata attraverso due diversi approcci, definiti top-down e bottom up a seconda dei dati a disposizione dal gestore.

L'approccio top-down prevede che si parta dall'alto, ovvero dall'ingresso della rete, per poi scendere fino ai singoli nodi, ovvero arrivare alle utenze. Infatti, in generale, il gestore dispone della serie temporale del flusso in ingresso al sistema idrico, anche a passi temporali brevi come 5-10 minuti. Grazie a questa è possibile sia calcolare la quantità di acqua immessa nella rete e disaggregarla nei vari nodi, sia ricavare un pattern di domanda rappresentativo di tutto il sistema (Blokker et al. 2011; Walski et al. 2007). Questo approccio, tuttavia, non considera la casualità dei consumi idrici e la loro variabilità. Infatti, viene assunto che tutti i nodi siano caratterizzati da un unico pattern di domanda, implicando che siano strettamente correlati tra di loro. Nei sistemi reali, invece, gli utenti rispondono diversamente alle condizioni circostanti in base alle loro preferenze, abitudini sociali e situazioni economiche (Filion et al. 2007)

Nell'approccio bottom up invece, al contrario del precedente, si parte direttamente dalle singole utenze. In particolare, il pattern di domanda di ogni singolo utente viene modellato riproducendo l'utilizzo degli elettrodomestici e degli impianti

normalmente presenti nelle abitazioni (come lavastoviglie, lavatrici, docce, ecc...), ovvero determinandone stocasticamente l'orario di avvio, intensità e durata (Alvisi et al. 2014; Blokker et al. 2010). Questi metodi tuttavia possono richiedere grandi oneri computazionali (Fiorillo et al. 2020).

Questi approcci, nonostante siano largamente utilizzate, non permettono di riflettere il vero comportamento dinamico del sistema e rappresentare la vasta eterogeneità e volatilità delle domande idriche. Il monitoraggio completo della rete tramite l'utilizzo di smart meter permetterebbe di avere informazioni quasi in tempo reale sull'andamento del consumo delle utenze, le quali possono essere utilizzate per aggiornare continuamente il modello idraulico permettendo un notevole aumento della sua precisione e quindi dell'efficacia della localizzazione delle perdite idriche. Negli ultimi anni, vari gestori idrici nel mondo hanno iniziato a installare smart meter su larga scala, e si è già potuta constatare l'importanza e l'utilità dell'utilizzo di questi strumenti tecnologici. Si sono infatti creati sistemi e applicazioni per l'assegnazione dinamica delle domande nei modelli idraulici, ovvero per l'assegnazione ai nodi dei dati di consumo inviati direttamente dagli smart meter, senza la necessità di interrompere l'esecuzione della simulazione idraulica (Shafiee et al. 2020). Disporre, inoltre, di smart meter a livello di singola utenza, e avere quindi il dato in near real-time del consumo idrico, permette sia di migliorare i risultati della modellazione idraulica sia di ottimizzare la pianificazione e la gestione dei sistemi di distribuzione (Kirstein et al. 2021; Song et al. 2022).

È stato possibile anche riscontrare l'importanza del monitoraggio delle utenze tramite smart meter durante periodi eccezionali o situazioni di emergenza, quali, ad esempio, il periodo di lockdown dovuto alla pandemia di COVID-19. Infatti gli smart meter hanno permesso non soltanto di avere comunque il dato di consumo disponibile, nonostante il distanziamento sociale imposto, ma anche di poter valutare in tempo reale i cambiamenti nelle abitudini delle utenze e dare tempestivamente la possibilità ai gestori di fronteggiarli tramite manovre e

regolazioni del sistema (Balacco et al. 2020; Kalbusch et al. 2020). Lo stesso periodo di pandemia ha inoltre evidenziato ancora di più l'importanza di disporre di infrastrutture automatizzate e sistemi di acquisizione dati finalizzati a una modellazione quasi in tempo reale per facilitare la gestione e gli interventi (Berglund et al. 2021).

Nel Capitolo 5 verrà mostrato in un caso studio reale come l'utilizzo di smart meter abbia consentito di analizzare la variazione i consumi delle utenze durante il caso eccezionale della pandemia da COVID-19.

Nonostante nei prossimi capitoli verrà analizzata nel dettaglio l'importanza dello smart meter per l'acquisizione quasi in tempo reale del dato, è bene non dimenticare che questi nuovi contatori intelligenti possono rappresentare una sfida per i gestori. Infatti, da una parte la grande mole di dati che essi permettono di ottenere deve essere gestita, accumulata e analizzata, mentre dall'altra parte si possono presentare problematiche relative alla loro configurazione, all'invio dei dati, e alla durata della batteria (Andrić et al. 2022; Kirstein et al. 2021). Un'analisi più dettagliata dei problemi che i gestori idrici possono riscontrare nell'utilizzo degli smart meter verrà presentata nel Capitolo 5.

## **Il sostegno della digitalizzazione delle reti al metodo del MNF e al modello FAVAD**

In questo capitolo, il metodo del MNF per la quantificazione del livello di perdita, e l'equazione di potenza e il modello FAVAD per la caratterizzazione delle perdite idriche vengono presentati e analizzati nel dettaglio. Essi vengono poi applicati ad un caso studio reale, ovvero il distretto idrico di Gorino Ferrarese (FE) il quale è stato monitorato a livello di singola utenza tramite smart meter.

I risultati dell'applicazione come da letteratura di queste metodologie vengono confrontati con quelli ottenuti integrando le informazioni dettagliate sul consumo delle utenze. Più nel dettaglio, vengono valutati sia l'affidabilità dei valori del consumo notturno delle utenze definiti da letteratura per il MNF, sia diversi approcci per il calcolo dei parametri dei due modelli di caratterizzazione delle perdite.

Questo capitolo è basato sulla seguente pubblicazione su rivista scientifica:

Marzola, I., Alvisi, S., Franchini, M. (2021) "Analysis of MNF and FAVAD Model for Leakage Characterization by Exploiting Smart metered Data: The Case of the Gorino Ferrarese (FE-Italy) District", Water – MDPI.



Per ottimizzare ed efficientare la gestione della risorsa idrica in un sistema di distribuzione acquedottistica, come descritto nel capitolo precedente, è necessario in una prima fase quantificare il livello di perdita, ovvero valutare la quantità di acqua persa nel sistema, e, in una seconda fase, caratterizzare le perdite idriche, ovvero identificare l'andamento e l'evoluzione della portata persa in funzione della pressione tramite espressioni matematiche, per poter così valutare gli effetti di una variazione delle pressioni esercitate nella rete.

In particolare, tra le varie tecniche esistenti, in questo studio è stato considerato il metodo del MNF per la quantificazione, mentre per la caratterizzazione sono stati analizzati l'equazione di potenza e il modello FAVAD.

Nell'applicazione di questi metodi vengono normalmente utilizzati dei dati definiti da letteratura o stimati. In questo modo tuttavia, i risultati che si ottengono possono essere connessi a molte incertezze. Si è deciso quindi di analizzare quanto la precisione di questi metodi possa migliorare disponendo di dettagliate informazioni sul consumo idrico delle utenze.

Infatti, i metodi sono stati applicati a un distretto idrico reale, completamente monitorato tramite smart meter a livello di singola utenza. In tal modo è stato possibile, in primo luogo, analizzare nel dettaglio il funzionamento dei metodi e le loro problematiche, e, successivamente, confrontare i risultati ottenuti dall'applicazione standard con quelli ottenuti integrando le informazioni dei consumi idrici ottenute dall'ampio monitoraggio.

Qui di seguito sono descritti nel dettaglio i metodi considerati, il caso studio e le analisi effettuate. I risultati ottenuti sono poi commentati e alcune conclusioni vengono tratte.

### 3.1 Metodi

#### 3.1.1 MNF

Il metodo del MNF si applica generalmente a livello di distretto idrico, ovvero una parte della rete isolata dal resto del sistema, normalmente alimentata da un'unica condotta in ingresso, in modo tale da poter misurare agevolmente la portata totale immessa. Infatti, il MNF è la portata minima entrante nel sistema, che si verifica generalmente in orario notturno tra le ore 2:00 e 4:00, ovvero quando i consumi sono al minimo e le perdite sono una percentuale elevata di questa portata immessa (Thornton et al. 2008). La portata persa totale nel sistema può essere valutata sottraendo dal minimo flusso in ingresso dei ragionevoli consumi notturni delle utenze, generalmente stimati da letteratura. Infatti diversi valori sono suggeriti nella letteratura scientifica a seconda dello studio considerato e della località in cui è stato effettuato.

Per quel che riguarda le utenze residenziali, tipicamente il 6% della popolazione è attivo durante la notte e l'attività è quasi totalmente legata all'utilizzo della toilette, di circa 10 L (Maggs 2007). Ecco perché in letteratura un valore di 0.6 L/h per persona è suggerito, oppure, considerando una proprietà composta da 2.5 persone, un valore di 1.7 L/h per utenza. Questo è il valore utilizzato nel Regno Unito (Butler 2009), mentre altre stime internazionali del consumo notturno (riassunte in **Tabella 3.1**) variano da 3 L/h per utenza del Canada, a 5 L/h per utenza della Malesia, e a 0.4 e 0.8 L/h per persona rispettivamente in Germania e Austria (Fantozzi and Lambert 2012).

**Tabella 3.1.** Consumi notturni stimati per le utenze a seconda della località

Località	Consumo notturno
Regno Unito	1.7 L/h per utenza
Canada	3 L/h per utenza
Malesia	5 L/h per utenza
Germania	0.4 L/h per persona
Austria	0.8 L/h per persona

Per quel che riguarda le attività commerciali, in letteratura è suggerito un valore generale di 8 L/h per tutte le attività (Fantozzi and Lambert 2012; Maggs 2007), oppure, come nel caso del Regno Unito, i consumi notturni sono differenziati i valori a seconda del tipo di attività specifico, come ad esempio 0.9 L/h per chiese, giardini e banche, 6.2 L/h per negozi e uffici, 12.6 L/h per hotel e ristoranti e 20.5 L/h per ospedali e bagni pubbliche (Butler 2009).

L'accuratezza della stima del livello di perdita dipende dall'accuratezza di questi valori ed è necessario sottolineare che essi non tengono in considerazione eventuali consumi notturni irregolari come perdite idriche interne alle abitazioni o irrigazione notturna.

### 3.1.2 Equazione di Potenza

L'equazione di base da cui partire per descrivere una relazione matematica tra perdita e pressione è l'equazione di Torricelli, la quale definisce la portata fuoriuscente da un foro nel fondo di un serbatoio.

$$Q = C_q A \sqrt{2gh} \quad 1)$$

In questa equazione  $Q$  è la portata fuoriuscente dal foro,  $A$  è l'area del foro stesso,  $g$  è l'accelerazione di gravità, e  $h$  carico di pressione del serbatoio. Essa deriva

dal principio di conservazione di energia, ovvero trasformando l'energia potenziale data dal contenuto d'acqua nel serbatoio in energia cinetica posseduta dal getto in uscita. Il coefficiente di portata  $C_q$  viene introdotto per tenere conto delle perdite di energia.

Tuttavia, per poter applicare questa equazione a un'effettiva perdita in un sistema acquedottistico sorgono diversi problemi, quale l'effettiva applicabilità ad una rottura su una condotta e gli effetti del terreno e di possibile acqua di falda attorno alla tubazione. Poiché si è verificato che questa equazione non forniva un modello efficiente del comportamento delle perdite nelle reti idriche (van Zyl and Cassa 2011), è stata introdotta un'equazione più generale, l'equazione di potenza:

$$Q = Ch^{N1} \quad 2)$$

Essa presenta due parametri, ovvero il coefficiente della perdita  $C$  e l'esponente della perdita  $N1$ , mentre  $h$  è il carico di pressione relativo nella condotta.

Il valore di  $N1$  in campo differisce anche significativamente dal valore standard di 0.5, come definito inizialmente nell'Equazione 1. Generalmente assume valori più alti, per la maggior parte compresi tra 0.5 e 1.5, ma in ambito pratico si sono ritrovati valori di  $N1$  tra 0.36 e 2.95 (Farley and Trow 2003). Questa variazione è dovuta al fatto che la dimensione e la forma della rottura incidono fortemente sul valore di  $N1$ , unitamente al comportamento del materiale, alla distribuzione spaziale delle perdite e a eventuali errori di misura (van Zyl and Clayton 2007).

Al fine di applicare questa legge a un sistema di distribuzione acquedottistico, i valori dei coefficienti  $C$  ed  $N1$ , ovvero i parametri dell'equazione, devono essere preliminarmente stimati.

Generalmente, sia nella pratica che nella letteratura, questi coefficienti sono stimati effettuando una manovra di riduzione della pressione in orario notturno. Più nel dettaglio, è necessario misurare sia il carico di pressione medio notturno prima ( $h_1$ ) e dopo ( $h_2$ ) la manovra, sia il flusso in ingresso notturno, ovvero il MNF, prima e dopo la manovra. Vengono poi sottratti al MNF i consumi notturni

stimati da letteratura (come descritto nel paragrafo precedente) per ricavare una stima della perdita idrica presente nella rete prima ( $Q_1$ ) e dopo ( $Q_2$ ) la manovra. Questi valori sono utilizzati nelle seguenti equazioni per il calcolo dei coefficienti dell'equazione di potenza per la caratterizzazione delle perdite idriche (Levin 2019):

$$N1 = \frac{\ln\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \quad 3)$$

$$C = \frac{Q_1}{h^{N1}} \quad 4)$$

Nonostante il grande uso in campo dell'equazione di potenza, in quanto riconosciuta ed utilizzata anche dall'IWA, essa presenta degli svantaggi (Schwaller et al. 2015; van Zyl and Malde 2017). Innanzitutto, l'equazione non è dimensionalmente pulita. Inoltre rendere l'esponente una variabile taglia i rapporti con la meccanica dei fluidi, facendo diventare l'equazione puramente empirica.

### 3.1.3 Modello FAVAD

Poiché, come riportato precedentemente, la variazione dell'area della rottura incide molto sull'equazione di potenza, ulteriori studi sono stati portati avanti per analizzare ancora più nel dettaglio la relazione tra pressione e perdita. Le tubazioni, infatti, sono sottoposte alla pressione dell'acqua che causa degli stress al materiale. Un innalzamento della pressione può essere un fattore nella creazione di nuove fratture, allargamento di rotture già esistenti o anche aumento della frequenza della rottura. Le condotte, inoltre, sono anche sottoposte a fattori esterni indipendenti dalla pressione del fluido che circola al loro interno, quali il peso del terreno, carichi esterni o espansioni termiche.

Grazie alla modellazione a elementi finiti, si è analizzato il comportamento di condotte di diverso materiale che presentavano diverse tipologie di rotture, e sono state sottoposte a differenti carichi. Con questi studi si è verificato che, generalmente, per i materiali elastici, l'area della rottura aumenta linearmente con la pressione, indipendentemente dal tipo di rottura o di materiale (Cassa and van Zyl 2013; Ferrante 2012b; Ferrante et al. 2013). È possibile quindi descrivere questa caratteristica tramite la seguente equazione:

$$A = A_0 + mh \quad 5)$$

dove  $A_0$  è l'area iniziale del foro sotto pressione relativa nulla,  $m$  rappresenta la pendenza tra area e pressione e  $h$  è il carico di pressione.

Sostituendo l'Equazione 5 nell'Equazione 1, si ricava il modello FAVAD, inizialmente proposto da May (1994)

$$Q = C_q \cdot \sqrt{2g} \cdot (A_0 h^{0.5} + mh^{1.5}) \quad 6)$$

il quale presenta due parametri ovvero  $A_0$  area della perdita iniziale e  $m$  pendenza tra area e pressione, mentre  $Q$  è il flusso della perdita,  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $C_q$  è il coefficiente di portata, generalmente pari al valore di 0.65.

Dal punto di vista teorico, il modello FAVAD parte considerando l'equazione di Torricelli, alla quale viene aggiunta l'ipotesi di condizioni elastiche del materiale. Infatti, il primo termine dell'Equazione 6, cioè  $C_q \cdot 2g \cdot A_0 h^{0.5}$  è proprio l'equazione di Torricelli ovvero il flusso attraverso un'area fissa corrispondente ad  $A_0$ . Il secondo termine dell'Equazione 6, cioè  $C_q \cdot 2g \cdot mh^{1.5}$  descrive invece il flusso attraverso un'area che si espande.

Particolare attenzione deve essere posta, tuttavia, per i materiali viscoelastici, per i quali il modello FAVAD non è valido, in quanto l'area della rottura può risultare

dipendente non solo dalla pressione ma anche dalla storia del carico cioè tempo e sua variazione (Ferrante et al. 2011).

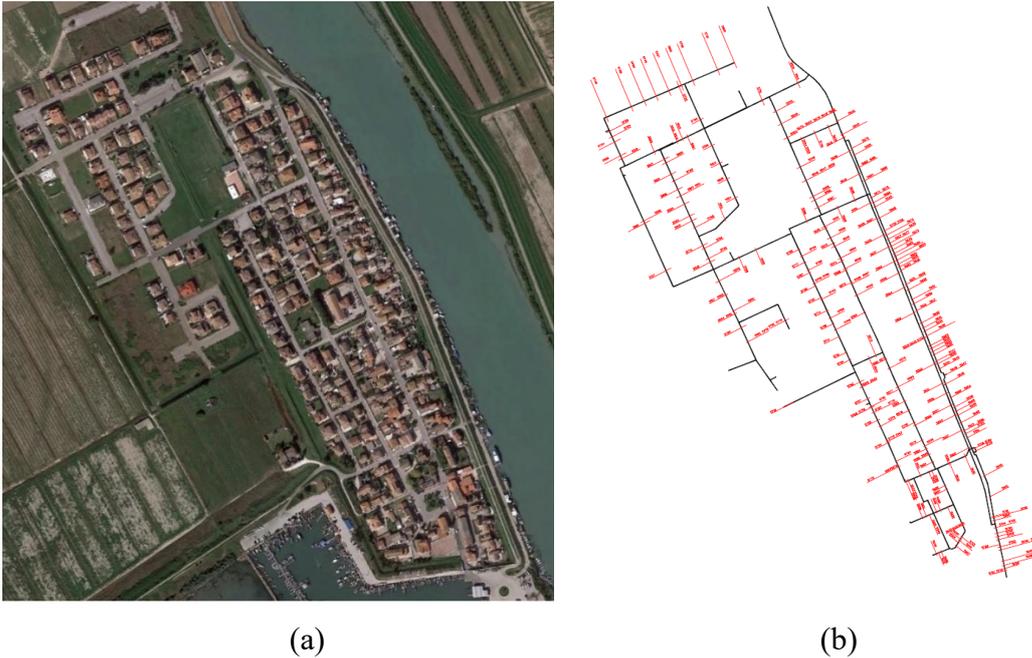
Anche in questo caso, per applicare il modello FAVAD a un sistema di distribuzione idrico, i valori dei parametri  $m$  e  $A_0$  devono essere preliminarmente stimati. Seguendo lo stesso procedimento descritto per l'equazione di potenza, ovvero effettuando una manovra di riduzione della pressione, misurando il carico di pressione medio notturno prima ( $h_1$ ) e dopo ( $h_2$ ) la manovra, e stimando la perdita idrica presente nella rete prima ( $Q_1$ ) e dopo ( $Q_2$ ) la manovra, i coefficienti possono essere ricavati tramite le seguenti equazioni (Levin 2019):

$$m = \frac{Q_2 - Q_1 h_2^{0.5} h_1^{-0.5}}{C_q \sqrt{2g} \cdot h_2^{0.5} (h_2 - h_1)} \quad 7)$$

$$A_0 = \frac{Q_1 h_1^{-0.5}}{C_q \sqrt{2g}} - m h_1 \quad 8)$$

## 3.2 Caso studio

Il distretto idrico di riferimento è situato a Gorino Ferrarese, in provincia di Ferrara, una piccola località situata nel Parco del Delta del Po (**Figura 3.1.a**), avente un'estensione di poco superiore ai 3 Km<sup>2</sup> e di competenza della società C.A.D.F. S.p.A. La rete in questione (**Figura 3.1.b**) presenta un unico punto di alimentazione e serve all'incirca 650 abitanti, a cui corrispondono 294 utenze di cui 277 residenziali, mentre le rimanenti 17 appartengono a servizi pubblici e ad attività commerciali o turistiche.



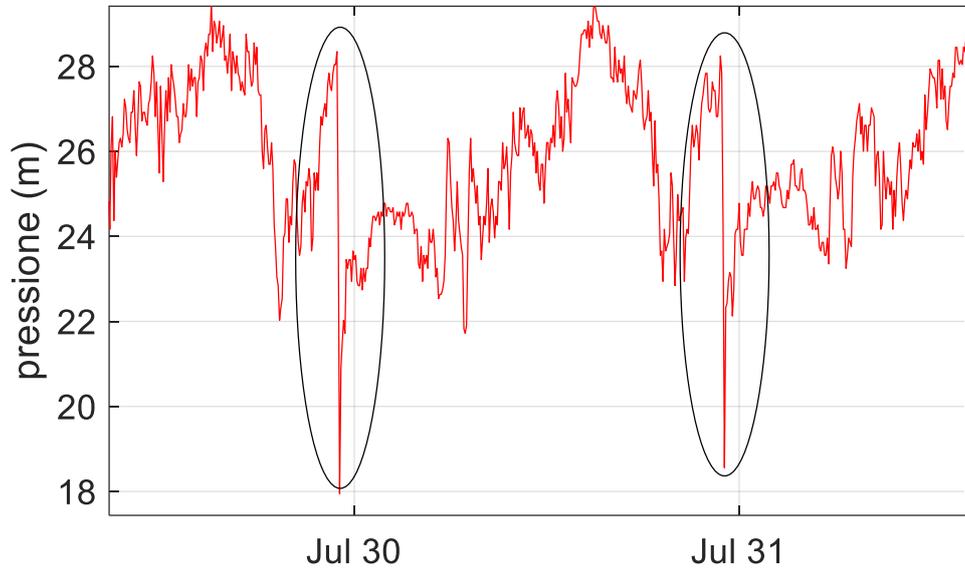
**Figura 3.1.** a) Immagine satellitare e b) layout della rete e degli allacci del distretto idrico di Gorino Ferrarese

La pressione nella rete è regolata tramite stazione di pompaggio. Le pompe, dotate di inverter, mantengono durante il giorno un carico di pressione di circa 30 metri direttamente a valle della stazione stessa, mentre durante la notte, tra le ore 23:00 e le ore 7:00, il carico di pressione viene ridotto di circa 10 metri, come mostrato in Figura 3.2.

Il gestore del servizio idrico ha effettuato una campagna di sostituzione dei contatori, per rimuovere i tradizionali contatori meccanici e installare degli smart meter elettromagnetici dotati di data logger, ovvero di memoria interna. Operativamente, infatti, questi contatori potevano memorizzare il dato del volume cumulato con una sensibilità di 1 L a passi temporali variabili da 1 minuto a 1 ora. Terminata la sostituzione dei contatori si è svolta una campagna di misura per scaricare i dati memorizzati dai contatori intelligenti, ed è stato possibile ottenere le serie temporali:

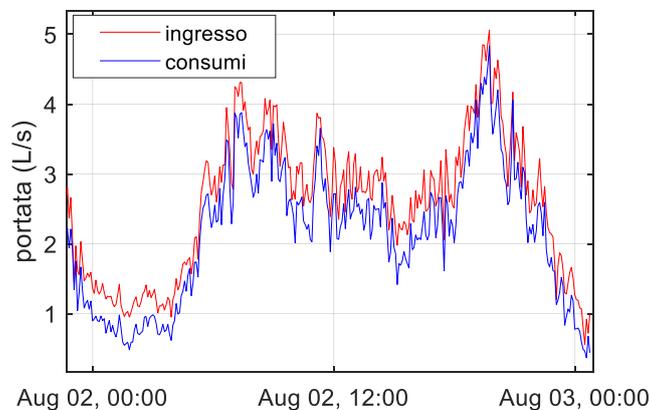
- dei consumi idrici di ognuna delle 294 utenze del distretto;
- del flusso in ingresso al distretto;

- della pressione all'ingresso del distretto;
- per un periodo di 45 giorni a passo temporale di 5 minuti.



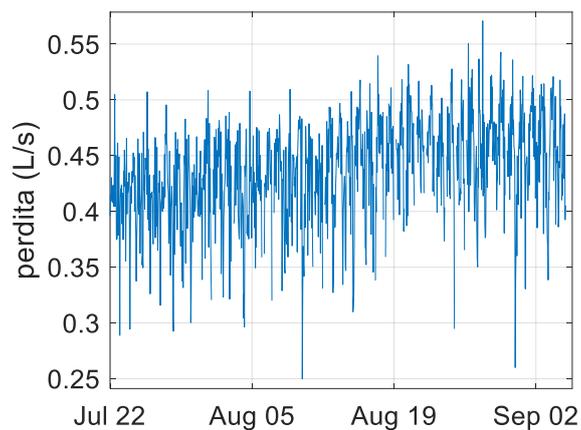
**Figura 3.2.** Andamento della pressione su di un periodo di due giorni, evidenziando tramite ellissi la manovra di riduzione di pressione

Le serie temporali del flusso in ingresso e del consumo di tutte le utenze sono state utilizzate per stimare il livello di perdita idrica del distretto. Infatti, sommando le serie temporali dei consumi idrici di ogni utenza è stato possibile ottenere la serie temporale dell'effettivo consumo idrico di tutto il distretto (Figura 3.3).



**Figura 3.3.** Andamento a passo di 5 minuti del flusso in ingresso al distretto (rosso) e della somma di tutti i consumi delle utenze (blu), in un giorno di riferimento

Sottraendo questi valori alla serie temporale del flusso in ingresso è stato possibile così ottenere l'accurato andamento della perdita idrica del distretto, ricavando un flusso di perdita pari a circa  $0.4 \text{ L/s}$  (**Figura 3.4**).



**Figura 3.4.** Andamento a passo orario della perdita idrica del distretto lungo tutti i 45 giorni monitorati

Utilizzando i dati ricavati dagli smart meter per il consumo delle utenze, e non i dati di bollettazione affetti da imprecisione e non corrispondenti ad una stessa finestra temporale, la stima ottenuta del livello di perdita è precisa e accurata. Per questo è stata assunta come riferimento per:

- valutare l'affidabilità del metodo del MNF;
- valutare l'accuratezza di vari approcci per la parametrizzazione dell'equazione di potenza e del modello FAVAD.

Le due analisi sono descritte dettagliatamente qui di seguito.

## 3.3 Analisi effettuate e risultati

### 3.3.1 Analisi dell'affidabilità del metodo del MNF

Come descritto precedentemente, il metodo del MNF consiste nel valutare il livello di perdita andando a sottrarre, dal minimo flusso in ingresso al distretto, dei valori di consumo notturno per le utenze stimati da letteratura.

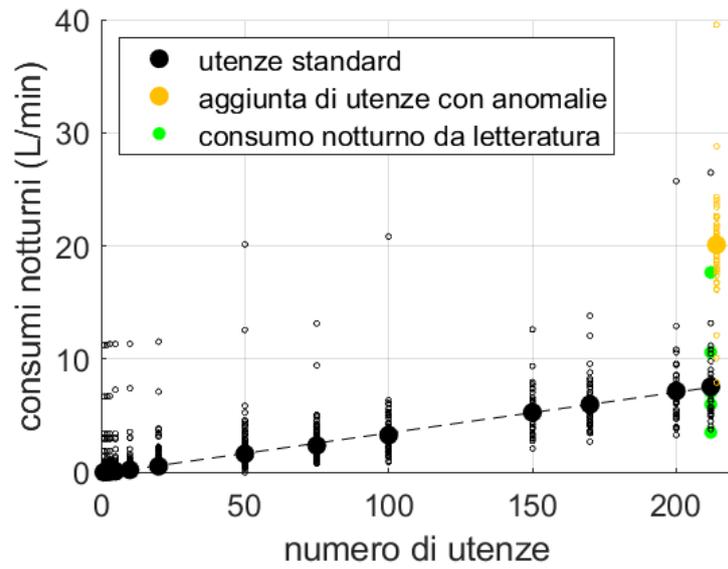
Avendo a disposizione, grazie al monitoraggio del distretto con smart meter, i valori reali del consumo notturno delle utenze, è stato possibile confrontare questi effettivi valori con i consumi notturni stimati da letteratura.

In particolare, per quel che riguarda l'utilizzo dei consumi effettivi, l'analisi è stata effettuata estrapolando il minimo consumo notturno registrato tra le ore 2:00 e le ore 4:00 dalle serie temporali del consumo idrico delle utenze. Si sono considerati diversi set:

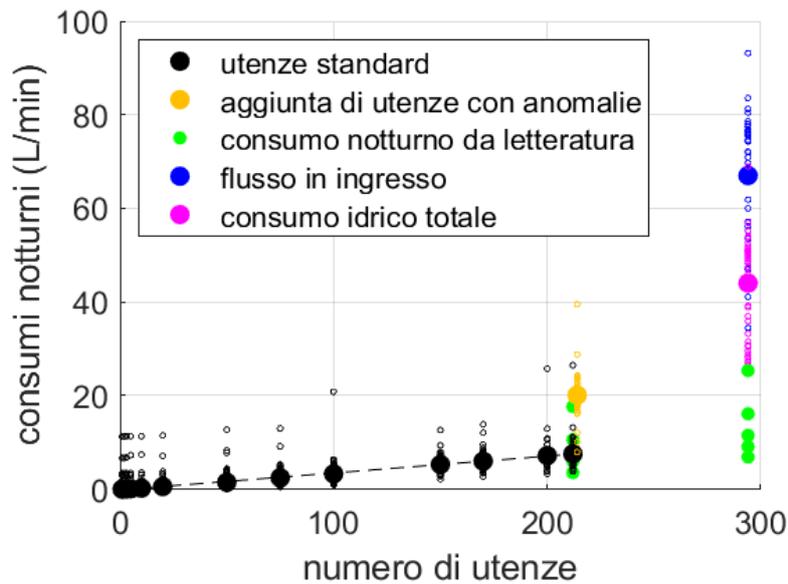
- set1: vari gruppi composti da un diverso numero di utenze residenziali standard (da 5 a 212), ovvero non affette da perdite idriche o consumi anomali;
- set2: tutti le 212 utenze residenziali non affette da perdite idriche o consumi anomali, con l'aggiunta di sole due utenze che presentavano irrigazione notturna;
- set3: tutte le 294 utenze del distretto, residenziali e commerciali.

Per quel che riguarda invece i consumi notturni da letteratura, l'analisi è stata condotta considerando i valori pari a 1.7 L/h (UK), 3L/h (Canada) e 5 L/h (Malesia) per utenza e 0.4 (Germania) e 0.8 L/h (Austria) per persona per le utenze residenziali, mentre è stato usato un valore generale di 8 L/h per le utenze commerciali.

I risultati sono raffigurati in Figura 3.5.



(a)



(b)

**Figura 3.5.** a) Consumi notturni di ogni giorno monitorato per il set 1 (punti vuoti neri) e valori medi (punti pieni neri) interpolati da una retta, e consumi notturni di ogni giorno monitorato per il set 2 (punti vuoti gialli) e il loro valore medio (punto pieno giallo), confrontati con i valori stimati da letteratura (punti verdi); b) aggiunta del minimo flusso in ingresso (blu) e dei consumi notturni totali del set 3 (magenta)

In particolare, nella Figura 3.5.a, i punti vuoti di colore nero rappresentano, per ognuno dei 45 giorni monitorati, il consumo minimo notturno del set 1 (ovvero quello comprendente vari gruppi di utenze residenziali standard) in funzione della dimensione del gruppo di utenze considerato. In aggiunta, è stato anche rappresentato il valore medio sui 45 giorni di ogni gruppo con un punto pieno. È possibile notare come questi consumi crescano linearmente all'aumentare del numero di utenze; questo andamento è anche evidenziato dalla retta tratteggiata, ricavata tramite interpolazione dei dati sfruttando il metodo dei minimi quadrati.

In corrispondenza del gruppo con il maggiore numero di utenze (tutte le 212 utenze residenziali standard) è stato anche stimato il consumo notturno tramite i valori proposti nella letteratura, raffigurati nel grafico con punti di colore verde. Si può osservare come la maggior parte dei consumi stimati siano effettivamente una buona approssimazione dei reali valori di consumo notturno. Infatti, soltanto una tra le varie stime risulta essere più elevata, e corrisponde al valore ricavato con i dati forniti in letteratura per la Malesia.

Tuttavia, considerando il set 2, ovvero aggiungendo due utenze che presentano irrigazione notturna, i consumi notturni per i 45 giorni monitorati, raffigurati con i punti vuoti di colore giallo, aumentano notevolmente, e il valore medio, raffigurato con il punto pieno di colore giallo, supera addirittura il consumo notturno stimato per la Malesia.

Infine, in Figura 3.5.b, sono stati raffigurati i 45 consumi notturni relativi all'intero distretto, ovvero considerando il set 3 composto da tutte le 294 utenze, con dei punti vuoti in magenta. Inoltre, i valori del flusso minimo in ingresso al distretto per ognuno dei 45 giorni sono stati raffigurati tramite dei punti vuoti blu. Chiaramente, la differenza tra i loro valori medi, rappresentati rispettivamente con un punto pieno magenta e blu, corrisponde al livello di perdita presente nel distretto. Si ottiene infatti un valore di  $24 \text{ L/min}$ , corrispondente a  $0.4 \text{ L/s}$ , proprio come stimato precedentemente. In realtà, i gestori idrici normalmente non hanno a disposizione la serie temporale dei consumi delle utenze, poiché è difficile avere distretti monitorati con questo livello di dettaglio. Per questo, normalmente, si deve fare riferimento ai consumi notturni come indicato dalla

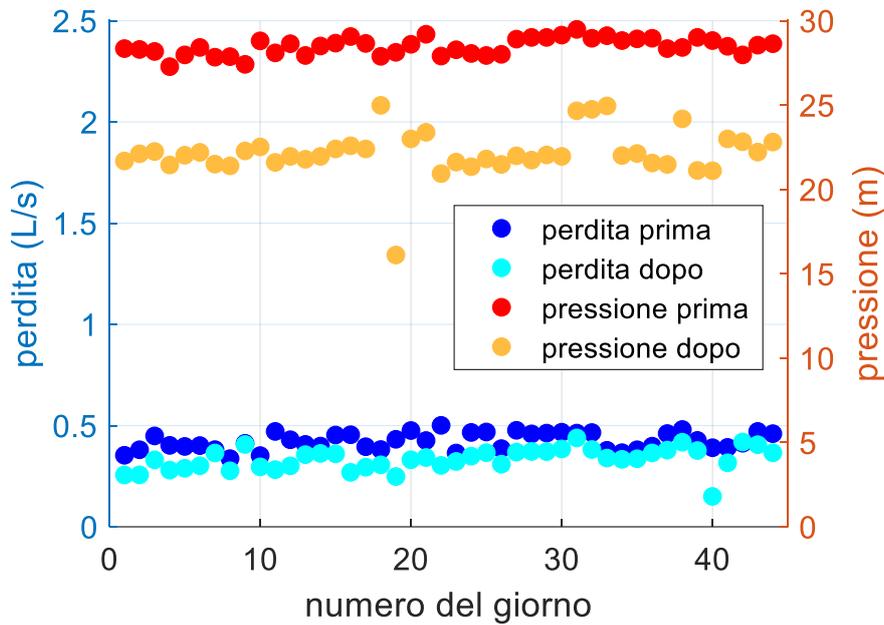
letteratura scientifica, rappresentati con i punti verdi. Tuttavia, applicando in questo modo il metodo del MNF, quindi sottraendo dal minimo flusso in ingresso il consumo notturno stimato da letteratura per l'intero distretto, il livello di perdita ricavato corrisponde a quasi il triplo di quello effettivamente presente.

Questa sovrastima è principalmente dovuta alla presenza di utenze residenziali con perdite idriche interne, e alla presenza di attività commerciali per le quali è difficile stimare il consumo notturno, come quello di circa  $20 L/min$  di un campo da calcio, impiegati probabilmente per irrigazione.

### **3.3.2 Analisi di diverse parametrizzazioni per l'equazione di potenza e il modello FAVAD**

Per poter applicare al distretto i due modelli precedentemente descritti che individuano la relazione tra perdita e pressione, ovvero l'equazione di potenza (Equazione 2) e il modello FAVAD (Equazione 6), è necessario calcolare i loro coefficienti. Infatti tutte e due le espressioni presentano due parametri, rispettivamente  $C$  ed  $N1$ , ed  $m$  e  $A_0$ . Questi coefficienti sono stati stimati usando cinque diversi approcci. Come già sottolineato precedentemente, questi coefficienti vengono stimati, sia nella pratica che nella letteratura, utilizzando due coppie di valori di perdita e pressione osservati nella rete prima e dopo una manovra di abbassamento della pressione.

A questo proposito, è stata considerata la manovra di riduzione della pressione effettuata ogni giorno alle 23:00 tramite regolazione delle pompe. I corrispondenti valori di pressioni e perdita prima e dopo la riduzione sono stati estrapolati dalle rispettive serie temporali per ognuno dei 45 giorni monitorati, come mostrato in Figura 3.6. Sono state così ottenute due coppie di valori di perdita e pressione per ogni giorno.



**Figura 3.6.** Estrapolazione dei valori di perdita e pressione dalle relative serie temporali, prima e dopo la manovra di abbassamento della pressione

Quindi, come primo approccio, i coefficienti sono stati stimati 45 volte usando le due coppie di valori di perdita e pressione osservati ogni volta nel giorno corrispondente. Operativamente, sono state utilizzate le seguenti equazioni, ricavate dalle Equazioni 3, 4, 7 e 8, adattate a questi specifici dati:

$$N1_{\gamma} = \frac{\ln\left(\frac{Q_2^{\gamma}}{Q_1^{\gamma}}\right)}{\ln\left(\frac{h_2^{\gamma}}{h_1^{\gamma}}\right)} \quad 9)$$

$$C_{\gamma} = \frac{Q_1^{\gamma}}{(h_1^{\gamma})^{N1}} \quad 10)$$

$$m_{\gamma} = \frac{Q_2^{\gamma} - Q_1^{\gamma}(h_2^{\gamma})^{0.5}(h_1^{\gamma})^{-0.5}}{C_q\sqrt{2g} \cdot (h_2^{\gamma})^{0.5}(h_2^{\gamma} - h_1^{\gamma})} \quad 11)$$

$$A_0^\gamma = \frac{Q_1^\gamma (h_1^\gamma)^{-0.5}}{C_q \sqrt{2g}} - m h_1^\gamma \quad 12)$$

dove  $N1_\gamma$ ,  $C_\gamma$ ,  $m_\gamma$  e  $A_0^\gamma$  sono i valori stimati dei coefficienti dell'equazione di potenza e FAVAD rispettivamente per il giorno  $\gamma$  (da 1 a 45), mentre  $Q_1^\gamma$ ,  $h_1^\gamma$ ,  $Q_2^\gamma$  e  $h_2^\gamma$  sono rispettivamente i valori di perdita e di carico di pressione prima e dopo la manovra di pressione del giorno  $\gamma$ .

Come secondo approccio per il calcolo dei coefficienti, tutti i rispettivi valori di pressioni e perdita prima e dopo la manovra sono stati mediati, e le due coppie di valori medi sono stati utilizzate per stimare i valori dei coefficienti tramite le seguenti equazioni, ottenute adattando le Equazioni 3, 4, 7 e 8 a questi specifici dati:

$$\overline{N1} = \frac{\ln\left(\frac{\overline{Q_2}}{\overline{Q_1}}\right)}{\ln\left(\frac{\overline{h_2}}{\overline{h_1}}\right)} \quad 13)$$

$$\overline{C} = \frac{\overline{Q_1}}{\overline{h_1}^{\overline{N1}}} \quad 14)$$

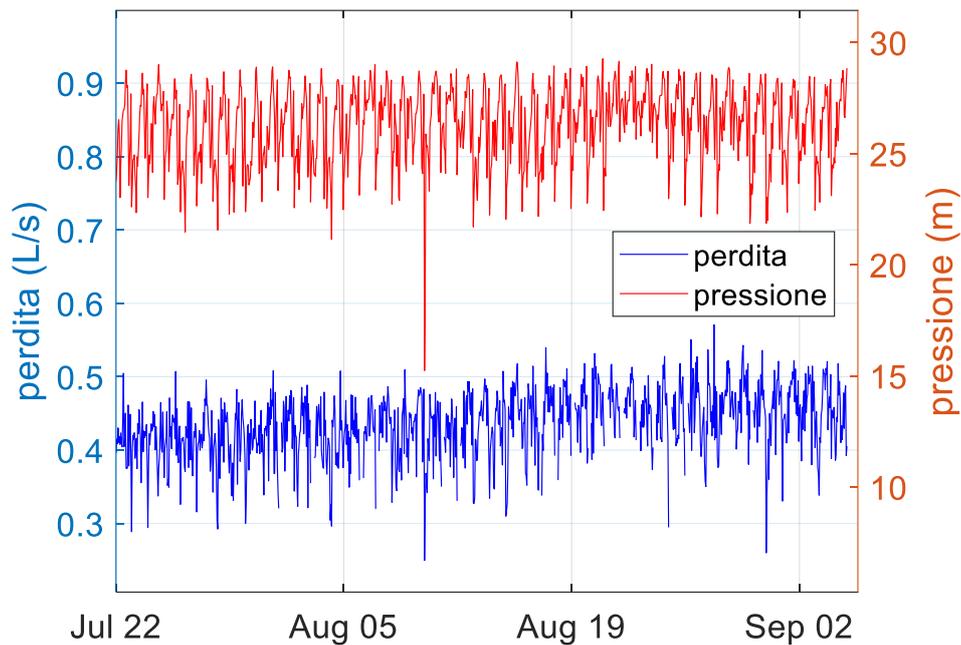
$$\overline{m} = \frac{\overline{Q_2} - \overline{Q_1} \overline{h_2}^{0.5} \overline{h_1}^{-0.5}}{C_q \sqrt{2g} \cdot \overline{h_2}^{0.5} (\overline{h_2} - \overline{h_1})} \quad 15)$$

$$\overline{A_0} = \frac{\overline{Q_1} \overline{h_1}^{-0.5}}{C_q \sqrt{2g}} - \overline{m} \overline{h_1} \quad 16)$$

dove  $\overline{N1}$ ,  $\overline{C}$ ,  $\overline{m}$  e  $\overline{A_0}$  sono i valori stimati dei coefficienti dell'equazione di potenza e FAVAD, mentre  $\overline{Q_1}$ ,  $\overline{h_1}$ ,  $\overline{Q_2}$  e  $\overline{h_2}$  sono rispettivamente i valori medi di perdita e carico di pressione prima e dopo la manovra di abbassamento della pressione.

Come terzo approccio per il calcolo dei coefficienti, il metodo dei minimi quadrati è stato applicato a tutte le coppie.

Per questo caso studio, tuttavia, grazie al monitoraggio tramite smart meter del distretto, si hanno a disposizione sia la serie temporale continua della pressione all'ingresso del distretto che la serie temporale della perdita corrispondente, come evidenziato in Figura 3.7.

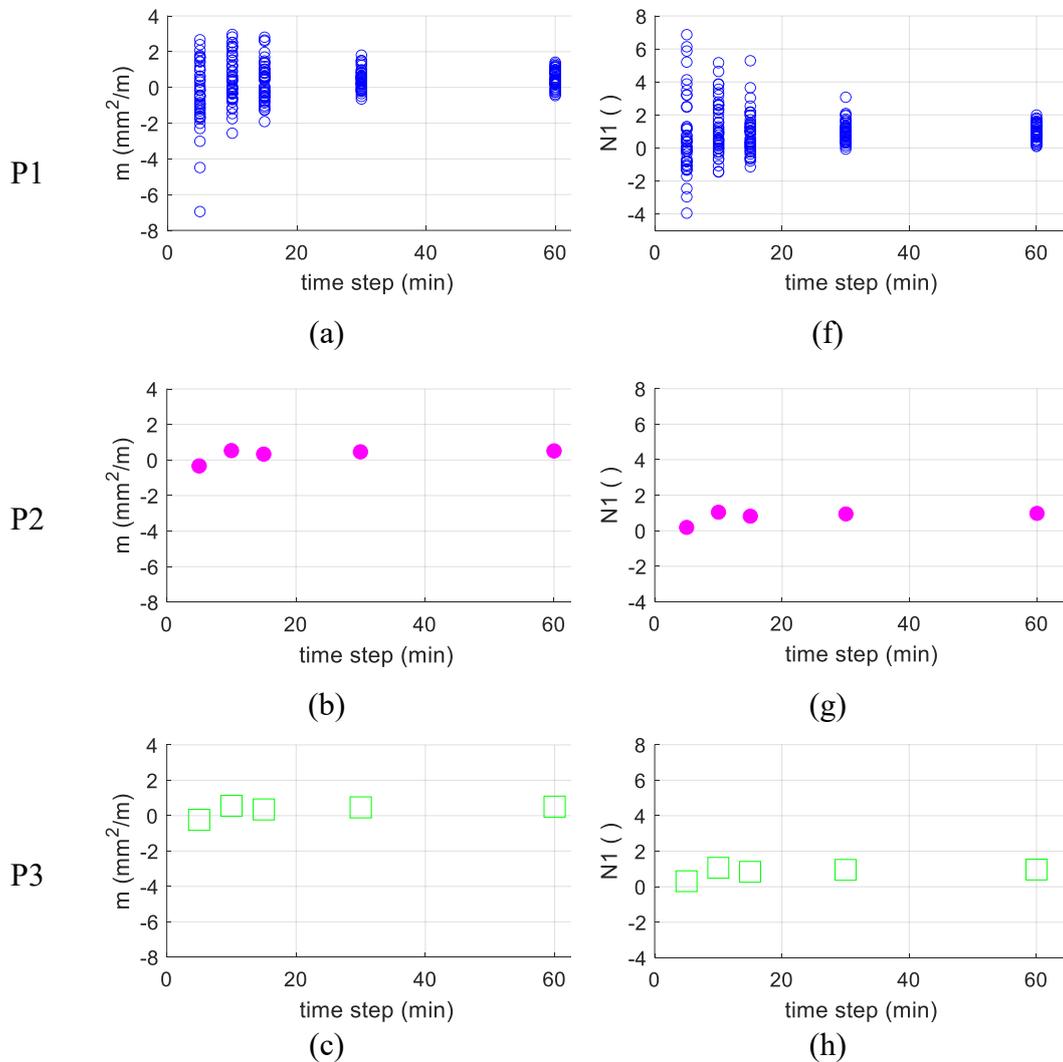


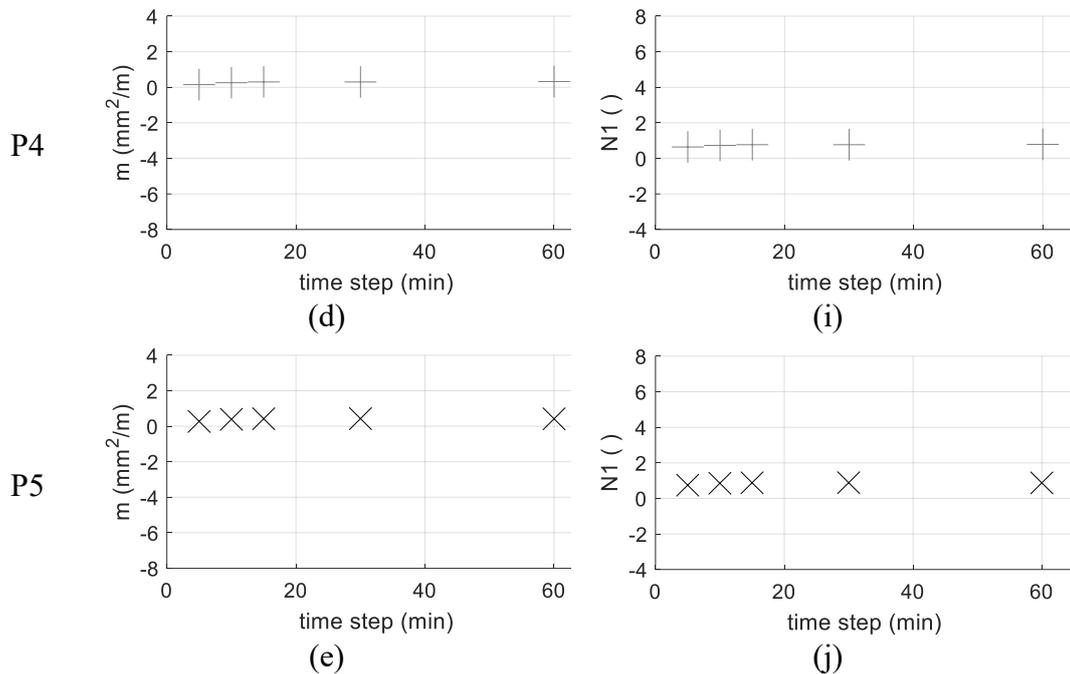
**Figura 3.7.** Serie temporale della pressione (rosso) e della perdita (blu) su tutti i 45 giorni monitorati a passo orario

Dunque, come quarto e quinto approccio per stimare i coefficienti, è stato applicato il metodo dei minimi quadrati considerando sia tutti i valori di perdita e pressione a disposizione per tutti i 45 giorni, sia soltanto i valori osservati durante il periodo notturno, ovvero tra le ore 22:00 e le ore 5:00, affinché siano meno influenzati da consumi idrici giornalieri.

Questi cinque approcci appena descritti verranno indicati d'ora in avanti come P1, P2, P3, P4, P5, rispettivamente. Sono inoltre stati applicati considerando i dati a diversi passi temporali, ovvero non solo al passo di 5 minuti, ma anche mediati a 10, 15, 30 e 60 minuti.

In Figura 3.8.a-e sono rappresentati i valori stimati per il coefficiente  $m$  del modello FAVAD (rappresentativo della pendenza tra area e carico di pressione) mentre in Figura 3.8.f-j sono rappresentati i valori stimati per il coefficiente  $N1$  (l'esponente della perdita). Per entrambe le figure, i coefficienti sono rappresentati in funzione del passo temporale a cui sono stati considerati i dati di perdita e pressione, e sono rappresentati in grafici diversi per differenziare i cinque approcci appena descritti.



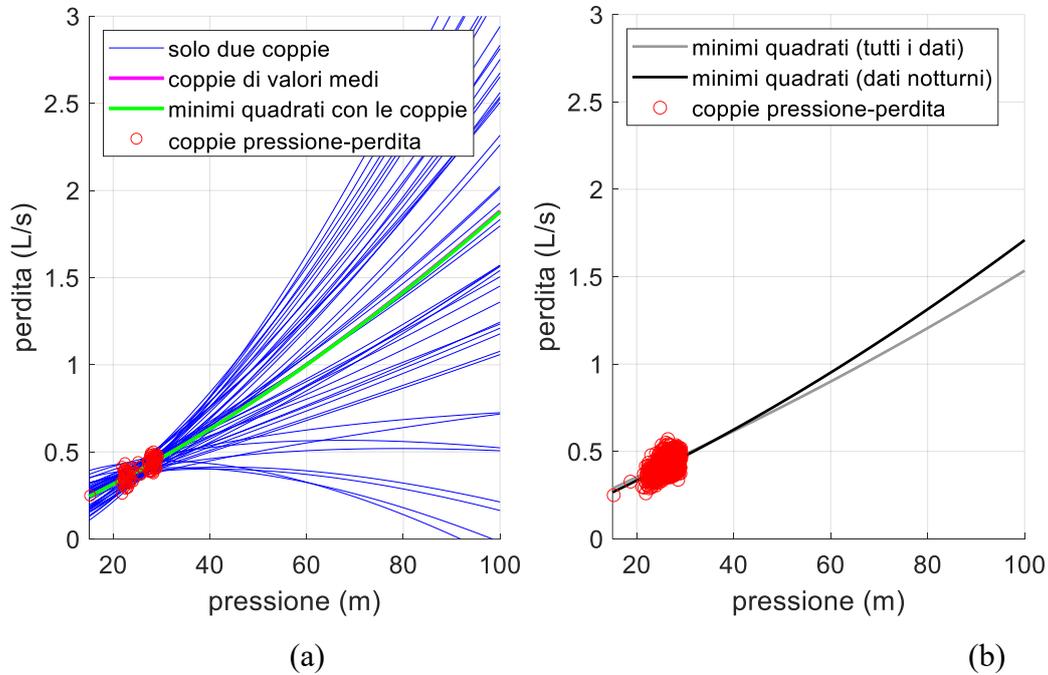


**Figura 3.8.** a-e) valori del coefficiente  $m$  in funzione del passo temporale stimati con i diversi approcci P1-P5; f-j) valori del coefficiente  $N1$  in funzione del passo temporale stimati con i diversi approcci P1-P5

Analizzando i risultati è possibile notare come i 45 valori risultanti dall'applicazione dell'approccio P1 (usando le coppie di valori di perdita e pressione osservati prima e dopo la manovra di abbassamento della pressione nel giorno rispettivo) siano estremamente variabili, in particolare per i passi temporali più brevi. Sono presenti inoltre anche valori negativi, i quali non sono consistenti e non hanno spiegazione fisica. I coefficienti stimati con gli approcci P2 e P3, ovvero usando o le due coppie di valori medi o il metodo dei minimi quadrati con tutte le coppie, ancora presentano valori negativi in corrispondenza dei passi temporali più brevi. È possibile quindi affermare che si possono ricavare risultati inaccurati e inaffidabili seguendo il metodo standard consigliato in letteratura ed effettuato anche normalmente nella pratica dai gestori idrici.

Al contrario, i valori ricavati tramite gli ultimi due approcci, P4 e P5, ovvero considerando una grande quantità di dati osservati, sia durante tutto il periodo monitorato che solo nelle ore notturne, permette di calcolare delle stime accurate e

consistenti dei coefficienti, oltretutto indipendenti dal passo temporale considerato.



**Figura 3.9.** Andamento dell'equazione del modello FAVAD con i coefficienti stimati considerando un passo temporale di 60 minuti con a) i metodi A1 (blu), A2 (magenta) e A3 (verde) e b) i metodi A4 (grigio) e A5 (nero)

Le differenze appena evidenziate tra l'uso di soltanto due coppie di valori di dati di perdita e pressione prima e dopo una manovra, e tra l'uso dell'intera serie temporale della pressione e relativa perdita, sono anche evidenziate in Figura 3.9, dove è stata raffigurato l'andamento dell'equazione descritta dal modello FAVAD, usando i parametri ricavati dai vari approcci.

Si può osservare che le curve ricavate con i coefficienti stimati con soltanto due coppie di valori di dati (P1) portano a una stima degli effetti della variazione di pressione sulle perdite non affidabile, al contrario di quelle ricavate usando i coefficienti valutati con l'intera serie temporale (P4-5).

### 3.4 Conclusioni

In sintesi, in questo studio sono stati analizzati nel dettaglio i metodi del MNF per la valutazione del livello di perdita e i modelli dell'equazione di potenza e FAVAD per la caratterizzazione della perdita idrica in funzione della pressione. In particolare, ci si è avvalsi di un distretto idrico monitorato tramite smart meter a livello di singola utenza, i quali hanno permesso di ottenere gli andamenti nel tempo dei consumi idrici di ogni utenza. Grazie a questo, si è ricavata una stima molto precisa del livello di perdita idrica presente nella rete, ed è stato possibile effettuare un'analisi di affidabilità del metodo del MNF e un'analisi su vari approcci per il calcolo dei coefficienti dei due modelli di caratterizzazione.

Per quel che riguarda il metodo del MNF, si è verificato che si può ottenere una sovrastima del livello di perdita presente in un distretto idrico, in quanto i valori stimati da letteratura per il consumo notturno delle utenze non tengono in considerazione eventuali consumi anomali delle utenze quali perdite interne o irrigazione notturna.

Riguardo i vari approcci di parametrizzazione per l'equazione di potenza e il modello FAVAD, è stato verificato come sia inaffidabile considerare per il calcolo soltanto due coppie di valori di perdita e pressione, come generalmente effettuato nella pratica dai gestori idrici. La conoscenza dell'andamento nel tempo della perdita idrica, invece, permette una modellazione più accurata grazie all'ottenimento di parametri più rappresentativi della rete, e questo consente di effettuare stime più realistiche del contenimento delle perdite a fronte di abbassamenti della pressione in rete.

Più in generale si è constatato quanto sia importante disporre di un monitoraggio tramite da smart meter sui distretti idrici. Infatti, è soltanto grazie all'approfondita e dettagliata conoscenza sulle caratteristiche idrauliche del distretto, ovvero sui consumi delle utenze, sui flussi in ingresso e sulla pressione, che è stato possibile valutare quali sono le principali problematiche dell'applicazione di questi metodi.

### Capitolo 3

Nella realtà, pochi sono i distretti monitorati così ampiamente, ovvero per i quali i gestori hanno a disposizione una tale ricchezza di dati e informazioni ma, come osservato nel caso studio, la mancanza di un monitoraggio accurato dei consumi e/o una limitata acquisizione di dati di portate e pressioni può portare all'ottenimento di stime inaffidabili e inconsistenti.

## **Valutazione delle potenzialità e delle criticità dei metodi model-based per la localizzazione delle perdite**

In questo capitolo, due metodi model-based, denominati Sensitivity Matrix e Linear Approximation, per la localizzazione delle perdite idriche vengono presentati e analizzati nel dettaglio. Essi vengono poi applicati ad un caso studio sintetico, ovvero un sistema di distribuzione acquedottistica di cui si conosce la storia delle perdite, e si dispone sia di dati di pressione misurati nella rete, sia di un modello idraulico perfetto, ovvero contenente esatti consumi delle utenze e valori delle caratteristiche delle condotte.

Si valutano quindi le diverse criticità relative a questa tipologia di metodi, ovvero come la gestione dei dati, il livello di accuratezza del modello idraulico e il numero di sensori di pressione influenzino le performance dei metodi model-based. Questo ha permesso, più in generale, di valutare come sfruttare al meglio il monitoraggio della rete.

Questo capitolo è basato sulla seguente pubblicazione su rivista scientifica:

Marzola, I., Alvisi, S., Franchini, M. (2022) “A comparison of model-based methods for leakage localization in water distribution systems”, *Water Resources Management* – Springer.



Le fasi di caratterizzazione e quantificazione ampiamente trattate nel capitolo precedente sono fondamentali per riuscire a identificare lo stato della rete. Tuttavia da sole non sono sufficienti per consentire una riduzione del livello di perdita all'interno della rete, in quanto è fondamentale riuscire a localizzare le perdite idriche, e quindi procedere alla loro riparazione.

Per la localizzazione delle perdite idriche, i metodi model-based stanno ricevendo sempre più attenzione, in quanto basati su un concetto semplice (Hu et al. 2021). Infatti, questi metodi consentono di localizzare le perdite idriche presenti all'interno di un sistema di distribuzione acquedottistico tramite l'accoppiamento del modello idraulico della rete con i dati ottenuti da sensori di pressione e portata. In realtà, nella pratica spesso vengono utilizzati soltanto sensori di pressione per monitorare la rete, in quanto più economici, più semplici da installare e distribuire uniformemente lungo la rete e anche più facili da rimuovere e spostare in altre posizioni.

Più nel dettaglio, se si ha a disposizione un modello idraulico accurato e preciso, i valori di pressione risultanti dalle sue simulazioni normalmente concordano con quelli misurati. Tuttavia, se si forma una nuova perdita nella rete di cui non si conosce né l'entità né la posizione, i valori misurati non coincideranno più con quelli simulati. Infatti, la perdita idrica causa un aumento delle perdite di carico nella rete, e quindi un abbassamento dei valori di pressione misurata. Il modello idraulico può quindi essere utilizzato per simulare molteplici e diversi scenari di perdita, con diverse entità e in diverse posizioni, permettendo la sua

localizzazione nel nodo o nella condotta della rete che minimizza le differenze tra i valori di pressione simulati e osservati.

A seconda delle strategie utilizzate per questo scopo, i metodi model-based possono essere classificati in 4 diverse categorie: metodi basati su matrici di sensitività, metodi combinati con l'uso di machine learning, metodi basati sull'ottimizzazione della calibrazione del modello, e metodi basati sulla falsificazione del dominio degli errori.

I metodi basati su matrici di sensitività consistono nella creazione di una matrice di sensitività che contiene gli effetti causati da varie perdite che possono formarsi nella rete, ottenuti simulando molteplici scenari con il modello idraulico (Perez et al. 2014; Ponce et al. 2014). È possibile quindi identificare quale tra gli scenari simulati meglio descrive il reale effetto della perdita.

Nei metodi combinati con l'uso di machine learning (Javadiha et al. 2019; Zhang et al. 2016), il problema della localizzazione viene considerato come un problema di classificazione. Un classificatore, come ad esempio una rete neurale convoluzionale, viene addestrato tramite una grande quantità di casistiche di perdite idriche, generalmente simulata dal modello idraulico. Il classificatore viene poi utilizzato per analizzare i dati misurati e individuare la più probabile posizione della perdita.

I metodi basati sull'ottimizzazione della calibrazione del modello consistono nel calibrare il modello, ovvero identificare portata e posizione delle perdite in modo da minimizzare le differenze tra i dati simulati e osservati (Berglund et al. 2017; Wu et al. 2010).

I metodi basati sulla falsificazione del dominio degli errori (Goulet et al. 2013; Moser et al. 2018) consistono nel valutare inizialmente il valore massimo ammissibile dell'errore tra i valori simulati e osservati, considerando diverse cause quali errori di misura o errori nel modello idraulico. Multiplici scenari di perdita sono poi simulati, e, tra tutti, vengono selezionati soltanto quelli per cui la differenza tra i valori simulati e misurati è più bassa del massimo errore ammesso. Questo processo permette l'identificazione della zona più probabile in cui la perdita è situata.

In ogni caso, indipendentemente dalla strategia utilizzata, questi metodi si basano sul confronto tra i reali valori della rete e quelli simulati. Tuttavia, proprio per questo concetto, la loro efficienza e la loro performance sono fortemente influenzate da vari aspetti.

Innanzitutto, i sensori di pressione installati nella rete consentono di ottenere serie temporali dei valori di pressioni, a passi dell'ordine di 5-15 minuti, anche su lunghi periodi. Tuttavia, non è ancora ben chiaro come questi dati devono essere gestiti, ovvero se sia più vantaggioso utilizzare tutti dati a disposizione, o considerare dati mediati, oppure estrarre i valori relativi a periodi particolari come quelli di minimo o massimo consumo (Berglund et al. 2017). Un altro problema di grande rilevanza è relativo al livello di accuratezza sia dei dati misurati sia del modello idraulico – quest'ultimo in termini sia dei consumi delle utenze che delle caratteristiche della rete – in quanto l'efficienza dei metodi risente degli errori di misura e modellazione (Adedeji et al. 2017; Hu et al. 2021; Pérez et al. 2009). Infine, il monitoraggio della rete è un prerequisito fondamentale, ma il budget a disposizione dei gestori idrici non consente l'installazione dei misuratori di pressioni ad ogni potenziale punto di misura, e un numero ridotto di sensori può influenzare i risultati ottenuti (Pérez et al. 2009).

Poiché nella letteratura scientifica non sono presenti ad oggi studi che esaminino in dettaglio gli effetti di queste criticità sull'accuratezza della localizzazione, in questo lavoro si sono considerati due metodi model-based già esistenti, i quali sono stati applicati ad uno stesso caso studio di riferimento in modo da analizzare tutti i problemi di sopra evidenziati, e capire quindi come sfruttare al meglio il monitoraggio della rete. Il primo metodo è basato su quello originariamente proposto da Perez et al (2014), e viene di seguito denominato Sensitivity Matrix (SM), mentre il secondo è basato sul metodo proposto da Berglund et al (2017) ed è nel seguito denominato Linear Approximation (LA).

Qui di seguito vengono descritti i metodi, il caso studio e tutte le analisi effettuate nel dettaglio. I risultati ottenuti vengono ampiamente commentati e alcune conclusioni sono tratte.

## 4.1 Metodi model-based

Prima di descrivere nel dettaglio le caratteristiche dei due metodi selezionati, è necessario effettuare alcune ipotesi iniziali.

Si consideri di stare studiando una rete di riferimento, composta da un numero di condotte pari a  $n_{pipe}$ , monitorata da  $n_{sen}$  sensori di pressione e sia  $i$  il generico nodo nel quale il sensore è posizionato (con  $i = 1 \dots n_{sen}$ ). Si consideri anche di disporre di un modello che descriva perfettamente il funzionamento idraulico della rete, ovvero delineato con una corretta topologia, e nel quale siano inseriti sia le vere caratteristiche delle condotte, sia i valori esatti dei consumi delle utenze. Sia  $p_{i,misurata}$  la pressione misurata al generico nodo  $i$  in un generico istante temporale. Sia  $p_{i,base}$  la pressione corrispondente nello stesso nodo  $i$  e allo stesso istante temporale, simulata dal modello idraulico *senza* includere la perdita idrica da localizzare. Chiaramente, poiché la posizione non è nota, la perdita idrica non può essere allocata nel modello nella posizione corretta.

### 4.1.1 Sensitivity Matrix

Il metodo Sensitivity Matrix (SM) qui di seguito descritto è basato sull'approccio proposto originariamente da Perez et al (2014), e permette di localizzare una perdita di cui si conosce l'entità  $Q$ . In generale, vengono simulati diversi scenari tramite il modello idraulico, posizionando la perdita ogni volta in una posizione diversa. Le pressioni così ottenute vengono confrontate con le corrispondenti pressioni misurate dai sensori, ed è possibile quindi identificare lo scenario che permette di minimizzare le differenze tra questi valori.

Più nel dettaglio, come schematizzato in **Figura 4.1**, in primo luogo si calcola il vettore dei residui  $R$  tramite le differenze tra la pressione misurata  $p_{i,misurata}$  e la pressione simulata  $p_{i,base}$  per ogni nodo  $i$ :

$$R = \begin{bmatrix} p_{1,misurata} - p_{1,base} \\ \dots \\ p_{i,misurata} - p_{i,base} \\ \dots \\ p_{n_{sen},misurata} - p_{n_{sen},base} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Successivamente, tutte le condotte  $j$  della rete (con  $j = 1, \dots, n_{pipe}$ ) vengono considerate individualmente una ad una e vengono effettuate delle simulazioni idrauliche allocando la perdita di volta in volta in una condotta  $j$  diversa, cioè distribuendo equamente l'entità  $Q$  nei due nodi adiacenti alla condotta  $j$ . È possibile così ottenere, in corrispondenza dei nodi  $i$ , la pressione  $p_{i,perturbata_j}$ , ovvero la pressione simulata associando la perdita nella condotta  $j$ . Infine, si costruisce la matrice di sensitività  $S$ . Questa matrice ha tante righe quanti i sensori di pressione e  $n_{pipe}$  colonne, ognuna corrispondente a una diversa condotta  $j$ . Ogni elemento  $S_{ij}$  contiene gli effetti che la perdita  $Q$  posizionata nella condotta  $j$  causa sulle pressioni ai nodi  $i$ , come definito qui di seguito:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{p_{1,perturbata_1} - p_{1,base}}{Q} & \dots & \frac{p_{1,perturbata_{n_{pipe}}} - p_{1,base}}{Q} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{p_{n_{sen},perturbata_1} - p_{n_{sen},base}}{Q} & \dots & \frac{p_{n_{sen},perturbata_{n_{pipe}}} - p_{n_{sen},base}}{Q} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Calcolando i coefficienti di correlazione tra il vettore dei residui  $r$  e ogni colonna della matrice di sensitività  $S$ , la perdita viene localizzata nella condotta relativa alla condotta di  $S$  che restituisce la maggior correlazione, ovvero la condotta che permette di minimizzare la differenza tra le pressioni misurate e quelle simulate dal modello con la perdita posizionata.

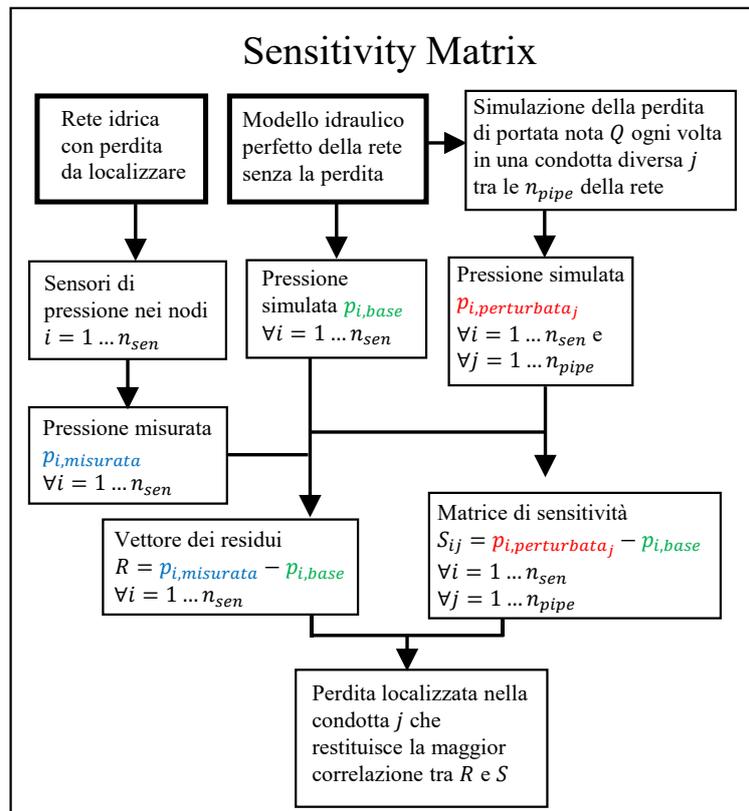


Figura 4.1. Diagramma del metodo Sensitivity Matrix

### 4.1.2 Linear Approximation

Il secondo metodo di localizzazione è basato sull'approccio chiamato Linear Approximation (LA), proposto da Berglund et al (2017). Questo metodo era originariamente finalizzato solo alla valutazione dell'entità della perdita, ma è stato modificato per determinarne anche la posizione. In generale, tramite modello idraulico, la perdita da localizzare viene inizialmente simulata ogni volta in una posizione differente nella rete, e vengono estratte le corrispettive pressioni simulate. Non essendo, tuttavia, nota l'entità della perdita, in un primo momento essa viene definita in modo casuale. Dopodiché, per ogni scenario considerato, si calcola un nuovo valore dell'entità della perdita tale da minimizzare le differenze tra le pressioni simulate e osservate. Lo scenario che, tra tutti quelli considerati, fornisce l'errore più basso con la nuova entità, definisce la posizione della perdita.

Più nel dettaglio, come schematizzato in **Figura 4.2**, tutte le condotte  $j$  (con  $j = 1, \dots, n_{pipe}$ ) della rete vengono considerate individualmente una ad una. Dopodiché, la perdita viene posizionata ogni volta in una condotta  $j$  diversa, associando un emitter nei due nodi adiacenti  $j_1$  e  $j_2$ , ovvero modellando la perdita seguendo l'equazione di potenza (Equazione 2), qui di seguito riportata:

$$Q = C_j \cdot (h_{j_1}^{0.5} + h_{j_2}^{0.5}) \quad (19)$$

dove  $h_{j_1}$  e  $h_{j_2}$  indicano il carico di pressione dei nodi  $j_1$  e  $j_2$  adiacenti alla condotta  $j$ , mentre, essendo l'entità della perdita inizialmente non nota, il coefficiente di perdita  $C_j$  viene scelto casualmente o imposto pari a un valore unitario. Effettuando la simulazione idraulica, si ottiene la pressione  $p_{i,perturbata_j}$  per ogni nodo  $i$ , ovvero la pressione simulata associando la perdita nella condotta  $j$ . Successivamente, per ogni condotta  $j$ , un nuovo valore del coefficiente di perdita  $X_j$  viene calcolato assumendo una relazione lineare tra variazione di pressione e portata persa. Più nel dettaglio, definendo le differenze tra le pressioni misurate  $p_{i,misurata}$  e quelle di base  $p_{i,base}$ , come variazioni di pressione misurata e definendo le differenze tra le pressioni perturbate  $p_{i,perturbata_j}$  e di base  $p_{i,base}$  come variazioni di pressione perturbata, il nuovo coefficiente di perdita  $X_j$  è il valore che modula le variazioni di pressione perturbata affinché siano il più simili possibili alle variazioni di pressione misurata, come definito nella seguente equazione:

$$\text{minimizzare } E_j = \sum_{i=1}^{n_{sen}} \left| (p_{i,misurata} - p_{i,base}) - \frac{(p_{i,perturbata_j} - p_{i,base})}{C_j} \cdot X_j \right| \quad (20)$$

$$\forall j = 1 \dots n_{pipe}$$

Il modello idraulico viene così aggiornato con il nuovo coefficiente di perdita  $X_j$  ottenuto, in modo da aggiornare il flusso perso simulato e ottenere così nuovi

valori delle pressioni perturbate. Questo processo viene ripetuto iterativamente finché la soluzione non cambia significativamente. In questo caso il metodo è stato iterato fino a che il coefficiente di perdita che forniva la migliore soluzione non differiva di più di un 5% dal valore corrispondente alla simulazione precedente.

La perdita è localizzata nella condotta per cui l'errore  $E_j$  è il più basso tra tutta la rete, e l'entità della perdita è determinata dal corrispondente coefficiente  $X_j$ .

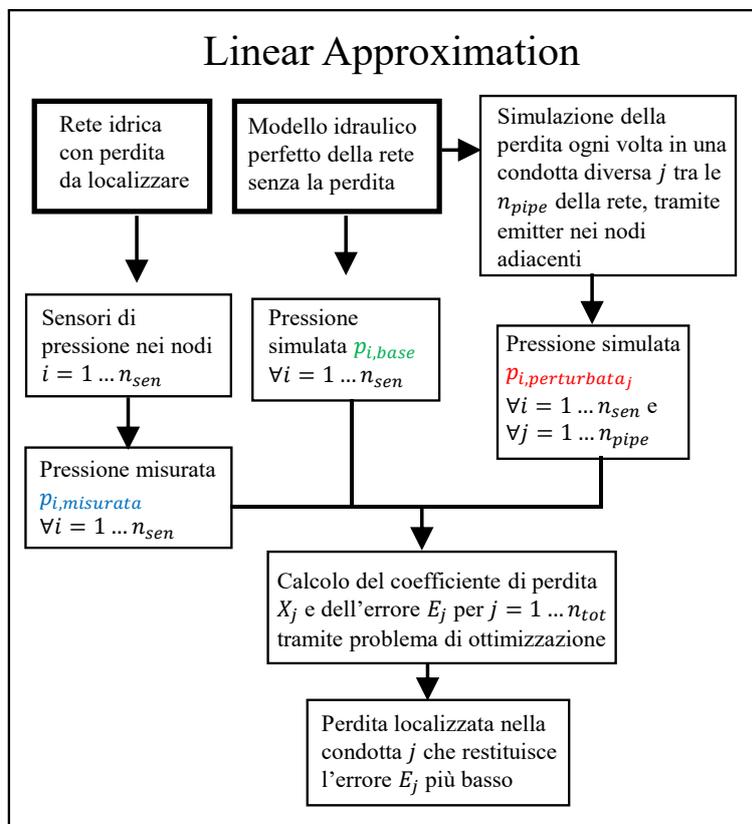
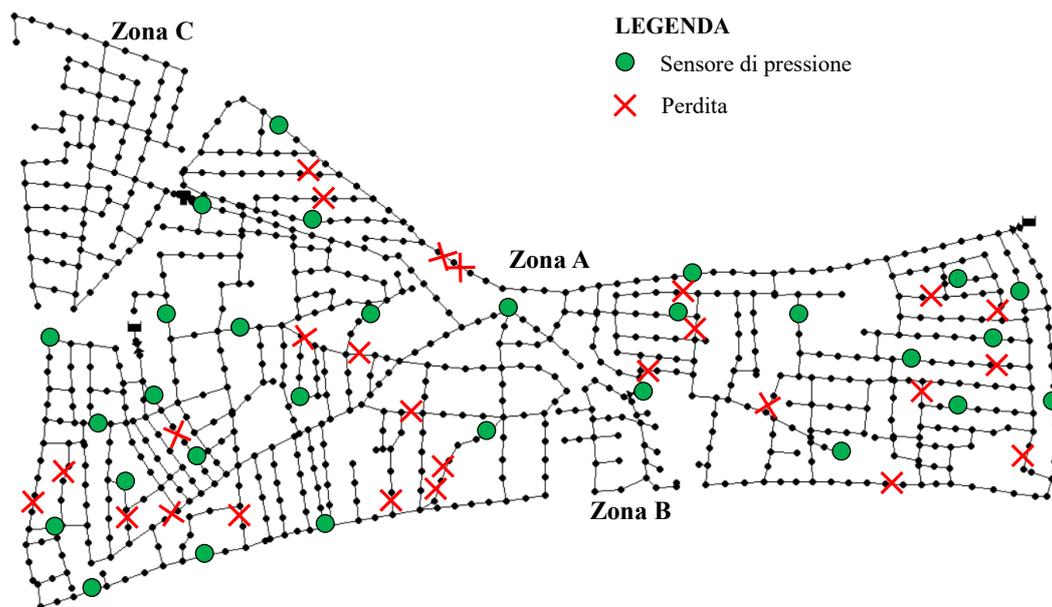


Figura 4.2. Diagramma del metodo Linear Approximation

## 4.2 Caso studio

Il caso specifico considerato è il sistema di distribuzione proposto nell'ambito della BattLeDIM (Battle of the Leakage Detection and Isolation Methods), il quale alimenta una popolazione di circa 10000 abitanti attraverso una rete di

condotte con una lunghezza totale di 42.6 km (**Figura 4.3**). Più nel dettaglio, in questo studio è stata considerata la zona principale del sistema, denominata Zona A, la quale riceve acqua da due reservoir ed è composta da 660 nodi e 765 condotte.



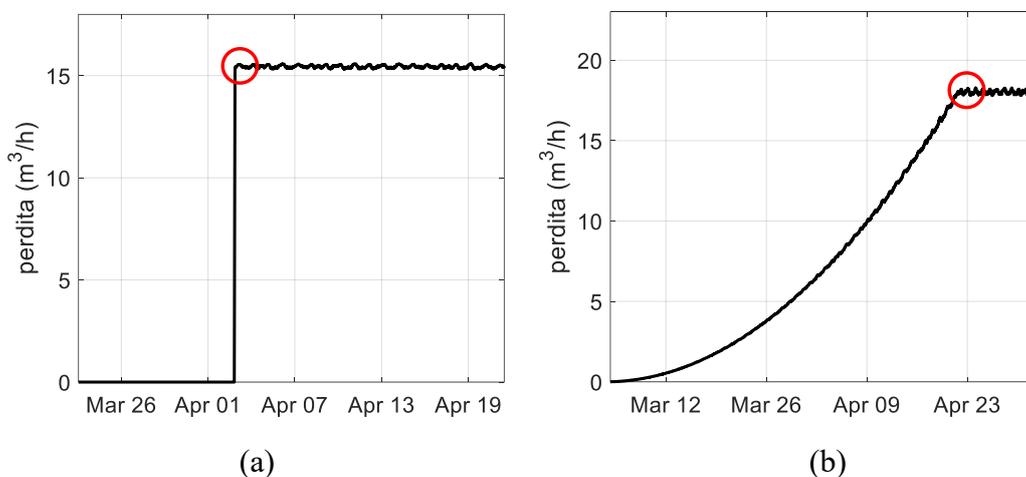
**Figura 4.3.** La rete considerata nel caso studio. I punti in cui sono installati i sensori di pressione sono evidenziati con dei pallini verdi mentre le condotte che presentano perdita sono evidenziate con croci rosse

La Zona A è monitorata da  $n_{sen} = 29$  sensori di pressione, da ognuno dei quali è stato possibile ottenere la serie temporale dei valori di pressioni a un passo di 5 minuti per un periodo di 2 anni. È a disposizione anche un modello idraulico contenente accurati valori sia delle caratteristiche delle condotte che degli andamenti di consumo delle utenze a un passo di 5 minuti per lo stesso periodo dei 2 anni. Inoltre, 26 perdite si sono verificate durante lo stesso periodo, e per ognuna di esse sono noti la posizione, l'istante di formazione, l'eventuale istante di riparazione, e la portata persa a un passo temporale di 5 minuti (Vrachimis et al. 2020). In particolare, 15 perdite erano bursts, ovvero rotture improvvise caratterizzate da una portata costante compresa tra  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $35 \text{ m}^3/\text{h}$ . Le rimanenti 11 erano invece perdite incipienti, le quali partivano da una portata di 0

$m^3/h$ , aumentando con tassi di crescita diversi fino a un massimo di  $30 m^3/h$  per poi rimanere stabili. Aggiungendo le serie temporali della portata di ogni perdita come consumo idrico ai nodi adiacenti la condotta corrispondente, si è ottenuto un modello idraulico *perfetto*, ovvero in grado di descrivere quasi perfettamente il comportamento della rete. Infatti, come descritto precedentemente, per questo caso studio sia le proprietà delle condotte come il diametro, la scabrezza e la lunghezza, sia le proprietà dei nodi, come elevazione e consumo idrico, riflettono accuratamente quelli reali, al punto che l'errore residuo tra la pressione simulata e quella misurata è risultato essere in media di soli  $3 mm$ .

### 4.3 Analisi effettuate

I metodi sopra delineati sono stati applicati per individuare le 26 perdite verificatesi nella Zona A del caso studio considerato. Inizialmente, per garantire che la tipologia della perdita non influisse sui risultati ottenuti, tutte le perdite sono state considerate come bursts, indipendentemente dalla loro evoluzione. Ciò è stato fatto applicando i metodi SM e LA durante il primo giorno in cui la portata della perdita di riferimento è risultata essere costante, cioè si è considerato il primo giorno di formazione nel caso di un burst, mentre si è considerato il primo giorno in cui la portata è diventata costante nel caso di una perdita incipiente, come mostrato nella **Figura 4.4**.



**Figura 4.4.** Serie temporali della portata di a) una perdita dovuta a una rottura improvvisa (burst) e b) una perdita incipiente; il giorno considerato per la localizzazione è evidenziato da un cerchio rosso

Con questa assunzione, diverse analisi sono state effettuate per valutare le diverse criticità che influenzano le performance dei metodi in relazione:

- al tipo di dato da utilizzare (Analisi A);
- al livello di accuratezza del modello idraulico e dei dati misurati (Analisi B1-B6);
- al numero di sensori di pressione che monitorano la rete (Analisi C1-C2).

Nondimeno, l'efficienza dei metodi è stata analizzata anche considerando le perdite incipienti. Infatti, è importante individuare con precisione questo tipo di perdite fin dai primi giorni in cui si verificano, anche se presentano basse portate, in quanto localizzarle nelle fasi iniziali può portare a un significativo risparmio idrico. Pertanto, i metodi sono stati applicati a due perdite incipienti con diversi tassi di evoluzione e portate massime, considerando tutti i giorni della loro evoluzione (Analisi D).

Tutte queste analisi sono descritte in dettaglio di seguito e riassunte nella Tabella 4.1 e nella Tabella 4.2.

### **4.3.1 Analisi A**

Come evidenziato in precedenza, un aspetto critico di questi metodi è legato al modo in cui vengono sfruttati i dati. Infatti, considerando il periodo di un giorno e un passo temporale di acquisizione di 5 minuti, si ha a disposizione una serie temporale di 288 valori di pressione. Concettualmente, tutti questi dati potrebbero essere usati e sfruttati in vari modi diversi tra di loro, come ad esempio considerare tutti i dati di ciascun passo temporale in modo indipendente, o considerare tutti i dati contemporaneamente, oppure considerare i dati mediati sull'intero periodo del giorno. Sulla base di queste considerazioni, l'Analisi A è

stata condotta per determinare quale set di dati permetta di ottenere i migliori risultati, sia in termini di numero che di finestra temporale su cui mediare. Più nel dettaglio, sono stati esaminati quattro diversi approcci. Nel primo approccio, definito snapshot, i metodi sono stati applicati 288 volte utilizzando ogni volta i dati di ogni passo temporale separatamente. Nel secondo approccio, definito stacked, tutti i valori sono stati sfruttati insieme tramite il loro accumulo in un unico vettore colonna. In questo caso, per quel che riguarda il metodo SM, il numero di righe del vettore dei residui e della matrice di sensitività è diventato 29 per 288, ovvero il numero dei sensori di pressione ( $n_{sen} = 29$ ) moltiplicato per il numero di passi temporali, come mostrato nelle seguenti equazioni, in cui  $t = 1, \dots, 288$  rappresenta il passo temporale di 5 minuti durante il giorno e  $p_{i,misurato}(t)$ ,  $p_{i,base}(t)$ , e  $p_{i,perturbed_j}(t)$  sono i valori di pressione corrispondenti al passo temporale  $t$ :

$$R = \begin{bmatrix} p_{1,misurata}(1) - p_{1,base}(1) \\ \dots \\ p_{1,misurata}(t) - p_{1,base}(t) \\ \dots \\ p_{1,misurata}(288) - p_{1,base}(288) \\ \dots \\ p_{n_{sen},misurata}(1) - p_{n_{sen},base}(1) \\ \dots \\ p_{n_{sen},misurata}(288) - p_{n_{sen},base}(288) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$S = \begin{bmatrix} \frac{p_{1,perturbata_1}(1) - p_{1,base}(1)}{Q} & \dots & \frac{p_{1,perturbata_{n_{pipe}}}(1) - p_{1,base}(1)}{Q} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{p_{1,perturbata_1}(t) - p_{1,base}(t)}{Q} & \dots & \frac{p_{1,perturbata_{n_{pipe}}}(t) - p_{1,base}(t)}{Q} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{p_{1,perturbata_1}(288) - p_{1,base}(288)}{Q} & \dots & \frac{p_{1,perturbata_{n_{pipe}}}(288) - p_{1,base}(288)}{Q} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{p_{n_{sen},perturbata_1}(1) - p_{n_{sen},base}(1)}{Q} & \dots & \frac{p_{n_{sen},perturbata_{n_{pipe}}}(1) - p_{n_{sen},base}(1)}{Q} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{p_{n_{sen},perturbata_1}(288) - p_{n_{sen},base}(288)}{Q} & \dots & \frac{p_{n_{sen},perturbata_{n_{pipe}}}(288) - p_{n_{sen},base}(288)}{Q} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Nell'applicazione del metodo LA, il numero di vincoli è diventato 29 per 288, come espresso nella seguente equazione:

$$\text{minimizzare } E_j = \sum_{i=1}^{n_{sen}} \sum_{t=1}^{288} \left| \left( p_{i,misurata}(t) - p_{i,base}(t) \right) - \frac{(p_{i,perturbata_j}(t) - p_{i,base}(t))}{C_j} \cdot X_j \right| \quad (23)$$

$\forall j = 1 \dots n_{pipe}$

Nel terzo caso, definito averaging, i valori sono stati mediati sulla giornata, eliminando così le fluttuazioni che si verificano normalmente durante il giorno. Nel quarto caso, si è considerato un approccio hourly stacked. Quest'ultimo può essere definito come una combinazione dei tre precedenti, in quanto i dati sono stati prima mediati a passo orario, e successivamente i valori medi orari sono stati sfruttati insieme utilizzando l'approccio stacked. Con questo approccio, il numero di righe del vettore dei residui e della matrice di sensitività è diventato 29 per 24 (le ore del giorno), come mostrato di seguito, dove  $H = 1, \dots, 24$  rappresenta le ore del giorno, e  $\bar{p}_{i,misurata}(H)$ ,  $\bar{p}_{i,base}(H)$  e  $\bar{p}_{i,perturbata_j}(H)$  sono le pressioni medie orarie corrispondenti all'ora  $H$  del giorno:

$$R = \begin{bmatrix} \bar{p}_{1,misurata}(1) - \bar{p}_{1,base}(1) \\ \dots \\ \bar{p}_{1,misurata}(H) - \bar{p}_{1,base}(H) \\ \dots \\ \bar{p}_{1,misurata}(24) - \bar{p}_{1,base}(24) \\ \dots \\ \dots \\ \bar{p}_{n_{sen},misurata}(1) - \bar{p}_{n_{sen},base}(1) \\ \dots \\ \bar{p}_{n_{sen},misurata}(24) - \bar{p}_{n_{sen},base}(24) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$S = \begin{bmatrix} \frac{\bar{p}_{1,perturbata_1}(1) - \bar{p}_{1,base}(1)}{Q} & \dots & \frac{\bar{p}_{1,perturbata_{n_{pipe}}}(1) - \bar{p}_{1,base}(1)}{Q} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\bar{p}_{1,perturbata_1}(H) - \bar{p}_{1,base}(H)}{Q} & \dots & \frac{\bar{p}_{1,perturbata_{n_{pipe}}}(H) - \bar{p}_{1,base}(H)}{Q} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\bar{p}_{1,perturbata_1}(24) - \bar{p}_{1,base}(24)}{Q} & \dots & \frac{\bar{p}_{1,perturbata_{n_{pipe}}}(24) - \bar{p}_{1,base}(24)}{Q} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\bar{p}_{n_{sen},perturbata_1}(1) - \bar{p}_{n_{sen},base}(1)}{Q} & \dots & \frac{\bar{p}_{n_{sen},perturbata_{n_{pipe}}}(1) - \bar{p}_{n_{sen},base}(1)}{Q} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\bar{p}_{n_{sen},perturbata_1}(24) - \bar{p}_{n_{sen},base}(24)}{Q} & \dots & \frac{\bar{p}_{n_{sen},perturbata_{n_{pipe}}}(24) - \bar{p}_{n_{sen},base}(24)}{Q} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Nell'applicazione del metodo LA, il numero di vincoli è diventato 29 per 24, come espresso nella seguente equazione:

$$\text{minimizzare } E_j = \sum_{i=1}^{n_{sen}} \sum_{H=1}^{24} \left| \left( \bar{p}_{i,misurata}(H) - \bar{p}_{i,base}(H) \right) - \frac{(\bar{p}_{i,perturbata_j}(H) - \bar{p}_{i,base}(H))}{C} \cdot X_j \right| \quad (26)$$

$\forall j = 1 \dots n_{pipe}$

Soltanto nel caso dell'approccio snapshot, vengono fornite 288 soluzioni per ciascuno dei due metodi model-based, mentre con gli altri tre approcci si ottiene una sola soluzione per ciascun metodo.

### 4.3.2 Analisi B1-B6

Sfruttando l'approccio che ha fornito i migliori risultati nell'analisi A (ovvero l'approccio hourly stacked, come verrà spiegato nella sezione *Risultati e discussioni*), sono state effettuate ulteriori analisi per affrontare gli altri punti critici dei metodi model-based evidenziati in precedenza. In particolare, nell'analisi B sono stati valutati gli effetti dell'utilizzo di un modello non correttamente calibrato.

Infatti, i modelli idraulici non sono sempre a disposizione dei gestori idrici. In genere, i dati di consumo disponibili derivano dalle letture dei contatori, effettuate ogni 4 o 6 mesi ai fini della fatturazione, e i pattern di domanda utilizzati tipicamente derivano dalla letteratura scientifica, e possono quindi differire dai

modelli reali. Inoltre, le informazioni sulle caratteristiche delle condotte, in termini di età e materiale, non sono sempre a disposizione. Per tenere conto degli errori che possono essere presenti nel modello idraulico, in primo luogo nell'analisi B1 i consumi idrici presenti nel modello idraulico perfetto sono stati modificati. In particolare, tutti i valori dei pattern di domanda sono stati perturbati aggiungendo un rumore generato casualmente da una distribuzione uniforme con valore compreso tra il -40% e il +40% del valore originale considerato. Questo ha portato a un errore assoluto medio del 20% sui dati di consumo idrico. Successivamente, nell'analisi B2, sono state modificate le caratteristiche delle condotte del modello idraulico perfetto. In particolare, tutti i valori di scabrezza sono stati perturbati aggiungendo un rumore generato casualmente da una distribuzione uniforme con valore compreso tra il -10% e il +10% del valore considerato. Questo ha portato a un errore assoluto medio del 5% su tutti i dati di scabrezza delle condotte. Inoltre, nell'analisi B3, queste due considerazioni sono state combinate, ovvero è stato ottenuto un modello unendo i consumi idrici modificati come in B1 e i valori di scabrezza delle condotte modificate come in B2, ottenendo un errore medio del 20% su tutti i dati di consumo idrico e del 5% sulle scabrezze. Tuttavia, anche i sensori di pressione utilizzati per ottenere le misurazioni sul campo possono essere soggetti a guasti e a un deterioramento delle prestazioni nel tempo e quindi risultare imprecisi. Pertanto, nell'analisi B4, tutti i dati di pressione misurati sono stati perturbati aggiungendo un rumore generato casualmente da una distribuzione uniforme con valori compresi tra il -1% e il +1% del valore di pressione considerato, portando a un errore assoluto medio dello 0,5%, mentre, come modello idraulico, si è considerato quello perfetto. Inoltre, nell'analisi B5, è stato considerato un modello con un pattern di consumo idrico medio giornaliero, tipicamente utilizzato dai gestori idrici, a cui sono stati aggiunti l'errore assoluto medio del 5% sulle scabrezze e l'errore assoluto medio dello 0,5% sui dati dei sensori di pressione, precedentemente descritti. Un'ulteriore analisi, l'analisi B6, è stata condotta solo per il metodo SM, in quanto è quello che richiede l'informazione sulla portata persa per procedere alla localizzazione. L'efficienza del metodo è stata valutata modificando l'entità

della perdita  $Q$  del 20% sia in positivo che in negativo, e come modello idraulico è stato considerato quello perfetto.

### 4.3.3 Analisi C1-C2

Le Analisi C1 e C2 sono state condotte per valutare l'effetto sia di un diverso numero che una diversa posizione dei sensori di pressione, in quanto, a causa dei vincoli di budget dei gestori, potrebbe essere disponibile solo un numero limitato di sensori. In particolare, nell'analisi C1 è stato considerato il modello perfetto, e l'impatto di un numero ridotto di sensori di pressione è stato studiato considerando set di 25, 20, 15 e 10 sensori. Per individuare i sensori di pressione da associare a ciascun set, sono stati utilizzati due approcci diversi:

- approccio uniforme: questo approccio è stato utilizzato per ottenere dei set di sensori che garantissero una copertura uniforme su tutta la rete. Nella pratica, si identificano inizialmente i due sensori più vicini tra loro, cioè quelli che possono fornire informazioni ridondanti. Dopodiché, per ognuno di questi due sensori, si calcola la somma delle distanze rispetto a tutti gli altri sensori. Viene eliminato poi il sensore per il quale questo valore risulta essere il più basso, in quanto è il sensore maggiormente circondato da altri sensori. Questa operazione viene poi ripetuta fino a ottenere il numero di sensori desiderato.
- approccio casuale: i sensori vengono selezionati in modo casuale e questa operazione è stata ripetuta cinque volte per ogni set considerato.

Successivamente, nell'analisi C2 l'effetto della riduzione del numero di sensori di pressione è stato combinato con il modello non accurato. Infatti, è stato considerato il modello utilizzato nell'analisi B3, ovvero contenente un errore assoluto medio del 20% su tutti i dati di domanda idrica e del 5% sui valori di scabrezza, unitamente ai set di sensori di pressione ottenuti con l'approccio uniforme.

Valutazione delle potenzialità e delle criticità  
dei metodi model-based per la localizzazione delle perdite

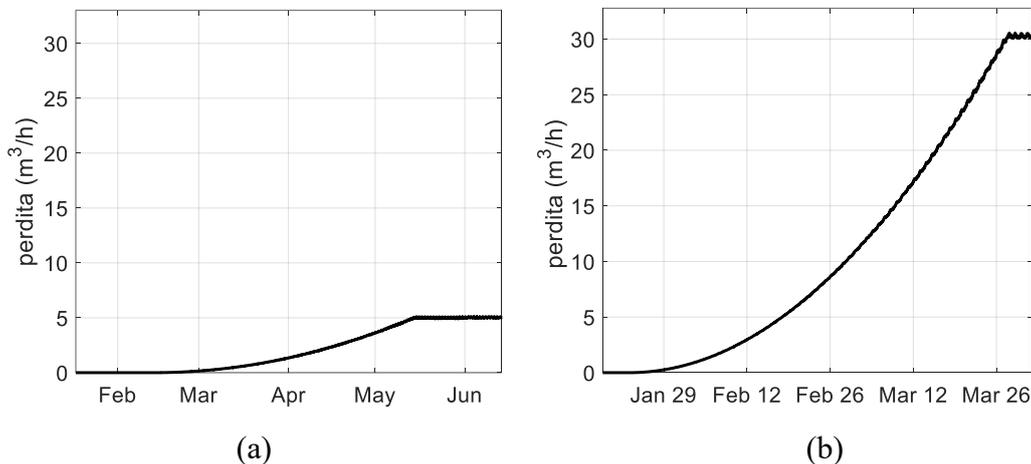
**Tabella 4.1.** Riassunto delle analisi effettuate per i bursts

Analisi	Accuratezza del modello	Accuratezza dei dati	Numero di sensori	Approccio dei dati
A	Perfetto	Perfetto	29	Snapshot Averaging Stacked Hourly stacked
B1	Errore del 20% nei consumi idrici	Perfetto		
B2	Errore del 5% sulle scabrezze	Perfetto		
B3	Errore del 20% nei consumi idrici e del 5% sulle scabrezze	Perfetto		
B4	Perfetto	Errore dello 0.5 % sui sensori di pressione	29	Hourly stacked
B5	Pattern di domanda medio giornaliero ed errore del 5% sulle scabrezze	Errore dello 0.5 % sui sensori di pressione		
B6	Perfetto	+20% all'entità della perdita - 20% all'entità della perdita		
C1	Perfetto	Perfetto	25 (uniforme e random) 20 (uniforme e random) 15 (uniforme e random) 10 (uniforme e random)	Hourly stacked
C2	Errore del 20% nei consumi idrici e del 5% sulle scabrezze	Perfetto	25 (uniforme) 20 (uniforme) 15 (uniforme) 10 (uniforme)	Hourly stacked

Per ogni analisi e per ogni metodo, è stato calcolato un errore totale di localizzazione sommando 26 valori, uno per ogni perdita, corrispondenti alle distanze tra il centro dell'effettiva condotta in cui è situata la perdita e il centro della condotta identificata (o la distanza media tra il centro dell'effettiva condotta in cui è situata la perdita e il centro delle 288 condotte identificate solo nel caso dell'approccio snapshot nell'analisi A).

### 4.3.4 Analisi D

Come già evidenziato in precedenza, è importante localizzare le perdite incipienti già dai primi giorni della loro comparsa, per ottenere un significativo risparmio della risorsa idrica. Pertanto, è stata analizzata l'efficienza dei due metodi model-based nella localizzazione di questa tipologia di perdite. In particolare, sono state considerate due perdite incipienti, la prima (**Figura 4.5.a**) con un'evoluzione graduale su un periodo di 89 giorni fino a raggiungere una portata di  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ , la seconda (**Figura 4.5.b**) con un'evoluzione graduale su 64 giorni fino a raggiungere una portata di  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ .



**Figura 4.5.** Evoluzione della portata delle due perdite incipienti considerate per l'applicazione dei metodi

I due metodi sono stati applicati ad ogni giorno di evoluzione delle due perdite incipienti, utilizzando il modello perfetto e il miglior approccio nell'utilizzo dei dati determinato attraverso l'analisi A, ovvero l'approccio hourly stacked (come verrà descritto nella sezione *Risultati e discussioni*). Per ogni giorno è stato valutato un errore di localizzazione in termini di distanza tra il centro dell'effettiva condotta in cui la perdita era situata e il centro della condotta identificata.

**Tabella 4.2.** Riassunto delle analisi effettuate sulle perdite incipienti

Portata minima ( $m^3/h$ )	Portata massima ( $m^3/h$ )	Giorni di evoluzione	Accuratezza del modello e dei dati	Numero di sensori	Approccio dei dati
0	5	89	Perfect	29	Hourly stacked
0	30	64	Perfect	29	Hourly stacked

## 4.4 Risultati e discussioni

### 4.4.1 Analisi A

L'analisi A è stata condotta per determinare l'approccio migliore con la quale sfruttare i dati derivanti dal monitoraggio della rete. Gli errori totali di localizzazione ottenuti per ciascun metodo utilizzando i quattro approcci diversi considerati sono riportati nella **Tabella 4.3**. L'approccio snapshot ha portato all'errore più elevato nel caso del metodo LA e a un errore altrettanto elevato nel caso del metodo SM. Ciò è probabilmente dovuto all'utilizzo di dati corrispondenti a una piccola finestra temporale (5 minuti), che possono quindi essere influenzati dal consumo delle utenze ovvero non essere rappresentativi del comportamento della rete. Si tratta inoltre di un approccio svantaggioso in quanto deve essere applicato più volte. L'approccio stacked ha portato all'errore più elevato per il metodo SM, probabilmente a causa di valori contrastanti nella determinazione dei coefficienti di correlazione, mentre ha portato a buoni risultati con il metodo LA. Tuttavia, vale la pena sottolineare che, nel caso del metodo LA, l'approccio stacked richiede il tempo di calcolo più lungo, a causa dell'elevato numero di vincoli considerati nel problema di ottimizzazione. L'approccio averaging ha portato a errori elevati con entrambi i metodi. In questo caso, la media dei valori di pressione sull'intera giornata può smorzare i segnali, con la conseguente perdita di informazioni molto importanti riguardo alle fluttuazioni di pressione giornaliere.

**Tabella 4.3.** Errori di localizzazione ottenuti per ogni metodo dall'Analisi A, ovvero con i diversi approcci nell'utilizzo dei dati, dalle Analisi B1-B6, ovvero con diverse imprecisioni nei dati e nel modello, e dalle analisi C1-C2 con l'approccio uniforme e, tra parentesi, l'approccio random

Analisi	Accuratezza del modello e dei dati	Numero di sensori	Approcci o dei dati	Errore di localizzazione (m)	
				LA	SM
A	Perfetto	29	Snapshot	911	807
			Averaging	716	635
			Stacked	51	1147
			Hourly stacked	51	619
B1	Errore del 20% nei consumi idrici	29	Hourly stacked	1495	1732
B2	Errore del 5% sulle scabrezze			3418	3340
B3	Errore del 20% nei consumi idrici e del 5% sulle scabrezze			4502	3076
B4	Errore dello 0.5 % sui sensori di pressione Pattern di domanda medio giornaliero ed errore del 5% sulle scabrezze			4711	3027
B5	errore del 5% sulle scabrezze e dello 0.5 % sui sensori di pressione +20% all'entità della perdita			14680	14540
B6	- 20% all'entità della perdita			-	719
C1	Perfetto	25	Hourly stacked	(51 - 226) 51	(708 - 1020) 619
		20		(51 - 802) 51	(884 - 2050) 708
		15		(275 - 774) 275	(1385 - 2580) 1082
		10		(716 - 2500) 461	(3440 - 6190) 1281
C2	Errore del 20% nei consumi idrici e del 5% sulle scabrezze	25	Hourly stacked	2699	2964
		20		3845	3161
		15		3007	2627
		10		3093	3496

Nel complesso, i risultati migliori sono stati ottenuti con l'approccio hourly stacked. In effetti, questo approccio può essere considerato come una combinazione degli altri, in quanto utilizza una finestra temporale di un'ora, in cui

i dati vengono mediati e poi uniti. Ciò comporta una riduzione delle problematiche degli altri approcci.

Complessivamente, considerando l'approccio migliore, ossia l'hourly stacked, è necessario sottolineare che il metodo che ha fornito i risultati migliori non è stato il SM, come ci si sarebbe potuto aspettare visto l'utilizzo della portata esatta della perdita, ma il LA, con un errore di 51 *m* contro 619 *m*, anche se per ottenere questo risultato sono state necessarie più iterazioni. In ogni caso, sulla base di questi risultati, per tutte le analisi successive, è stato utilizzato l'approccio hourly stacked, e questi valori sono stati presi come riferimento, poiché sono stati ottenuti con il modello perfetto e con la totalità dei sensori di pressione disponibili.

#### **4.4.2 Analisi B1-B6**

Le analisi B1-B6 sono state effettuate per valutare gli effetti sulla localizzazione delle perdite sia di un modello idraulico non accurato sia di imprecisioni nei dati misurati. Gli errori di localizzazione ottenuti sono riportati nella **Tabella 4.3**.

In particolare, i due metodi hanno riportato risultati simili nell'analisi B1, ossia considerando un modello con un errore medio assoluto del 20% nei pattern di domanda. Come prevedibile, gli errori di localizzazione aumentano rispetto a quando si utilizza il modello perfetto, a causa della riduzione dell'accuratezza del modello idraulico. Tuttavia, si può notare che la perturbazione introdotta nei consumi idrici ha avuto un impatto maggiore sul metodo LA. Infatti, l'errore di 1495 *m* ottenuto in questa analisi è quasi 30 volte superiore al corrispondente errore di 51 *m* riscontrato con il modello perfetto nell'Analisi A. I due metodi hanno mostrato risultati simili anche nell'analisi B2, in cui è stato considerato un modello con un errore medio assoluto del 5% nei valori di scabrezza. Tuttavia, in questo caso gli errori di localizzazione sono quasi raddoppiati rispetto all'analisi precedente, evidenziando così il maggior effetto causato dall'utilizzo di valori di scabrezza inaccurati delle condotte, e, di conseguenza, sottolineando l'importanza

di disporre di sistemi GIS accurati che presentino informazioni aggiornate relative al materiale e all'età delle condotte.

Nell'analisi B3 sono stati considerati contemporaneamente gli errori presenti nelle due analisi precedenti, creando così un modello idraulico inaccurato in tutte le sue proprietà. Il metodo SM ha prodotto un errore totale di 3076 *m*, dimostrandosi più robusto alle imprecisioni del modello rispetto al metodo LA, che ha prodotto un errore totale di 4502 *m*, superiore del 46% rispetto a SM. Più in dettaglio, vale la pena di sottolineare che, per entrambi i metodi, circa il 75% dell'errore è legato alla localizzazione di perdite con una piccola portata, cioè sotto i 15  $m^3/h$ , mentre per le portate di perdita superiori a 15  $m^3/h$ , i metodi hanno prestazioni simili, con un errore medio di 45 *m* nel caso dello SM e di 61 *m* nel caso del LA. Pertanto, quest'analisi evidenzia come disporre di modelli non accurati non permetta una localizzazione precisa delle perdite di bassa entità, in quanto effettivamente queste causano piccole variazioni di pressione del sistema che possono essere quindi mascherate dagli errori presenti nel modello. Tuttavia queste perdite sono proprio quelle che a lungo termine possono determinare il maggior quantitativo di acqua sprecata.

Le imprecisioni nei dati misurati, considerate nell'analisi B4, hanno portato a errori simili a quelli dovuti a un modello inaccurato considerato nell'analisi precedente, e di nuovo il metodo SM si è dimostrato più robusto.

Combinando, successivamente, nell'analisi B5 tutte le imprecisioni fino ad ora valutate singolarmente, ovvero gli errori nelle proprietà del modello e le imprecisioni nei dati misurati, e considerando un pattern di consumo idrico medio giornaliero, tipicamente utilizzato dai gestori idrici, si può notare come gli errori aumentino significativamente per entrambi i metodi, fino a un valore medio di circa 560 *m* per perdita. Questo permette di rimarcare l'importanza del modello perfetto, creato da un monitoraggio accurato dei consumi, grazie al quale si è ottenuto un errore medio di localizzazione di soli 13 *m* per perdita contro i 560 *m* ottenuti in questa analisi.

Infine, poiché il metodo SM richiede la conoscenza della portata della perdita, nell'analisi B6 è stato considerato l'impatto dell'utilizzo di una portata errata,

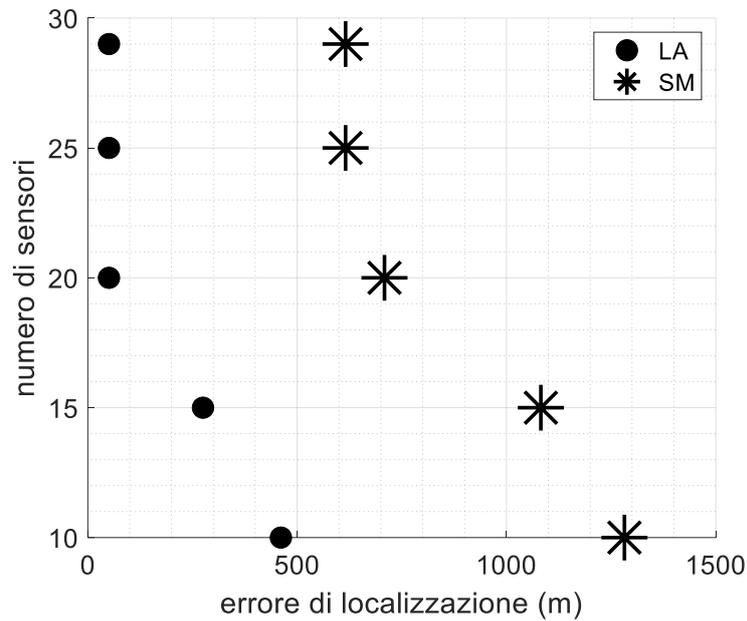
ovvero l'entità della perdita fornita come input al metodo è stata modificata di un 20% sia in positivo che in negativo. Gli errori di localizzazione ottenuti risultano essere vicini a quello ricavato con l'utilizzo della portata esatta (619 m, ottenuti nell'analisi A), dimostrando ovvero la robustezza del metodo SM alla variazione dell'entità della perdita.

### 4.4.3 Analisi C1-C2

Le Analisi C1 e C2 sono state eseguite per valutare l'impatto di un numero ridotto di sensori. Per quanto riguarda l'analisi C1, la **Tabella 4.3** e la **Figura 4.6** mostrano gli errori di localizzazione ottenuti con l'approccio uniforme quando si considerano set di 25, 20, 15 e 10 sensori di pressione. Si può notare che, con entrambi i metodi, la riduzione a 20 sensori non comporta una grande diminuzione dell'accuratezza, indicando quindi che i 9 sensori rimossi erano in eccesso e le loro informazioni ridondanti. Proseguendo, invece, nella riduzione dei sensori, l'errore inizia ad aumentare notevolmente. In realtà, anche quando si considerano solo 10 sensori, il metodo LA può essere comunque considerato efficiente, poiché gli errori che fornisce sono inferiori rispetto a quelli ottenuti con il metodo SM considerando tutti i 29 sensori.

Per quanto riguarda l'approccio casuale, gli intervalli degli errori di localizzazione ottenuti per tutti i set con le 5 diverse scelte casuali sono riportati nella **Tabella 4.3** tra parentesi. È bene sottolineare che questi errori si mantengono sempre superiori o al più uguali ai valori corrispondenti ottenuti con l'approccio uniforme, evidenziando così l'importanza del posizionamento dei sensori ai fini di una copertura uniforme della rete.

Questi risultati sono stati ottenuti tuttavia utilizzando il modello perfetto. Infatti, nell'analisi C2, nella quale è stato considerato il modello con imprecisioni sia nei consumi idrici che nelle caratteristiche delle condotte, gli errori sono molto più elevati - tra i 2500 m e i 4500 m.



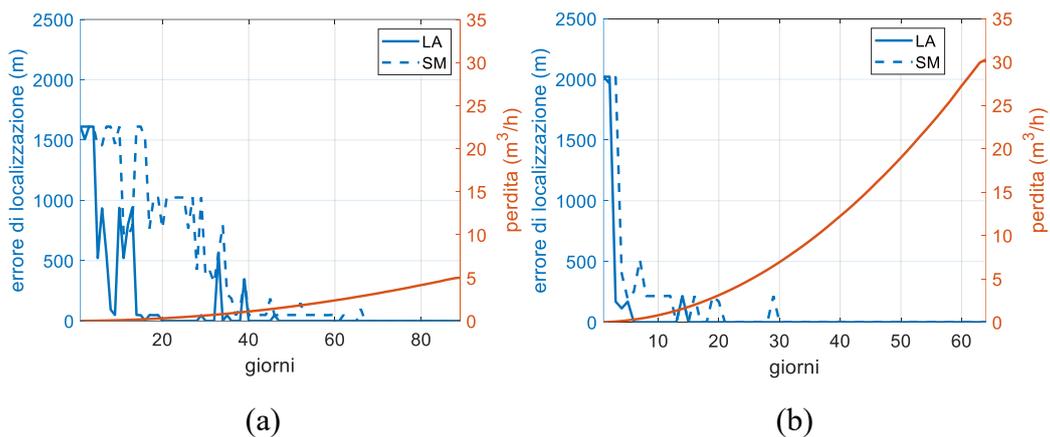
**Figura 4.6.** Errori di localizzazione del metodo LA (punto) e del metodo SM (asterisco) considerando la totalità dei sensori e i set ottenuti con l'approccio uniforme nell'analisi C1

In sintesi, le analisi effettuate sui bursts hanno permesso di individuare l'approccio più efficiente per l'utilizzo dei dati, ovvero l'hourly stacked, con il quale è stato possibile evidenziare l'importanza sia di disporre di un modello molto accurato, che rifletta le caratteristiche del sistema, sia di disporre di sensori dislocati uniformemente nella rete.

#### 4.4.4 Analisi D

Per quanto riguarda l'Analisi D, in **Figura 4.7** sono riportati gli andamenti degli errori di localizzazione ottenuti per ogni giorno di evoluzione delle due perdite incipienti considerate, insieme ai rispettivi andamenti della portata persa. Per entrambi i metodi è possibile osservare un andamento decrescente degli errori all'aumentare della portata. Ciò è dovuto al fatto che maggiore è la portata persa, maggiore è l'impatto sulle pressioni, facilitando così la localizzazione. Più in dettaglio, con riferimento alla prima perdita (**Figura 4.7.a**), il metodo LA mostra un errore di circa 1500 m solo per i primi 4 giorni. Successivamente l'errore resta

stabile a circa 1000 m per i successivi 10 giorni, fino a che la portata persa raggiunge una valori di  $0.2 \text{ m}^3/h$  e viene localizzata correttamente. Il metodo SM, invece, mostra un errore di circa 1500 m per le prime due settimane, stabilizzandosi poi a 1000 m fino al 30° giorno. La perdita inizia a essere localizzata correttamente solo quando la portata diventa superiore a  $2 \text{ m}^3/h$ . Con riferimento alla seconda perdita (**Figura 4.7.b**), dopo soli 5 giorni, ovvero quando la portata è arrivata a  $0.3 \text{ m}^3/h$ , il metodo LA presenta un errore nullo, ovvero una corretta localizzazione, mentre il metodo SM localizza correttamente la perdita dopo 20 giorni, ossia quando la portata è aumentata a  $3 \text{ m}^3/h$ . Pertanto, con un modello perfetto, il metodo LA è in grado di localizzare correttamente le perdite incipienti alle portate più basse.



**Figura 4.7.** Andamento dell'errore di localizzazione per LA (linea continua blu) e SM (linea tratteggiata blu) per ogni giorno di evoluzione delle due perdite incipienti considerate

Tuttavia, se si considera il modello dell'Analisi B3, ovvero con pattern di domanda e valori di scabrezza non accurati, è il metodo SM a essere più efficiente alle basse portate. Infatti, con riferimento alla prima perdita incipiente, alla fine del periodo di evoluzione, ovvero quando la perdita è al massimo della portata, il metodo SM fornisce una corretta localizzazione, mentre il metodo LA restituisce un errore di 50 m. Per quanto riguarda la seconda perdita, alla fine del periodo entrambi i metodi la localizzano correttamente, data l'elevata portata. Tuttavia, se

si considera il giorno in cui la portata della perdita è di circa  $5 \text{ m}^3/h$ , il metodo SM fornisce un errore di  $50 \text{ m}$ , mentre l'errore del metodo LA è di  $170 \text{ m}$ .

## 4.5 Conclusioni

In questo studio due metodi model-based per la localizzazione delle perdite, il metodo Linear Approximation e il metodo Sensitivity Matrix, entrambi già proposti nella letteratura, sono stati analizzati e applicati a un caso studio. In particolare, varie analisi sono state effettuate per valutare gli aspetti critici legati alla loro applicazione, come la gestione dei dati utilizzati, gli effetti di imprecisioni nel modello idraulico e nei dati misurati, e il numero di sensori di pressione.

I risultati hanno mostrato che l'approccio migliore in termini di utilizzo dei dati è l'hourl stacked, il quale utilizza tutti insieme i dati medi orari. Il metodo LA si è dimostrato essere più accurato con l'utilizzo di un modello idraulico perfetto anche con un ridotto numero di sensori di pressione, mentre il Sensitivity Matrix è risultato essere più robusto con l'utilizzo di modelli inaccurati. Per quel che riguarda le perdite incipienti, è stato valutato come gli errori diminuiscono all'aumentare del flusso perso, e quindi dell'impatto di queste perdite sulle pressioni nella rete. Le analisi condotte in questo studio potrebbero essere d'aiuto ai gestori idrici, in quanto potrebbero consentire a queste ultime di scegliere il metodo più efficiente in base alla loro situazione e avere così una stima dell'errore di localizzazione che si può commettere.

Più in generale, con questo studio è stato possibile evidenziare l'importanza di un accurato monitoraggio della rete per arrivare a un efficace localizzazione delle perdite. Infatti, la dettagliata conoscenza dell'andamento nel tempo dei consumi delle singole utenze permette una corretta realizzazione e accurata taratura dei modelli idraulici, ottenendo uno strumento in grado di descrivere e simulare nel modo più realistico possibile il comportamento della rete, e garantire un accurata localizzazione delle perdite anche di bassa entità. Nondimeno, grazie alla quotidiana acquisizione di dati attraverso i sensori smart, vi è la possibilità di

aggiornare continuamente il modello di simulazione idraulica, ed eseguire, così, sempre nuovi confronti tra i risultati di simulazione e i dati di campo. Tali confronti potrebbero permettere di identificare e localizzare con tempestività nuove rotture e, di conseguenza, nuove perdite.

È quindi possibile arrivare quindi a una gestione consapevole e sostenibile dell'infrastruttura acquedottistica, ovvero controllando attivamente le perdite idriche, grazie alla combinazione dei tradizionali approcci di modellazione delle reti acquedottistiche con le informazioni provenienti in tempo reale dal sistema di smart metering.



## **Lo smart meter per la caratterizzazione dei consumi e la messa a punto dei modelli idraulici**

In questo capitolo si valuta quanto sia importante disporre di un monitoraggio accurato tramite smart meter per garantire una corretta caratterizzazione dei consumi idrici, facendo particolare riferimento a periodi particolari in cui si possono determinare cambiamenti significativi come la situazione emergenziale causata dalla pandemia di COVID-19. In particolare, viene presentato un caso studio reale, ovvero un distretto idrico della città di Rovigo, in cui, nonostante le limitazioni imposte e il distanziamento sociale, i contatori intelligenti hanno permesso di analizzare i consumi idrici delle utenze e i loro cambiamenti dovuti al lockdown. Tuttavia, essendo gli smart meter strumenti ancora in via sviluppo, essi presentano lati negativi e problematiche in termini di costo, comunicazione e gestione dei dati, le quali vengono descritte più ampiamente successivamente nel capitolo.

Questo capitolo è basato sulla seguente pubblicazione su rivista scientifica:

Alvisi, S., Franchini, M., Luciani, C., Marzola, I., Mazzoni, F. (2021) “Effects of the COVID-19 Lockdown on Water Consumptions: Northern Italy Case Study”, *Journal of Water Resources Planning and Management – ASCE*



Il recente e forte processo innovativo delle tecnologie informatiche e digitali sta guidando l'economia globale e penetrando in tutti i settori, dalla sanità alla cultura, grazie allo sviluppo delle nuove reti 5G, della sensoristica, dell'intelligenza artificiale e dell'IoT, permettendo quindi l'utilizzo di metodi sempre più avanzati per la raccolta di informazioni e di sistemi di supporto computazionale (Adedeji et al. 2022)

Negli ultimi anni, queste tecnologie informatiche sono state applicate anche ai sistemi di distribuzione acquedottistici per assistere i gestori idrici (Ramos et al. 2022). Si tratta infatti dell'utilizzo di sensori wireless, per monitorare i parametri principali della rete come portata, pressione o la qualità dell'acqua in continuo, in quanto il basso consumo energetico consente di mantenerli in funzione per lunghi periodi senza costi energetici rilevanti (Carminati et al. 2017). Il più importante tra questi sensori è lo smart meter, ovvero un contatore dell'acqua intelligente, in grado di misurare accuratamente e memorizzare i consumi idrici delle utenze a passi temporali variabili da 5 minuti a giornaliero, e inviarli al gestore idrico, tramite segnali radio o sfruttando la rete internet.

I vantaggi di un monitoraggio della rete attraverso l'uso di smart meter sono vari e coinvolgono sia il fornitore che il consumatore finale. Infatti per il gestore idrico, oltre alle alte prestazioni, essi consentono una riduzione dei costi di gestione delle letture e una frequenza superiore di lettura. Dal lato dell'utente, le letture vengono effettuate senza necessità di accedere alla proprietà ed eventuali perdite interne o consumi anomali vengono segnalati in tempi ridotti.

Essi inoltre, permettono anche una gestione più efficiente e sostenibile dei sistemi di distribuzione acquedottistica, in quanto di grande utilità per il controllo delle

perdite idriche. Infatti, nei capitoli precedenti si è sottolineata l'importanza di disporre di smart meter per analizzare nel dettaglio il consumo dell'utenza, e quindi procedere sia ad una accurata valutazione del livello di perdita idrica e sua caratterizzazione, sia per ottenere un modello idraulico affidabile per localizzare le perdite.

Nondimeno, gli smart meter permettono di raccogliere dati, ovvero controllare e verificare il consumo idrico delle utenze, quasi in tempo reale. Collegando questi flussi di dati al modello idraulico, ovvero aggiornando continuamente le sue proprietà, si ottiene un modello in grado di descrivere fedelmente e in tempo reale lo stato del sistema. Questo modello viene chiamato "digital twin", in quanto è una copia digitale molto accurata del sistema di distribuzione idrico.

I suoi scopi e le sue potenzialità sono molteplici. Esso fornisce innanzitutto una migliore conoscenza e comprensione del sistema idrico. Grazie a esso, inoltre è anche possibile ottimizzare i pompaggi e i setting delle valvole, in modo da aumentare l'efficienza del sistema e migliorare il servizio fornito. Nondimeno, consente di simulare eventuali interventi e modifiche prima che vengano effettivamente attuati sul sistema reale, riducendo al minimo i rischi (Alzamora et al. 2021).

Con la possibilità, poi, di aggiornare continuamente il modello di simulazione idraulica, è possibile eseguire sempre nuovi confronti tra i risultati di simulazione e i dati di campo, e quindi identificare e localizzare con tempestività nuove rotture e, di conseguenza, nuove perdite.

Monitorare la rete tramite smart meter permette anche di riuscire a identificare tempestivamente anomalie nel sistema, o particolari cambiamenti nei consumi idrici. Infatti, le variazioni nei consumi idrici possono essere un problema per i gestori e possono rivelare le vulnerabilità delle reti di distribuzione idrica.

Ad esempio, forti diminuzioni di consumi di acqua possono provocare zone di ristagno dell'acqua, con conseguente aumento dell'età dell'acqua, del decadimento dei disinfettanti e della crescita microbica (Faust et al. 2020). Inoltre, grandi

variazioni del consumo idrico possono alterare i flussi d'acqua al punto da richiedere nuovi criteri operativi per un'adeguata gestione della rete. Questi cambiamenti possono insorgere in caso di situazioni emergenziali, come siccità, terremoti o inquinamento, durante le quali il gestore deve comunque riuscire a gestire il sistema in maniera ottimale e non interrompere il servizio.

Di recente, la pandemia di COVID19 ha messo a dura prova i gestori idrici. Durante l'insorgenza della malattia epidemica era fondamentale avere una fornitura stabile di acqua potabile, proprio per garantire la salute della popolazione. Tuttavia, sia in Italia che in altre nazioni, i lockdown imposti per limitare la diffusione della malattia hanno fortemente modificato le abitudini degli utenti. Nonostante il distanziamento sociale imposto, grazie agli smart meter è stato comunque possibile valutare gli impatti delle restrizioni attuate sui consumi idrici, e le informazioni fornite sono state necessarie per garantire la disponibilità di acqua per la popolazione e per il mantenimento dei servizi essenziali (Balacco et al. 2020; Kalbusch et al. 2020).

Nonostante tutti i vantaggi appena elencati dell'utilizzo degli smart meter ed analizzati anche nei capitoli precedenti, è bene non dimenticare che questi nuovi contatori intelligenti sono ancora in via di sviluppo e possono rappresentare una sfida per i gestori. Oltre al costo più elevato rispetto a un contatore meccanico tradizionale, tantissime variabili possono impattare sulla comunicazione e sulla ricezione rendendo difficile la raccolta dei dati, senza considerare che tutti i dati di consumo devono essere raccolti, gestiti e analizzati dal gestore tramite server e software appositi.

In questo capitolo, in primo luogo verrà analizzato come il lockdown del 2020 dovuto alla pandemia COVID-19 ha impattato sugli andamenti dei consumi idrici e sulle abitudini delle persone, con riferimento al caso di studio di un quartiere residenziale nella città di Rovigo, in Veneto, il quale è monitorato a livello di singolo utenza tramite smart meter.

Successivamente verranno evidenziate e discusse le maggiori problematiche che il gestore idrico può riscontrare nel monitoraggio delle utenze tramite smart meter.

## **5.1 Effetti della pandemia da COVID19 sui consumi idrici delle utenze**

Per limitare la diffusione della pandemia da COVID19, il governo italiano ha adottato una serie di misure restrittive. In particolare, dal 23 Febbraio 2020 il governo ha ordinato l'isolamento domiciliare e la sospensione di tutte le attività scolastiche e lavorative non essenziali, nonché delle attività ricreative e sportive. L'11 Marzo 2020 sono stati chiusi tutti gli esercizi commerciali (ad eccezione di quelli che dedicati alla vendita di beni di prima necessità), ed è stato imposto il divieto di viaggiare al di fuori del comune di residenza, ad eccezione di documentate esigenze lavorative, situazioni di assoluta urgenza, o per motivi di salute. Queste misure sono rimaste in vigore fino al 4 Maggio 2020, momento in cui le restrizioni hanno iniziato ad essere gradualmente revocate, e sono state riaperte diverse attività e strutture. Pertanto, dall'11 Marzo al 3 Maggio 2020 l'Italia ha vissuto un periodo di lockdown con blocco delle attività e degli spostamenti (Governo Italiano 2020).

Gli effetti che questo lockdown ha causato sulle abitudini degli abitanti, e quindi sul loro consumo idrico, sono stati analizzati con riferimento a un distretto idrico nella città di Rovigo, in Veneto, in cui il monitoraggio dei consumi idrici a livello di singola utenza tramite smart meter è in corso da Aprile 2019. È stato quindi possibile effettuare un confronto tra l'andamento dei consumi idrici durante la pandemia e quello nell'anno precedente. Le analisi sono state condotte a diversi livelli di aggregazione temporale e spaziale, fino a valutare i profili orari di consumo delle singole utenze.

Nelle sezioni seguenti vengono introdotti il caso studio e l'operazione di raccolta dei dati degli smart meter. Viene poi descritta la metodologia adottata per valutare

l'impatto della pandemia da COVID-19 sui consumi idrici. Infine, vengono analizzati i risultati ottenuti e discusse alcune considerazioni finali.

### **5.1.1 Caso studio**

Il caso di studio considerato riguarda il distretto della Commenda, situato nella città di Rovigo, una città di provincia del Veneto, gestito dalla società di servizi idrici acquevenete S.p.A.

Il distretto della Commenda copre un'area prevalentemente residenziale vicino al centro della città, e comprende 301 utenze, di cui 288 residenziali e 13 commerciali (di cui, ad esempio, una farmacia, una ferramenta, un centro benessere e un parrucchiere). Più nel dettaglio, questo distretto prevalentemente residenziale è popolato da una comunità con reddito medio, con residenti single, coppie, e famiglie con uno o più figli. In particolare, il numero medio di residenti per utenza è di circa 3 persone, e il 60% delle utenze residenziali vive in case unifamiliari o bifamiliari, mentre circa il 40% vive in appartamento.

A partire dalla fine di settembre 2018, la rete di distribuzione idrica del distretto è stata completamente sottoposta a un completo rinnovamento, che ha compreso anche l'installazione di nuovi allacciamenti alle utenze. Inoltre, tutti i contatori meccanici tradizionali sono stati sostituiti con smart meter di nuova generazione in grado di registrare i dati del volume cumulato con risoluzione temporale oraria. Grazie ad essi, è stato possibile ottenere le serie temporali del volume cumulato a passo orario per ciascuna delle 301 utenze e per un periodo compreso tra il 4 Aprile 2019 e il 3 Maggio 2020, le quali hanno permesso di:

- analizzare i consumi idrici residenziali e commerciali durante il periodo in cui sono state applicate le restrizioni fino al lockdown totale (dal 1° Febbraio al 3 Maggio 2020);
- confrontare i consumi idrici durante il lockdown (dal 4 Aprile al 3 Maggio 2020) e i consumi corrispondenti all'anno precedente (dal 4 Aprile al 3 Maggio 2020).

### 5.1.2 Analisi effettuate

Prima di valutare gli effetti causati dal lockdown sui consumi idrici, l'intero dataset di utenze è stato sottoposto a una pulizia preliminare. Operativamente, il processo di pulizia si è sviluppato nelle seguenti fasi: (1) rimozione delle utenze con contatore chiuso, contratti cessati o che abbiano effettuato voltture; (2) rimozione delle utenze con consumi idrici nulli a causa di proprietari assenti; (3) rimozione delle utenze con dati mancanti o errati, a causa di malfunzionamenti dei contatori; (4) rimozione delle utenze affette da perdite interne. In particolare, il set (1) di utenze da rimuovere è stato individuato utilizzando il database del gestore idrico e identificando le utenze con contratti chiusi o che hanno effettuato voltture nell'ultimo anno. Nell'insieme (2) sono state inserite le utenze che non hanno consumato acqua per un periodo di almeno due settimane. L'insieme (3) è stato identificato tramite le utenze caratterizzate da dati di consumo negativi o da periodi di dati mancanti di almeno due giorni. Infine, nell'insieme (4) sono state inserite le utenze affette da perdite interne con portate uguali o maggiori a  $1 \text{ L/h}$ , i quali, a loro volta, sono stati rilevati attraverso l'algoritmo proposto da Luciani et al. (2019).

Alla fine del processo di pulizia appena descritto, sono rimaste complessivamente le serie temporali dei consumi idrici a passo orario di un totale di  $NT = 216$  utenze (di cui  $NR = 208$  utenze residenziali e  $NC = 8$  utenze commerciali). Per brevità, gli insiemi di utenze saranno da qui in avanti identificati come  $UT$  per tutte le utenze,  $UR$  per le sole utenze residenziali e  $UC$  per le sole utenze commerciali.

Inoltre, sono state effettuate analisi per garantire che le variazioni dei consumi idrici durante il periodo di lockdown non fossero dovute a fattori sociodemografici o climatici. Per quanto riguarda i fattori sociodemografici, sono state analizzati sia i database del gestore idrico sia le informazioni fornite direttamente dai tecnici, le quali hanno mostrato che: (1) non c'è stata una variazione sostanziale del numero di utenze tra il 2019 e il 2020; (2) il costo

dell'acqua non ha subito variazioni; (3) non sono state effettuate campagne di sensibilizzazione durante gli anni 2019 e 2020. Per quanto riguarda i fattori climatici, stati presi in considerazione i dati relativi alla temperatura e alle precipitazioni. In primo luogo, è stato osservato che le temperature e le precipitazioni mensili degli anni 2019 e 2020 erano coerenti con i valori del decennio precedente (cioè, anni 2010-2018) e non erano caratterizzati da valori anomali. In secondo luogo, è stato verificato, tramite test di significatività, che il consumo di acqua durante il periodo di lockdown e i fattori climatici non erano statisticamente correlati.

Le serie temporali dei volumi cumulati raccolti a passo orario per ogni utenza durante il periodo di monitoraggio sono stati trasformati in serie temporali di volumi orari ( $m^3/h$ ), le quali sono state analizzate a diversi livelli di aggregazione temporale e spaziale.

Inizialmente, le analisi sono state condotte su scala temporale giornaliera, raggruppando tutte le utenze (cioè a livello dell'intero insieme di  $UT$ ). A queste è seguito un esame più dettagliato del consumo giornaliero di acqua di ogni singola utenza  $u$  ( $u = 1, \dots, NT$ ). Per quanto riguarda la scala temporale oraria, è stata condotta un'analisi dei consumi idrici residenziali sia a livello dell'intero insieme  $UR$  sia per ogni singola utenza residenziale  $r$  ( $r = 1, \dots, NR$ ). I consumi idrici commerciali, dato il limitato campione di dati disponibili e la natura molto diversa di ogni utenza commerciale sono stati analizzati per ogni singola utenza  $c$  (cioè per  $c = 1, \dots, NC$ ). Pertanto, in totale, sono state condotte quattro analisi, qui di seguito descritte nel dettaglio.

### **5.1.2.1 Scala temporale giornaliera, utenze raggruppate**

In questa analisi il volume giornaliero di acqua  $V^d$  consumato da tutte le utenze (cioè l'intero insieme  $UT$ ) durante ogni giorno  $d$  del periodo considerato è stato calcolato come:

$$V^d = \sum_{u=1}^{NT} \sum_{H=1}^{24} v_{u,H}^d \quad (27)$$

dove  $NT$  è il numero di utenze nel set considerato, e  $v_{u,H}^d$  è il volume consumato dall'utenza  $u$  ( $u = 1, \dots, NT$ ) durante l'ora  $H$  ( $H = 1, \dots, 24$ ) del giorno  $d$ .

### 5.1.2.2 Scala temporale giornaliera, singoli utenti

La differenza tra il volume medio giornaliero di acqua consumato da ogni singolo utente  $u$  ( $u = 1, \dots, NT$ ) durante il periodo di lockdown e il corrispondente periodo del 2019 è stata calcolata come:

$$\overline{\Delta v}_u = \left( \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \sum_{H=1}^{24} v_{u,H}^d \right)_{2020} - \left( \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \sum_{H=1}^{24} v_{u,H}^d \right)_{2019} \quad (28)$$

dove tutte le variabili all'interno parentesi si riferiscono al periodo di lockdown del 2020 e al corrispondente periodo del 2019, (ovvero Aprile 2020 e Aprile 2019), e  $D$  è il numero di giorni inclusi in ciascun periodo.

### 5.1.2.3 Scala temporale oraria, utenze raggruppate

I coefficienti di consumo orario  $\eta_H$  ( $H = 1, \dots, 24$ ) che costituiscono il profilo del consumo idrico giornaliero sono stati calcolati per la totalità delle utenze residenziali (cioè l'intero insieme  $UR$ ) sia per i giorni feriali che per i fine settimana/giorni festivi come segue:

$$\eta_H = \frac{\frac{1}{T} \sum_{d=1}^T \sum_{r=1}^{NR} v_{r,H}^d}{\frac{1}{T} \frac{1}{24} \sum_{d=1}^T \sum_{r=1}^{NR} \sum_{H=1}^{24} v_{r,H}^d} \quad (29)$$

In questa equazione,  $v_{r,H}^d$  è il volume consumato dall'utenza residenziale  $r$  ( $r = 1, \dots, NR$ ) durante l'ora  $H$  del giorno  $d$ , e  $T$  è il numero di giorni feriali o di fine settimana/festivi che si verificano nel periodo selezionato. Più nel dettaglio, il

numeratore definisce i volumi di acqua consumati nelle ore  $H$  da tutte le utenze residenziali, mediati sui giorni feriali o sui fine settimana/giorni festivi, mentre il denominatore rappresenta il volume di acqua orario consumato da tutte le utenze residenziali, mediato sia su tutte le ore della giornata che sui giorni feriali o sui fine settimana/giorni festivi (cioè sabato, domenica, lunedì di Pasqua, anniversario della Liberazione d'Italia (25 Aprile) e festa del lavoro (1° maggio)).

#### 5.1.2.4 Scala temporale oraria, singoli utenti

Con riferimento a ciascun utente residenziale  $r$  ( $r = 1, \dots, NR$ ), sono state condotte due analisi a scala temporale oraria. In primo luogo, è stata calcolata la differenza tra i volumi medi orari consumati durante il periodo di lockdown e il corrispondente periodo del 2019:

$$\overline{\Delta v}_{r,H} = \left( \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D v_{r,H}^d \right)_{2020} - \left( \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D v_{r,H}^d \right)_{2019} \quad 30)$$

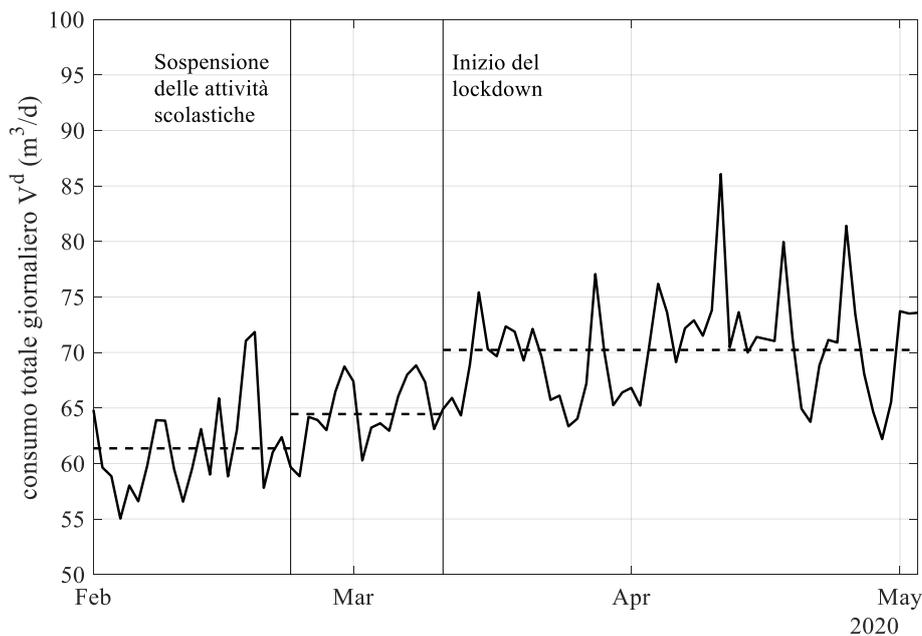
In secondo luogo, i profili ricorrenti del consumo idrico (cluster) sono stati analizzati e gli utenti sono stati classificati in base al cluster più vicino al loro profilo. A questo scopo, l'algoritmo K-means (Lloyd 1982) è stato applicato all'insieme di tutti i profili orari di consumo idrico di ogni singolo utente residenziale  $r$  ( $r = 1, \dots, NR$ ), con riferimento al giorno medio feriale della settimana. In dettaglio, i cluster sono stati definiti a partire da uno spazio di  $2 \cdot NR$  ovvero 416 oggetti (cioè i profili orari di consumi delle  $NR$  utenze per il periodo precedente il lockdown e durante), ognuno dei quali era composto da 24 attributi (cioè i coefficienti di consumo orario  $\eta_H$ ). Il numero di classi in cui suddividere i profili (definite  $K$ ) è stato definito sulla base di un'analisi preliminare della curva di silhouette (Rousseeuw 1987).

I dettagli sui risultati delle analisi condotte sono riportati nella sezione seguente.

## 5.1.3 Risultati e discussioni

### 5.1.3.1 Scala temporale giornaliera, utenze raggruppate

Per quanto riguarda la scala temporale giornaliera e considerando tutti gli *NT* utenti insieme, nel periodo compreso tra il 1° Febbraio e il 3 Maggio 2020 è possibile osservare un incremento del consumo giornaliero di acqua  $V^d$  ( $m^3/d$ ), raffigurato in **Figura 5.1**. In particolare,  $V^d$  è passato da circa  $61.4 m^3/d$  nel periodo precedente la chiusura delle scuole (1-23 Febbraio 2020) a circa  $64.5 m^3/d$  nel periodo di transizione verso la chiusura completa (24 Febbraio - 10 Marzo 2020), fino a raggiungere  $70.2 m^3/d$  durante l'effettivo periodo di lockdown (11 Marzo-3 Maggio 2020).



**Figura 5.1.** Andamento del volume giornaliero di acqua  $V^d$  consumato dall'insieme *UT* nel periodo compreso tra il 1° Febbraio e il 3 Maggio 2020

Inoltre, il confronto tra il volume medio giornaliero del mese di Aprile 2020 (4 Aprile - 3 Maggio 2020) e il volume medio giornaliero nello stesso periodo del

2019 (evidenziati in **Tabella 5.1**) ha rivelato che questo aumento - non imputabile a fattori sociodemografici o a condizioni climatiche anomale, ma dovuto principalmente alle restrizioni e alle chiusure imposte - è stato di circa il 18%.

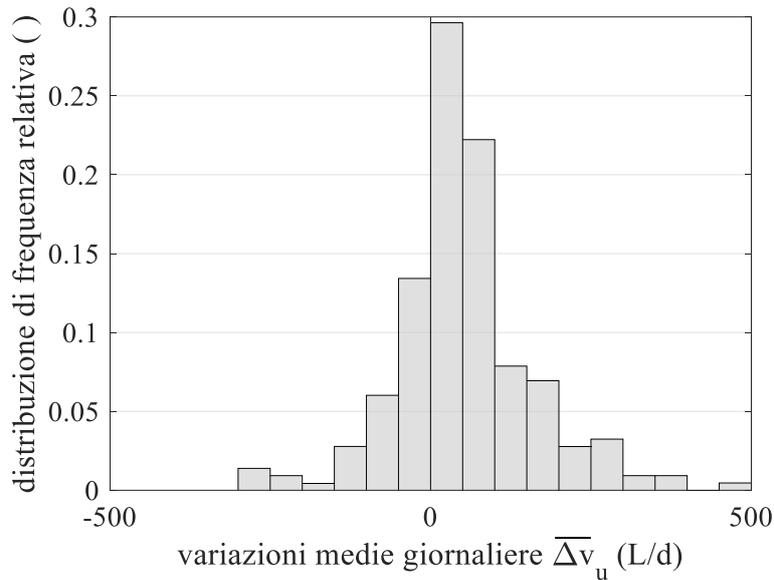
**Tabella 5.1.** Confronto tra il consumo medio giornaliero di acqua degli insiemi *UT*, *UR* e *UC* di Aprile 2020 rispetto ad Aprile 2019

Dataset	Numero di utenze	Consumo medio giornaliero ( $m^3/d$ )		Variazione (%)
		Aprile 2019	Aprile 2020	
Totale ( <i>TU</i> )	216	60.6	71.7	+ 18.3
Residenziale ( <i>RU</i> )	208	59.4	70.8	+ 19.2
Commerciale ( <i>CU</i> )	8	1.2	0.9	- 25.0

In particolare, è emerso che l'aumento dei consumi complessivi è legato soprattutto alle utenze residenziali (sottoinsieme *UR*). Infatti, il sottoinsieme *UR*, che comprende oltre il 96% degli utenti del distretto, ha mostrato un aumento complessivo del 19% del consumo medio giornaliero di acqua (passando da 59.4  $m^3/d$  nel 2019 a 70.8  $m^3/d$  nel 2020) a causa dell'allontanamento sociale, che ha costretto i residenti a restare nelle proprie case. Al contrario, il sottoinsieme *UC*, che rappresenta un numero modesto di utenze, ha ridotto il proprio consumo medio giornaliero di acqua del 25% durante il lockdown rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente. La riduzione del 25% è attribuibile principalmente a poche utenze commerciali, il cui consumo si è azzerato a causa della chiusura forzata degli esercizi commerciali imposta dal governo italiano.

### 5.1.3.2 Scala temporale giornaliera, singoli utenti

Considerando i volumi medi giornalieri consumati da ogni singolo utente  $u$  ( $u = 1, \dots, NT$ ) ( $L/d$ ), è emerso che la maggior parte degli utenti (circa il 75%) ha aumentato il proprio consumo medio giornaliero di acqua nel mese di Aprile 2020 rispetto al mese di Aprile 2019, come evidenziato in **Figura 5.2**.

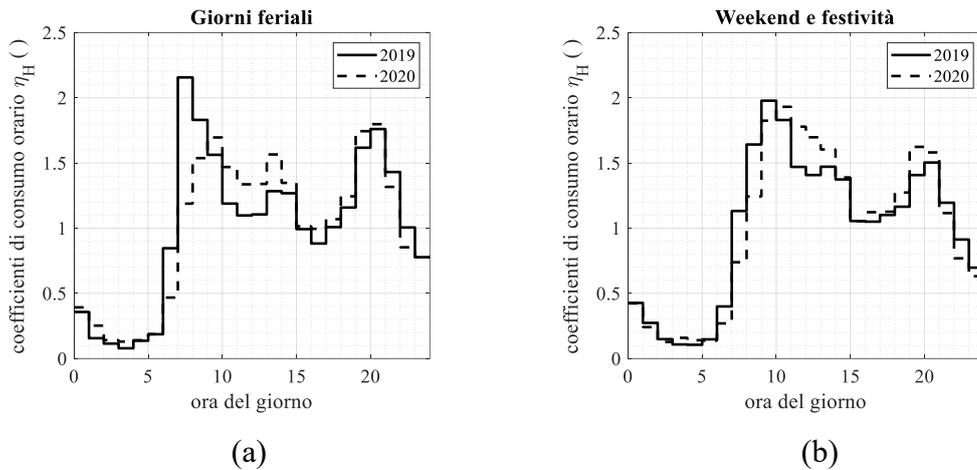


**Figura 5.2.** Distribuzione di frequenza relativa delle variazioni  $\Delta \bar{v}_u$  tra i volumi medi giornalieri consumati da ogni singolo utente  $u$  ( $u = 1, \dots, NT$ ) durante il mese di Aprile 2020 e il mese di Aprile 2019

In circa il 51% dei casi, l'aumento è compreso tra 0 e 100  $L/d$ , mentre una percentuale minore di utenti ha manifestato una diminuzione dei consumi o aumenti addirittura superiori a 200  $L/d$ . Questo aumento è legato principalmente alle utenze residenziali, che rappresentano la quasi totalità dell'insieme, mentre la maggior parte delle utenze commerciali non ha registrato variazioni o ha subito diminuzione nel consumo idrico a causa della chiusura imposta ad alcune di esse. Considerando l'intero set  $UT$ , l'aumento medio è stato di 51.5  $L/d$  con una deviazione standard di 107.5  $L/d$ .

### 5.1.3.3 Scala temporale oraria, utenze raggruppate

I coefficienti di consumo orario  $\eta_H$  ( $H = 1, \dots, 24$ ) dell'intero sottoinsieme  $UR$  sono stati calcolati con riferimento ai soli giorni feriali e per i fine settimana/giorni festivi, e sono riportati in **Figura 5.3**.



**Figura 5.3.** Coefficienti di consumo orario ( $\eta_H$ ) nei mesi di Aprile 2019 (linea continua) e Aprile 2020 (linea tratteggiata) per l'intero sottoinsieme *UR*: (a) nei giorni feriali; e (b) nei fine settimana/ giorni festivi

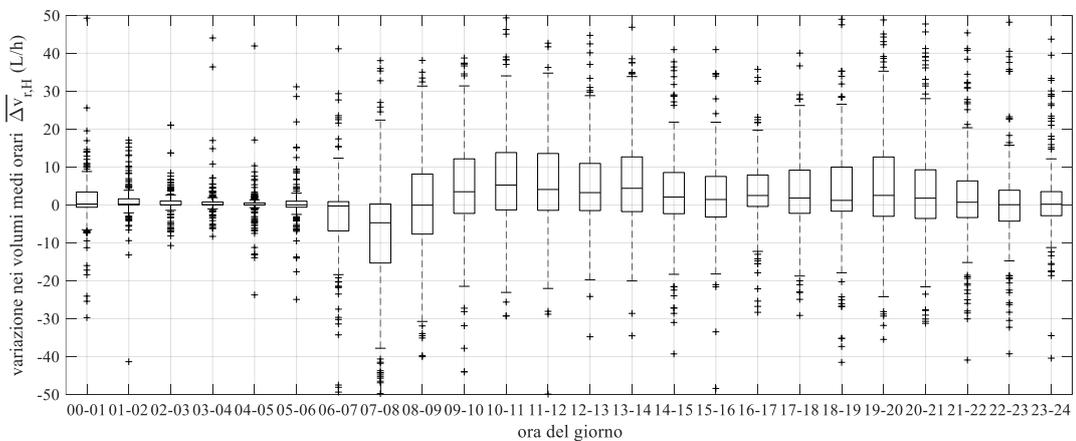
Nel caso dei giorni feriali (**Figura 5.3.a**) il picco di consumo mattutino si è verificato tra le 7:00 e le 8:00 nel 2019 (con  $\eta_H = 2.16$ ), mentre, durante il lockdown, si è osservata una significativa riduzione del suo valore, nonché un ritardo di circa 2 ore (equivalente a un  $\eta_H$  di 1.70 tra le 9:00 e le 10:00). Questo ritardo è attribuibile al fatto che, nei giorni feriali durante il lockdown, i residenti tendevano ad alzarsi più tardi rispetto al mese di Aprile 2019. Con riferimento alle ore diurne, durante il lockdown è stato osservato un aumento generale dei valori di  $\eta_H$ . Questo nuovo profilo suggerisce la presenza di un maggior numero di utenti confinati nelle rispettive abitazioni a causa della chiusura forzata di scuole e luoghi di lavoro.

Considerazioni simili valgono in parte per i coefficienti di consumo orario relativi ai fine settimana e ai giorni festivi (**Figura 5.3.b**). Infatti, durante il periodo di lockdown, si è verificato un leggero ritardo nel picco mattutino, in quanto il valore più alto di  $\eta_H$  è stato spostato in avanti di 1 ora, e si è osservato un aumento generale del consumo di acqua durante le ore diurne.

### 5.1.3.4 Scala temporale oraria, singoli utenti

La **Figura 5.4** rappresenta i box-plot delle differenze  $\overline{\Delta v}_{r,H}$  (L/h) tra i volumi medi orari consumati ad Aprile 2020 e 2019 per i giorni feriali.

I riquadri mostrano valori stretti intorno allo zero tra le ore 2:00 e le ore 5:00 del mattino, indicando che, in media, non ci sono state differenze nel consumo d'acqua notturno tra il 2019 e il 2020.

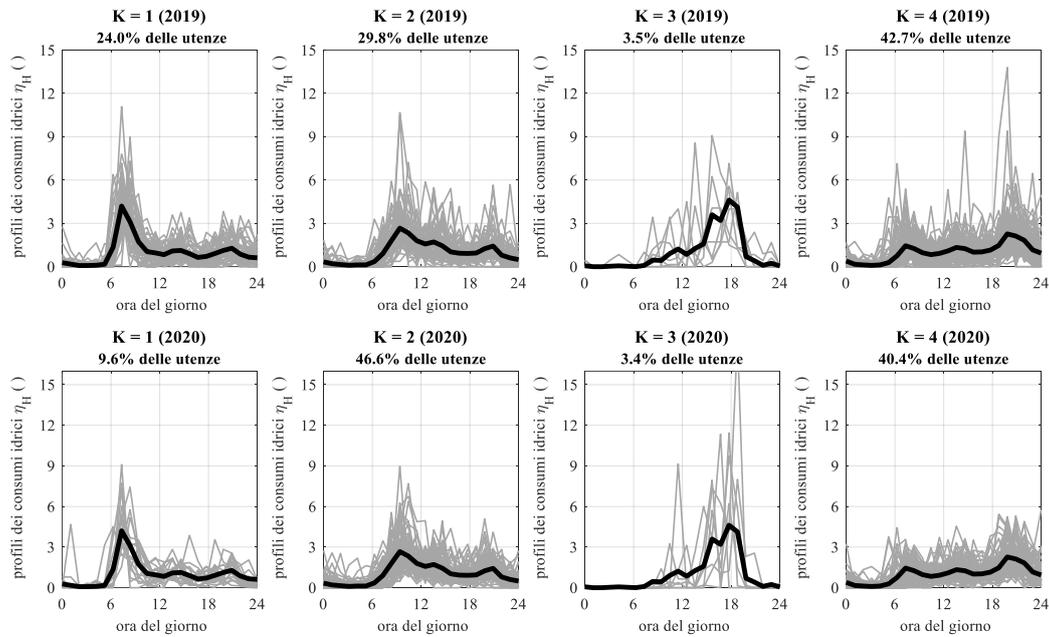


**Figura 5.4.** Box-plot delle differenze ( $\overline{\Delta v}_{r,H}$ ) tra i consumi medi orari nei giorni feriali di Aprile 2020 e quelli di Aprile 2019 per le utenze del set *UR*

Al contrario, le variazioni degli utenti sono state più eterogenee dopo le ore 6:00. In particolare, tra le 6:00 e le 8:00, il 75% degli utenti ha mostrato una riduzione del consumo medio di acqua durante il lockdown rispetto all'anno precedente. Nelle ore diurne successive alle 9:00, invece, il 75% degli utenti ha registrato un aumento del consumo medio di acqua durante il lockdown rispetto al 2019. Risultati analoghi, anche se meno marcati, sono stati ottenuti per i giorni del weekend e i festivi.

Le considerazioni appena effettuate sui profili di consumo idrico residenziale nei giorni feriali sono state ulteriormente supportate dall'analisi dei cluster attraverso l'algoritmo K-means. L'analisi preliminare della curva di silhouette, condotta per identificare il numero ottimale di classi di suddivisione (cioè il valore *K* ottimale)

ha mostrato il valore più alto corrispondente a  $K = 4$ . I quattro cluster emersi dalle analisi sono raffigurati in **Figura 5.5**, e si differenziano per la distribuzione giornaliera del consumo di acqua e dell'ora in cui si verifica il picco di consumo.



**Figura 5.5.** Risultati dell' algoritmo K-means. Ogni pannello include i profili dei consumi idrici residenziali nei giorni feriali dell' Aprile 2019 e dell' Aprile 2020 ( $\eta_H$ , in grigio) per le 4 classi individuate e il cluster (in nero) associato a ciascuna classe

Il primo cluster ( $K = 1$ ) presenta un profilo con un consumo limitato durante il giorno e un picco significativo al mattino. Il secondo cluster ( $K = 2$ ) presenta un profilo con un consumo moderato durante il giorno e un picco al mattino. Il terzo cluster ( $K = 3$ ) presenta un profilo con un consumo limitato durante il giorno e un picco significativo alla sera, e, infine, il quarto cluster presenta ( $K = 4$ ) un profilo con un consumo moderato durante il giorno e un picco alla sera.

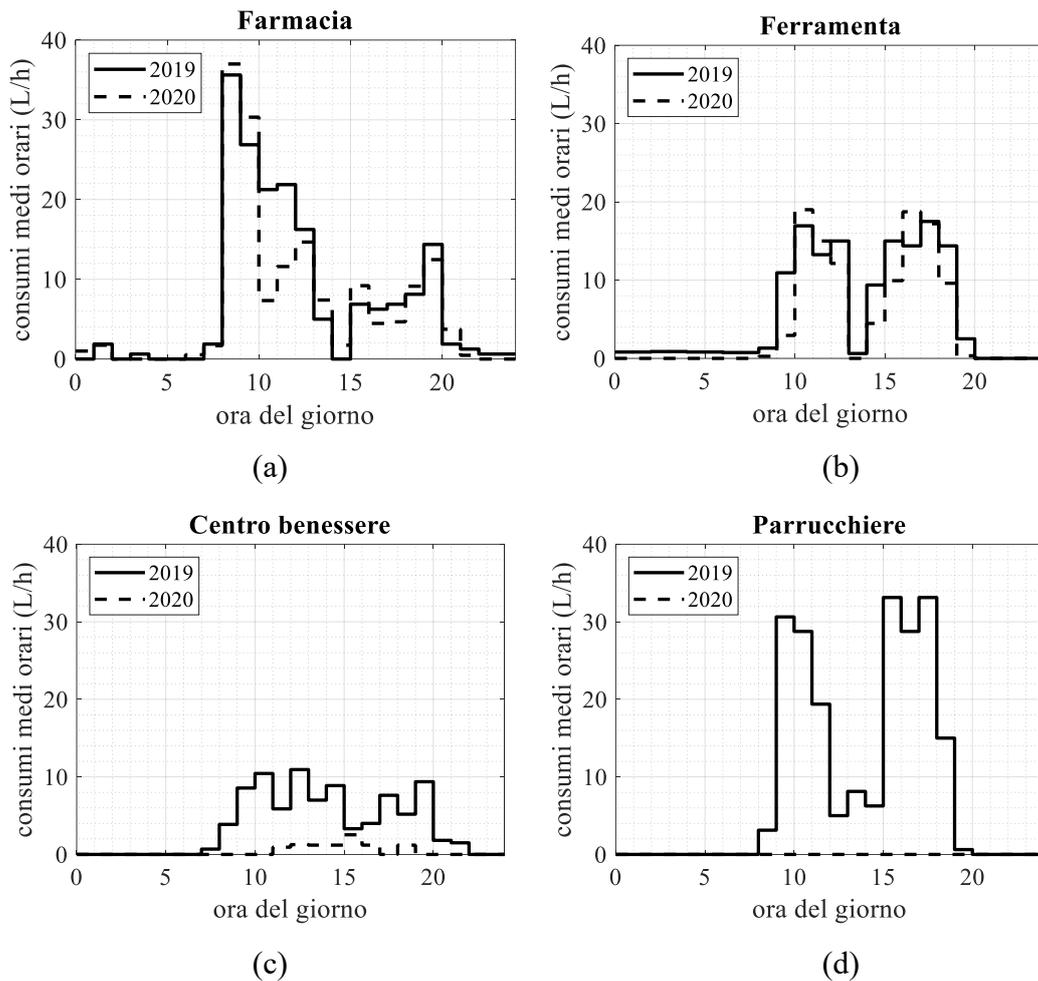
La **Tabella 5.2** riporta le percentuali di utenti assegnati a ciascuna classe durante Aprile 2019 e Aprile 2020.

**Tabella 5.2.** Percentuali delle utenze residenziali assegnate a ciascuna delle quattro classi ad Aprile 2019 (periodo pre-lockdown) e ad Aprile 2020 (periodo del lockdown)

		Aprile 2020				
		K = 1	K = 2	K = 3	K = 4	Totale
Aprile 2019	K = 1	7.7 %	9.1 %	0.0 %	7.2 %	24.0 %
	K = 2	0.5 %	22.1 %	1.4 %	5.8 %	29.8 %
	K = 3	0.0 %	0.5 %	0.6 %	2.4 %	3.5 %
	K = 4	1.4 %	14.9 %	1.4 %	25.0 %	42.7 %
	Totale	9.6 %	46.6 %	3.4 %	40.4 %	-

Si può notare come il 45% degli utenti abbia cambiato il cluster a cui apparteneva con l'avvento del lockdown. Un'alta percentuale di utenti (16.3%) è passata dalla prima classe alla seconda, terza o quarta, mentre solo una piccola parte (1,9%) è passata dalla seconda, terza o quarta classe alla prima. Pertanto, i risultati dell'applicazione dell'algoritmo K-means hanno confermato un cambiamento generale nel comportamento durante i giorni feriali delle utenze residenziali durante il lockdown, dovuto alle restrizioni e all'obbligo di lavorare da casa. Si è riscontrata infatti una maggiore tendenza a utilizzare l'acqua in modo più uniforme durante la giornata, con un'attenuazione del picco mattutino.

Per quanto riguarda gli utenti commerciali, è emerso che, durante il lockdown, i negozi di beni di prima necessità (farmacia e ferramenta) non hanno modificato il loro consumo di acqua rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente. Al contrario, gli altri utenti (ad esempio, centro benessere e parrucchiere) hanno cambiato completamente il loro profilo di consumo in quanto non hanno consumato acqua a causa della chiusura forzata delle loro attività (**Figura 5.6**)



**Figura 5.6.** Consumi medi orari nei giorni feriali nei mesi di Aprile 2019 (linea continua) e Aprile 2020 (linea tratteggiata) di (a) una farmacia; (b) una ferramenta; (c) un centro benessere; e (d) un parrucchiere

### 5.1.4 Conclusioni

Il presente studio ha analizzato gli effetti del lockdown dovuto alla diffusione della malattia COVID19 sui consumi d'acqua, con riferimento a un distretto idrico situato nella città di Rovigo, in Veneto.

I risultati evidenziano quanto segue:

- le misure di contenimento della diffusione del COVID-19 attuate nel mese di Aprile 2020 hanno avuto l'effetto di aumentare i consumi idrici dell'intero distretto

di circa il 18% rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente e questo aumento è attribuibile principalmente alle utenze residenziali;

- nei profili di consumo idrico delle utenze residenziali relative ai giorni feriali si è osservato un netto ritardo del picco mattutino e un generale aumento dei consumi idrici durante le ore diurne, comprensibile se si considera che la sospensione delle attività scolastiche e lavorative e l'incentivazione del lavoro a domicilio hanno indotto gli utenti a consumare l'acqua in modo più distribuito durante la giornata;
- con riferimento alle poche utenze commerciali appartenenti al DMA in questione, si sono osservate notevoli variazioni nei consumi idrici nel caso di attività per le quali è stata imposta una chiusura forzata.

Più in generale, è possibile evidenziare i vantaggi di un monitoraggio dettagliato dei consumi delle utenze tramite smart meter. Infatti, cambiamenti importanti nei consumi idrici comportano generalmente la necessità di ripensare i criteri operativi della rete di distribuzione e il loro monitoraggio permette di adattare rapidamente il sistema alle nuove condizioni, ad esempio, modificando il funzionamento delle pompe. Inoltre, grazie ai sistemi di monitoraggio, è stato possibile raccogliere dati sul consumo idrico nonostante la condizione di emergenza e l'obbligo della distanza sociale, mantenendo aggiornati i modelli idraulici a disposizione del gestore, i quali forniscono un ulteriore supporto alle decisioni.

La comprensione degli aspetti legati ai consumi idrici è quindi importante per raccogliere informazioni essenziali ed è stata fondamentale per garantire la resilienza del sistema di approvvigionamento idrico urbano durante la pandemia.

## **5.2 Criticità e problematiche legate all'utilizzo degli smart meter per il monitoraggio dei consumi idrici**

Gli smart meter, ovvero i contatori “intelligenti”, in grado di inviare direttamente al gestore il dato misurato del consumo idrico, sono in rapida evoluzione e sempre più utilizzati. Nell’ambito di questa tesi è stato fino ad ora evidenziato come gli smart meter possano aiutare il gestore idrico a rendere i suoi sistemi più efficienti, sostenibili e resilienti, aumentando la conoscenza delle reti e ottimizzando il contenimento delle perdite idriche.

Tuttavia, questi strumenti sono ancora in via di sviluppo, ed è giusto, quindi, evidenziare anche i lati negativi di queste nuove tecnologie e le problematiche a cui i gestori idrici possono incorrere nel loro utilizzo.

Innanzitutto gli smart meter sono più costosi dei normali contatori meccanici, senza considerare, poi, il costo dell’infrastruttura necessaria per il loro utilizzo. Ulteriormente, contengono parti hardware ed elettroniche che possono essere soggette a malfunzionamenti e deterioramento, e possono essere, quindi, necessarie sostituzioni eccezionali.

Essi sono poi dotati di batteria, la quale non è sostituibile in quanto il contatore è sigillato per essere resistente e impermeabile all’acqua. Durante il processo di produzione, i produttori testano la durata di vita del contatore per garantire che sia conforme agli standard, ovvero che generalmente duri più di 10 anni. Tuttavia, nella pratica, questo aspetto dipende molto dall’intervallo di comunicazione e da quanto viene utilizzato il contatore. Proprio per questo, gli smart meter utilizzano i canali di trasmissione concentrandosi maggiormente sull'efficienza energetica per salvaguardare la batteria rispetto all'affidabilità di trasmissione (Kirstein et al. 2021), e questo può rendere più difficile la raccolta del dato.

Inoltre, altre problematiche possono impattare sulla ricezione dei dati. È necessario, infatti, ricordare che i contatori vengono posizionati in luoghi particolari, ovvero sotto il livello del terreno, e in tombini profondi, i quali

presentano coperchi metallici e sono soggetti ad allagamento, creando quindi una grande schermatura alla propagazione del segnale. Nondimeno, anche il clima può risultare un fattore di disturbo, in quanto, generalmente, più la temperatura e l'umidità sono elevate, più la trasmissione è debole.

Inoltre, a seconda della tipologia di trasmissione utilizzata, possono insorgere problemi più specifici. I contatori comunicanti tramite tecnologia NB-IoT, ovvero dotati di SIM, dipendono dalla rete internet a cui si appoggiano e possono essere soggetti quindi a poca ricezione ed errori nell'invio dati; questo non li rende quindi adatti alle zone rurali e suburbane, di solito non sono coperte dalla rete (Andrić et al. 2022). I contatori comunicanti tramite protocollo WM-Bus, invece, necessitano di un concentratore e relativa antenna, ovvero dispositivi in grado di raccogliere i dati inviati, i quali devono essere installati in una posizione elevata, dotata di allacciamento alla rete elettrica, ed entro un range limitato dai contatori. Inoltre, nel caso della tecnologia WM-Bus, la comunicazione può avvenire tramite protocollo proprietario o aperto. Il protocollo proprietario, ovvero brevettato dai produttori del contatore, è il più potente, ma per utilizzarlo è necessario appoggiarsi completamente all'infrastruttura e ai software dell'azienda. Il protocollo aperto permette di gestire e raccogliere i dati con strutture e software a preferenza del gestore idrico, ma il segnale risulta essere meno penetrante.

Tutto questo può causare la presenza di buchi di dati nelle serie raccolte, rendendo fondamentale il campionamento e l'interpolazione per il riempimento dei dati mancanti affinché possano essere effettivamente utilizzati nei modelli idraulici. Il gestore idrico, tuttavia, normalmente non ha gli strumenti adatti per effettuare queste analisi, ma si ritrova con immense quantità di dati che dovranno innanzitutto essere immagazzinate in server specifici, e poi dovranno essere organizzate, analizzate e gestite tramite software.

La presenza di tutti questi dati richiede anche una particolare attenzione alle politiche di sicurezza adottate, sia in termini di privacy per l'utente, che in termini di cybersecurity. Da una parte, il gestore deve essere sicuro che i dati siano accurati, e che non si verifichino attacchi fisici o informatici al contatore.

Dall'altra, gli utenti hanno bisogno di sapere che il proprio dato di consumo sarà privato e confidenziale, creando la necessità di una corretta gestione dei dati attraverso l'anonimato degli stessi.

Da questo punto di vista è anche necessario interfacciarsi correttamente all'utente e informarlo sulle caratteristiche del nuovo contatore, affinché accetti la nuova tecnologia e non si opponga per paura che i suoi dati non siano protetti.

In ogni caso, le tecnologie informatiche e di comunicazione sono ogni giorno sempre di più all'avanguardia oltre che in continua crescita. In poco tempo, quindi, tutte queste problematiche verranno superate con nuovi strumenti sempre più funzionali.



## Conclusioni

La presente tesi è focalizzata sull'analisi di come la digitalizzazione delle reti idriche e l'uso di sistemi di monitoraggio dei consumi idrici tramite smart meter possano rendere più efficienti le fasi di contenimento delle perdite idriche. A questo scopo, diversi metodi e approcci presenti nella letteratura e normalmente applicati dai gestori per quantificare, caratterizzare e localizzare le perdite idriche sono stati analizzati e applicati a casi studio sia reali che sintetici, al fine di valutare quanto una dettagliata conoscenza delle reti e la disponibilità di una maggior quantità di dati di campo aumentino la loro efficacia e accuratezza.

In primo luogo, il metodo del MNF per la quantificazione del livello di perdita, e l'equazione di potenza e il modello FAVAD per la caratterizzazione delle perdite sono stati analizzati nel dettaglio. I metodi sono stati applicati ad un caso studio reale, ovvero il distretto idrico di Gorino Ferrarese (FE) monitorato a livello di singola utenza tramite smart meter, ovvero di cui si avevano a disposizione gli andamenti nel tempo dei consumi idrici di ogni utenza. Grazie a questo, si è ricavata una stima molto precisa del livello di perdita idrica presente nella rete, ed è stato possibile effettuare sia un'analisi di affidabilità del metodo del MNF sia

un'analisi su vari approcci per il calcolo dei coefficienti dei due modelli di caratterizzazione.

Per quel che riguarda il metodo del MNF, esso è stato inizialmente applicato utilizzando valori di consumo notturno come indicato da letteratura, e il risultato ottenuto del livello di perdita è stato confrontato con quello reale presente nel distretto. Lo studio proposto ha evidenziato che il metodo del MNF tende a sovrastimare il livello di perdita, poiché i valori suggeriti da letteratura per il consumo notturno delle utenze non tengono in considerazione eventuali consumi anomali, come perdite interne o irrigazione notturna. Per quel che riguarda la caratterizzazione, sono stati considerati cinque diversi approcci per la stima dei parametri, differenti per il numero di dati utilizzati. È stato verificato che un dettagliato monitoraggio della rete permette una parametrizzazione più accurata dell'equazione di potenza e del modello FAVAD, consentendo di valutare più realisticamente la variazione del livello di perdita a fronte di abbassamenti della pressione in rete.

In secondo luogo, i metodi model-based, di recente interesse per la localizzazione delle perdite idriche, sono stati presi in considerazione. In particolare, i due metodi Sensitivity Matrix e Linear Approximation sono stati analizzati ed applicati ad un caso studio sintetico, ovvero un sistema di distribuzione acquedottistico di cui si conosce la storia delle perdite, e si dispone sia di dati di pressione misurati nella rete sia di un modello idraulico perfetto, ovvero contenente una precisa topologia e gli esatti pattern di consumo delle utenze.

Grazie a questo è stato possibile analizzare le performance e le eventuali criticità di questa tipologia di metodi, ovvero come essi siano influenzati a seconda della gestione dei dati, del livello di accuratezza del modello idraulico e del numero di sensori di pressione. Infatti, inizialmente i metodi sono stati applicati considerando quattro diversi approcci per l'utilizzo dei dati a disposizione, e i risultati ottenuti sono stati confrontati in modo da identificare l'approccio ottimale. Dopodiché, l'accuratezza dei dati misurati e del modello idraulico sono state alterate e ridotte, inserendo artificialmente rumori, errori e incertezze in

percentuali diverse, e il numero di sensori di pressione considerati è stato gradualmente ridotto. È stato possibile constatare come soltanto sia la dettagliata conoscenza delle pressioni all'interno della rete (tramite monitoraggio con sensori di pressione) sia la disponibilità di un accurato e realistico modello idraulico (realizzato con il monitoraggio dei consumi delle singole tramite smart meter), permettano un'accurata localizzazione delle perdite.

Infine, si è evidenziata l'importanza degli smart meter anche per una corretta caratterizzazione dei consumi idrici e una corrispondente accurata modellazione idraulica del sistema durante eventi e situazioni particolari, come lo è stato il periodo emergenziale causato dalla pandemia di COVID19. Infatti, il lockdown imposto per limitare la diffusione della malattia ha fortemente modificato le abitudini degli utenti a causa delle chiusure forzate. Nel dettaglio si è registrato un aumento generale dei consumi idrici residenziali, e un ritardo del picco mattutino dovuto alla sospensione delle attività scolastiche e lavorative, oltre che una diminuzione dei consumi delle attività commerciali e industriali a causa delle chiusure imposte..

Più in generale quindi, si è constatato quanto sia importante disporre di un monitoraggio tramite da smart meter sui sistemi di distribuzione idrica. Infatti, grazie all'approfondita e dettagliata conoscenza sulle caratteristiche idrauliche della rete, ovvero sui consumi delle utenze e sui valori di pressione, è possibile arrivare a una gestione consapevole e sostenibile dell'infrastruttura acquedottistica e controllare attivamente le perdite idriche.

Poiché, nella realtà, pochi sono i distretti idrici all'avanguardia dotati di sistemi di monitoraggio dettagliati, si auspica che questa tesi possa essere d'aiuto ai gestori idrici e li possa supportare nell'installazione di sistemi di monitoraggio, con la consapevolezza che ulteriori studi con altre metodologie e casi studio sono necessari per approfondire ancora di più l'efficacia della digitalizzazione delle reti.



## Ringraziamenti

Ringrazio profondamente il prof. Alvisi che mi ha seguito in questo percorso, mi ha trasmesso la sua esperienza, e senza il quale questa tesi non sarebbe esistita. Ringrazio particolarmente anche il prof. Franchini per i suoi consigli e il supporto fornito in questi tre anni. Ringrazio inoltre il CADF, che mi ha permesso di effettuare questo percorso e ha fornito i dati necessari alla mia ricerca. Ringrazio poi i miei colleghi di lavoro, con i quali ho condiviso sia momenti difficili che momenti di svago e di gioia.

Ringrazio i miei genitori, che mi hanno sempre sostenuto con tanta pazienza specialmente nei periodi più difficili, e mi sono sempre stati vicino. Ringrazio mia sorella Elisa e il suo fidanzato Andrea per tutte le volte che ci hanno ospitato, per tutte le chiacchierate e risate, e per il loro continuo supporto. Ringrazio inoltre quella che è diventata la mia seconda famiglia in questo percorso, composta dai miei suoceri Paola e Tiziano, e da Aida e Floriano. Grazie per il vostro sempre presente aiuto e per la vostra affettuosa ospitalità.

Ringrazio le mie ex coinquiline Deborah e Annalisa, con le quali ho instaurato un meraviglioso rapporto di amicizia e alle quali voglio un mondo di bene. Con loro tutto è iniziato, e questa tesi è anche merito del loro supporto e dei loro insegnamenti.

I miei più grandi, sentiti e grati ringraziamenti vanno a colui che è diventato mio marito. Non esistono ancora le parole giuste per descrivere quanto tu sia stato d'aiuto e quanto tu mi abbia sempre supportato nei periodi più difficili. Questa tesi è dedicata a te, Francesco Dall'Occo.



## Bibliografia

- Adedeji, K. B., Y. Hamam, B. T. Abe, and A. M. Abu-Mahfouz. 2017. "Towards Achieving a Reliable Leakage Detection and Localization Algorithm for Application in Water Piping Networks: An Overview." *IEEE Access*, 5: 20272–20285. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2752802>.
- Adedeji, K. B., A. A. Ponnle, A. M. Abu-Mahfouz, and A. M. Kurien. 2022. "Towards Digitalization of Water Supply Systems for Sustainable Smart City Development—Water 4.0." *Applied Sciences*, 12 (18): 9174. <https://doi.org/10.3390/app12189174>.
- Aksela, K., M. Aksela, and R. Vahala. 2009. "Leakage detection in a real distribution network using a SOM." *Urban Water J*, 6 (4): 279–289. <https://doi.org/10.1080/15730620802673079>.
- Alvisi, S., N. Ansaloni, and M. Franchini. 2014. "Generation of synthetic water demand time series at different temporal and spatial aggregation levels." *Urban Water J*, 11 (4): 297–310. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.801499>.
- AL-Washali, T., S. Sharma, and M. Kennedy. 2016. "Methods of Assessment of Water Losses in Water Supply Systems: a Review." *Water Resources Management*, 30 (14): 4985–5001. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1503-7>.
- Alzamora, F., P. Conejos, M. Castro-Gama, and I. Vertommen. 2021. "Digital Twins - A new paradigm for water supply and distribution networks." *HydroLink*, 2: 48–54.
- Andrić, I., A. Vrsalović, T. Perković, M. Aglič Čuvić, and P. Šolić. 2022. "IoT approach towards smart water usage." *J Clean Prod*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132792>.
- Balacco, G., V. Totaro, V. Iacobellis, A. Manni, M. Spagnoletta, and A. F. Piccinni. 2020. "Influence of COVID-19 spread on water drinking demand:

- The case of Puglia Region (Southern Italy).” *Sustainability*, 12 (15).  
<https://doi.org/10.3390/SU12155919>.
- Berglund, A., V. S. Areti, D. Brill, and G. (Kumar) Mahinthakumar. 2017. “Successive Linear Approximation Methods for Leak Detection in Water Distribution Systems.” *J Water Resour Plan Manag*, 143 (8): 04017042.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000784](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000784).
- Berglund, E., N. Thelemaque, L. Spearing, K. Faust, J. Kamisky, L. Sela, E. Goharian, A. Abokifa, J. Lee, J. Keck, M. Giacomoni, J. van Zyl, B. Harkness, Y. Yang, M. Cunha, A. Ostfeld, and L. Kadinski. 2021. “Water and Wastewater Systems and Utilities: Challenges and Opportunities during the COVID-19 Pandemic.” *J Water Resour Plan Manag*, 147 (5).  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001373](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001373).
- Blokker, E. J. M., H. Beverloo, A. J. Vogelaar, J. H. G. Vreeburg, and J. C. van Dijk. 2011. “A bottom-up approach of stochastic demand allocation in a hydraulic network model: A sensitivity study of model parameters.” *Journal of Hydroinformatics*, 13 (4): 714–728.  
<https://doi.org/10.2166/hydro.2011.067>.
- Blokker, E. J. M., J. H. G. Vreeburg, and J. C. van Dijk. 2010. “Simulating Residential Water Demand with a Stochastic End-Use Model.” *J Water Resour Plan Manag*, 136 (1): 19–26. <https://doi.org/10.1061/ASCEWR.1943-5452.0000002>.
- Bohorquez, J., B. Alexander, A. R. Simpson, and M. F. Lambert. 2020. “Leak Detection and Topology Identification in Pipelines Using Fluid Transients and Artificial Neural Networks.” *J Water Resour Plan Manag*, 146 (6).  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001187](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001187).
- Brunone, B., and M. Ferrante. 2001. “Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients.” *Journal of Hydraulic Research*, 39 (5): 539–547.  
<https://doi.org/10.1080/00221686.2001.9628278>.
- Buchberger, S. G., and G. Nadimpalli. 2004. “Leak Estimation in Water Distribution Systems by Statistical Analysis of Flow Readings.” *J Water*

- Resour Plan Manag*, 130 (4): 321–329. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94962004130:4321>.
- Butler, D. 2009. *Leakage Detection and Management*. Cwmbran, UK: Palmer Environmental.
- Canto Ríos, J., R. U. Santos-Tellez, P. Hansen Rodríguez, E. Antúnez Leyva, and V. Nava Martínez. 2014. “Methodology for the identification of apparent losses in water distribution networks.” *Procedia Eng*, 70: 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.027>.
- Carminati, M., V. Stefanelli, G. Ferrari, M. Sampietro, A. Turolla, M. Rossi, S. Malavasi, M. Antonelli, and V. Pifferi. 2017. “Smart pipe: A miniaturized sensor platform for real-time monitoring of drinking water quality.” *Proceedings of the 2017 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*. Milan, Italy.
- Cassa, A. M., and J. E. van Zyl. 2008. “A numerical investigation into the behaviour of cracks in uPVC pipes under pressure.” *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference (WDSA)*. Kruger National Park, South Africa.
- Cassa, A. M., and J. E. van Zyl. 2013. “Predicting the head-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations.” *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 62 (4): 214–223. <https://doi.org/10.2166/aqua.2013.094>.
- Chan, T. K., C. S. Chin, and X. Zhong. 2019. “Review of Current Technologies and Proposed Intelligent Methodologies for Water Distributed Network Leakage Detection.” *IEEE Access*, 6: 78846–78867. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885444>.
- Covas, D., and H. Ramos. 2001. “Hydraulic Transients used for Leakage Detection in Water Distribution Systems.” *Proceedings of the 4th Conference on Water Pipeline Systems*. York, UK.
- Covas, D., and H. Ramos. 2010. “Case Studies of Leak Detection and Location in Water Pipe Systems by Inverse Transient Analysis.” *J Water Resour Plan*

- Manag*, 136 (2): 248–257. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94962010136:2248>.
- Covas, D., H. Ramos, and A. Betâmio De Almeida. 2005. “Standing Wave Difference Method for Leak Detection in Pipeline Systems.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (12): 1106–1116. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94292005131:121106>.
- Deyi, M., J. van Zyl, and M. Shepherd. 2014. “Applying the FAVAD concept and leakage number to real networks: A case study in Kwadabeka, South Africa.” *Procedia Eng*, 89: 1537–1544. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.450>.
- El-Zahab, S., and T. Zayed. 2019. “Leak detection in water distribution networks: an introductory overview.” *Smart Water*, 4 (1). <https://doi.org/10.1186/s40713-019-0017-x>.
- Fantozzi, M. 2004. “Metodi per la valutazione e la gestione delle perdite idriche - l’approccio della ‘water loss’ task force dell’International Water Association (IWA).” *Proceedings of the IWA - Water Loss Europe 2012 conference*. Ferrara, Italy.
- Fantozzi, M., and A. Lambert. 2012. “Residential Night Consumption - Assessment, Choice of Scaling Units and Calculation of Variability.” *Proceedings of the IWA Water Loss Conference*. Manila, Philippines.
- Farley, B., S. R. Mounce, and J. B. Boxall. 2013. “Development and Field Validation of a Burst Localization Methodology.” *J Water Resour Plan Manag*, 139 (6): 604–613. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000290](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000290).
- Farley, M., and S. Trow. 2003. *Losses in Water Distribution Networks*. London, UK: IWA Publishing.
- Faust, K. M., L. E. Katz, M. J. Kirisits, K. A. Kinney, L. Sela, M. Kopytkovskiy, C. Russell, and J. Kaminsky. 2020. “Consider How Social Distancing Policies Can Affect Drinking Water Infrastructure Performance.” *Journal of American Water Works Association*, 113 (2): 74–77.
- Ferrandez-Gamot, L., P. Busson, J. Blesa, S. Tornil-Sin, V. Puig, E. Duviella, and A. Soldevila. 2015. “Leak localization in water distribution networks using

- pressure residuals and classifiers.” *IFAC-PapersOnLine*, 48 (21): 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.531>.
- Ferrante, M. 2012a. “Experimental Investigation of the Effects of Pipe Material on the Leak Head-Discharge Relationship.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 138 (8): 736–743. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000578](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000578).
- Ferrante, M. 2012b. “Experimental Investigation of the Effects of Pipe Material on the Leak Head-Discharge Relationship.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 138 (8): 736–743. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000578](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000578).
- Ferrante, M., B. Brunone, M. Asce, and S. Meniconi. 2007. “Wavelets for the Analysis of Transient Pressure Signals for Leak Detection.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (11): 1274–1282. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94292007133:111274>.
- Ferrante, M., C. Massari, B. Brunone, and S. Meniconi. 2011. “Experimental Evidence of Hysteresis in the Head-Discharge Relationship for a Leak in a Polyethylene Pipe.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 137 (7): 775–780. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000360](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000360).
- Ferrante, M., C. Massari, E. Todini, B. Brunone, and S. Meniconi. 2013. “Experimental investigation of leak hydraulics.” *Journal of Hydroinformatics*, 15 (3): 666–675. <https://doi.org/10.2166/hydro.2012.034>.
- Filion, Y., B. Adams, M. Asce, and B. Karney. 2007. “Cross Correlation of Demands in Water Distribution Network Design.” *J Water Resour Plan Manag*, 133 (2): 137–144. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94962007133:2137>.
- Fiorillo, D., E. Creaco, F. de Paola, and M. Giugni. 2020. “Comparison of bottom-up and top-down procedures for water demand reconstruction.” *Water*, 12 (3). <https://doi.org/10.3390/w12030922>.
- Gao, Y., M. J. Brennan, P. F. Joseph, J. M. Muggleton, and O. Hunaidi. 2004. “A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes.” *J Sound Vib*, 277 (1–2): 133–148. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.08.045>.
- Gao, Y., M. J. Brennan, P. F. Joseph, J. M. Muggleton, and O. Hunaidi. 2005. “On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water

- pipes.” *J Sound Vib*, 283 (3–5): 927–941. Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.05.004>.
- Gao, Y., M. J. Brennan, Y. Liu, F. C. L. Almeida, and P. F. Joseph. 2017. “Improving the shape of the cross-correlation function for leak detection in a plastic water distribution pipe using acoustic signals.” *Applied Acoustics*, 127: 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.05.033>.
- Ghedini, M., R. Ugarelli, T. Liserra, V. di Federico, and M. Maglionico. 2010. “Esterionalità generate sul traffico urbano dagli interventi di riabilitazione nelle reti idriche.” *Rivista bimestrale dell’associazione idrotecnica italiana*, 2: 25–34.
- Gong, J., A. R. Simpson, M. F. Lambert, A. C. Zecchin, Y. Kim, and A. S. Tijsseling. 2013. “Detection of Distributed Deterioration in Single Pipes Using Transient Reflections.” *J Pipeline Syst Eng Pract*, 4 (1): 32–40. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000111](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000111).
- Goulet, J. A., S. Coutu, and I. F. C. Smith. 2013. “Model falsification diagnosis and sensor placement for leak detection in pressurized pipe networks.” *Advanced Engineering Informatics*, 27 (2): 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2013.01.001>.
- Governo Italiano. 2020. “Coronavirus, la normativa vigente.” <https://www.governo.it/it/coronavirus-normativa>. Ultimo accesso il 5 ottobre 2022.
- Greyvenstein, B., and J. E. van Zyl. 2007. “An experimental investigation into the pressure - Leakage relationship of some failed water pipes.” *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 56 (2): 117–124. <https://doi.org/10.2166/aqua.2007.065>.
- Guo, G., X. Yu, S. Liu, Z. Ma, Y. Wu, X. Xu, X. Wang, K. Smith, and X. Wu. 2021. “Leakage Detection in Water Distribution Systems Based on Time–Frequency Convolutional Neural Network.” *J Water Resour Plan Manag*, 147 (2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001317](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001317).
- Hu, Z., D. Tan, B. Chen, W. Chen, and D. Shen. 2021. “Review of model-based and data-driven approaches for leak detection and location in water

- distribution systems.” *Water Supply*, 21 (7): 3282–3306.  
<https://doi.org/10.2166/ws.2021.101>.
- Hunaidi, O., and W. T. Chu. 1999. “Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes.” *Applied Acoustics*, 58: 235–254.  
[https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(99\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(99)00013-4).
- Hunaidi, O., A. Wang, M. Bracken, T. Gambino, and C. Fricke. 2004. “Acoustic Methods for Locating Leaks in Municipal Water Pipe Networks.” *Proceedings of the International Conference on Water Demand Management*. Dead Sea, Jordan.
- Istat. 2019. *Utilizzo e qualità della risorsa idrica in Italia*. Roma: Istituto nazionale di statistica.
- Javadiha, M., J. Blesa, A. Soldevila, and V. Puig. 2019. “Leak Localization in Water Distribution Networks using Deep Learning.” *Proceedings of the 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT'19)*. Paris, France.
- Jonsson, L., and M. Larson. 1992. “Leak detection through hydraulic transient analysis.” *Pipeline systems. Fluid mechanics and its applications*, B. Coulbeck and E. Evans, eds., 273–286. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Kalbusch, A., E. Henning, M. P. Brikalski, F. V. de Luca, and A. C. Konrath. 2020. “Impact of coronavirus (COVID-19) spread-prevention actions on urban water consumption.” *Resour Conserv Recycl*, 163.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105098>.
- Kapelan, Z. S., D. A. Savic, and G. A. Walters. 2003. “A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks.” *Journal of Hydraulic Research*, 41 (5): 481–492.  
<https://doi.org/10.1080/00221680309499993>.
- Kara, S., I. Ethem Karadirek, A. Muhammetoglu, and H. Muhammetoglu. 2016. “Hydraulic Modeling of a Water Distribution Network in a Tourism Area with Highly Varying Characteristics.” *Procedia Eng*, 521–529.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.096>.

- Kirstein, J. K., K. Høgh, M. Rygaard, and M. Borup. 2021. “A case study on the effect of smart meter sampling intervals and gap-filling approaches on water distribution network simulations.” *Journal of Hydroinformatics*, 23 (1): 66–75. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.083>.
- Lambert, A., and W. Hirner. 2000. “Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures.” *International Water Association, the blue pages*, 1–13.
- Lambert, A. O. 2002. “International Report: Water losses management and techniques.” *Water Sci Technol Water Supply*, 2 (4): 1–20.
- Lee, S. J., G. Lee, J. C. Suh, and J. M. Lee. 2016. “Online Burst Detection and Location of Water Distribution Systems and Its Practical Applications.” *J Water Resour Plan Manag*, 142 (1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000545](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000545).
- Levin, S. J. 2019. “An evaluation of the pressure-leakage response of selected water distribution networks in South Africa.” Tesi magistrale.
- Levinas, D., G. Perelman, and A. Ostfeld. 2021. “Water leak localization using high-resolution pressure sensors.” *Water*, 13 (5): 1–12. <https://doi.org/10.3390/w13050591>.
- Li, R., H. Huang, K. Xin, and T. Tao. 2015. “A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems.” *Water Sci Technol Water Supply*. <https://doi.org/10.2166/ws.2014.131>.
- Liemberger, R. 2002. “Do You Know How Misleading the Use of Wrong Performance Indicators can be?” *Proceedings of the International Water Association Conference “Leakage Management: A Practical Approach.”* Lemesos, Cyprus.
- Liggett, J. A., and L.-C. Chen. 1994. “Inverse Transient Analysis in Pipe Networks.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 120 (8): 934–955. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1994\)120:8\(934\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:8(934)).
- Lloyd, S. P. 1982. “Least Squares Quantization in PCM.” *IEEE Trans Inf Theory*, 28 (2): 129–137. <https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>.

- Loureiro, D., C. Amado, A. Martins, D. Vitorino, A. Mamade, and S. T. Coelho. 2016. "Water distribution systems flow monitoring and anomalous event detection: A practical approach." *Urban Water J*, 13 (3): 242–252. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.988733>.
- Luciani, C., F. Casellato, S. Alvisi, and M. Franchini. 2019. "Green Smart Technology for Water (GST4Water): Water loss identification at user level by using smart metering systems." *Water*, 11 (3). <https://doi.org/10.3390/w11030405>.
- Maggs, I. 2007. "Demand management: a simplified operational method for targeting resources to water loss." *Proceedings of the Inaugural WIOA NSW Water Industry Engineers & Operators Conference*. Dubbo, Australia.
- Manzi, D., B. Brentan, G. Meirelles, J. Izquierdo, and E. Luvizotto. 2019. "Pattern recognition and clustering of transient pressure signals for burst location." *Water*, 11 (11). <https://doi.org/10.3390/w11112279>.
- May, J. 1994. "Leakage, Pressure and Control." *Proceedings of the the BICS International Conference on Leakage Control Investigation in underground Assets*. London, UK.
- Mazzolani, G., L. Berardi, D. Laucelli, R. Martino, A. Simone, and O. Giustolisi. 2016. "A Methodology to Estimate Leakages in Water Distribution Networks Based on Inlet Flow Data Analysis." *Procedia Eng*, 411–418. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.082>.
- Mazzolani, G., L. Berardi, D. Laucelli, A. Simone, R. Martino, and O. Giustolisi. 2017. "Estimating Leakages in Water Distribution Networks Based Only on Inlet Flow Data." *J Water Resour Plan Manag*, 143 (6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000758](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000758).
- Meniconi, S., B. Brunone, M. Ferrante, C. Capponi, C. A. Carrettini, C. Chiesa, D. Segalini, and E. A. Lanfranchi. 2015. "Anomaly pre-localization in distribution-transmission mains by pump trip: Preliminary field tests in the Milan pipe system." *Journal of Hydroinformatics*, 17 (3): 377–389. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.038>.

- Meniconi, S., B. Brunone, M. Ferrante, and C. Massari. 2011. "Transient tests for locating and sizing illegal branches in pipe systems." *Journal of Hydroinformatics*, 13 (3): 334–345. <https://doi.org/10.2166/hydro.2011.012>.
- Meniconi, S., B. Brunone, and M. Frisinghelli. 2018. "On the role of minor branches, energy dissipation, and small defects in the transient response of transmission mains." *Water*, 10 (2). <https://doi.org/10.3390/w10020187>.
- Meniconi, S., C. Capponi, M. Frisinghelli, and B. Brunone. 2021a. "Leak Detection in a Real Transmission Main Through Transient Tests: Deeds and Misdeeds." *Water Resour Res*, 57 (3). <https://doi.org/10.1029/2020WR027838>.
- Meniconi, S., M. Cifrodelli, C. Capponi, H.-F. Duan, and B. Brunone. 2021b. "Transient Response Analysis of Branched Pipe Systems toward a Reliable Skeletonization." *J Water Resour Plan Manag*, 147 (2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001319](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001319).
- Moser, G., S. G. Paal, and I. F. C. Smith. 2018. "Leak Detection of Water Supply Networks Using Error-Domain Model Falsification." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 32 (2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000729](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000729).
- Mounce, S. R., A. J. Day, A. S. Wood, A. Khan, P. D. Widdop, and J. Machell. 2002. "A neural network approach to burst detection." *Water Science and Technology*, 45: 237–246. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0595>.
- Mpesha, W., S. L. Gassman, and M. H. Chaudhry. 2001. "Leak detection in pipes by frequency response method." *Journal of Hydraulic Engineering*, 127 (2): 134–147. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:2\(134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:2(134)).
- Nickel Institute. 2020. "Lose the leaks." <https://nickelinstitute.org/en/blog/2020/january/lose-the-leaks/>. Ultimo accesso il 25 Ottobre 2022.
- Pérez, R., V. Puig, J. Pascual, A. Peralta, E. Landeros, and L. Jordanas. 2009. "Pressure sensor distribution for leak detection in Barcelona water distribution network." *Water Sci Technol Water Supply*, 9 (6): 715–721. <https://doi.org/10.2166/ws.2009.372>.

- Perez, R., G. Sanz, V. Puig, J. Quevedo, M. A. Cughero Escofet, F. Nejjari, J. Meseguer, G. Cembrano, J. M. Mirats Tur, and R. Sarrate. 2014. “Leak localization in water networks: A model-based methodology using pressure sensors applied to a real network in barcelona [applications of control].” *IEEE Control Syst*, 34 (4): 24–36. <https://doi.org/10.1109/MCS.2014.2320336>.
- Ponce, M. V. C., L. E. G. Castañón, and V. P. Cayuela. 2014. “Model-based leak detection and location in water distribution networks considering an extended-horizon analysis of pressure sensitivities.” *Journal of Hydroinformatics*, 16 (3): 649–670. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.019>.
- Portolano, D. 2018. “Il controllo delle perdite nei sistemi acquedottistici: criteri innovativi di gestione.” Tesi di Dottorato di Ricerca.
- Puust, R., Z. Kapelan, D. A. Savic, and T. Koppel. 2010. “A review of methods for leakage management in pipe networks.” *Urban Water J*, 7 (1): 25–45. <https://doi.org/10.1080/15730621003610878>.
- Ramos, H. M., M. C. Morani, A. Carravetta, O. Fecarrotta, K. Adeyeye, P. A. López-Jiménez, and M. Pérez-Sánchez. 2022. “New Challenges towards Smart Systems’ Efficiency by Digital Twin in Water Distribution Networks.” *Water*, 14 (8). <https://doi.org/10.3390/w14081304>.
- Rousseeuw, P. J. 1987. “Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis.” *J Comput Appl Math*, 20: 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7).
- Salguero, F. J., R. Cobacho, and M. A. Pardo. 2019. “Unreported leaks location using pressure and flow sensitivity in water distribution networks.” *Water Sci Technol Water Supply*, 19 (1): 11–18. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.048>.
- Schwaller, J., J. E. van Zyl, and A. M. Kabaasha. 2015. “Characterising the pressure-leakage response of pipe networks using the FAVAD equation.” *Water Sci Technol Water Supply*, 15 (6): 1373–1382. <https://doi.org/10.2166/ws.2015.101>.
- Shafiee, M. E., A. Rasekh, L. Sela, and A. Preis. 2020. “Streaming Smart Meter Data Integration to Enable Dynamic Demand Assignment for Real-Time

- Hydraulic Simulation.” *J Water Resour Plan Manag*, 146 (6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001221](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001221).
- Song, R., X. Liu, B. Zhu, and S. Guo. 2022. “Modeling of Water Distribution System Based on Ten-Minute Accuracy Remote Smart Demand Meters.” *Water*, 14 (12). <https://doi.org/10.3390/w14121934>.
- Steffelbauer, D., M. Neumayer, M. Günther, and D. Fuchs-Hanusch. 2014. “Sensor Placement and Leakage Localization considering Demand Uncertainties.” *Procedia Eng*, 89: 1160–1167. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.242>.
- Thornton, J., R. Sturm, and G. Kunkel. 2008. *Water Loss Control*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- Vrachimis, S., D. Eliades, R. Taormina, A. Ostfeld, Z. Kapelan, S. Liu, M. Kyriakou, P. Pavlou, M. Qiu, and M. Polycarpou. 2020. “Dataset of BattLeDIM: Battle of the Leakage Detection and Isolation Methods.” <https://zenodo.org/record/4017659#.YzrN5UxBy3A>.
- Walski, T. M., D. v. Chase, D. Savic, Walter. Grayman, Stephanus. Beckwith, and E. Koelle. 2007. *Advanced water distribution modeling and management*. Exton, Pennsylvania, USA: Bentley Institute Press.
- Wu, Y., and S. Liu. 2017. “A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems.” *Urban Water J*, 14 (9): 972–983. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1279191>
- Wu, Z. Y., P. Sage, and D. Turtle. 2010. “Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System.” *J Water Resour Plan Manag*, 136: 116–128. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94962010136:1116>.
- Yang, J., Y. Wen, P. Li, and X. Wang. 2013. “Study on an improved acoustic leak detection method for water distribution systems.” *Urban Water J*, 10 (2): 71–84. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.699071>.
- Ye, G., and R. A. Fenner. 2011. “Kalman Filtering of Hydraulic Measurements for Burst Detection in Water Distribution Systems.” *J Pipeline Syst Eng Pract*, 2 (1): 14–22. <https://doi.org/10.1061/ASCEPS.1949-1204.0000070>.

- Zhang, Q., Z. Y. Wu, M. Zhao, J. Qi, Y. Huang, and H. Zhao. 2016. "Leakage Zone Identification in Large-Scale Water Distribution Systems Using Multiclass Support Vector Machines." *J Water Resour Plan Manag*, 142 (11). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000661](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000661).
- Zhou, X., Z. Tang, W. Xu, F. Meng, X. Chu, K. Xin, and G. Fu. 2019. "Deep learning identifies accurate burst locations in water distribution networks." *Water Res*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115058>.
- van Zyl, J. E., and A. M. Cassa. 2014. "Modeling Elastically Deforming Leaks in Water Distribution Pipes." *Journal of Hydraulic Engineering*, 140 (2): 182–189. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000813](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000813).
- van Zyl, J. E., and C. R. I. Clayton. 2007. "The effect of pressure on leakage in water distribution systems." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 160 (2): 109–114. <https://doi.org/10.1680/wama.2007.160.2.109>.
- van Zyl, J. E., A. O. Lambert, and R. Collins. 2017. "Realistic Modeling of Leakage and Intrusion Flows through Leak Openings in Pipes." *Journal of Hydraulic Engineering*, 143 (9): 04017030. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001346](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001346).
- van Zyl, J. E., and R. Malde. 2017. "Evaluating the pressure-leakage behaviour of leaks in water pipes." *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 66 (5): 287–299. <https://doi.org/10.2166/aqua.2017.136>.
- van Zyl, J., and A. Cassa. 2011. "Linking the power and FAVAD equations for modelling the effect of pressure on leakage." *Proceedings of the Eleventh International Conference on Computing and Control for the Water Industry*. Exeter, UK.