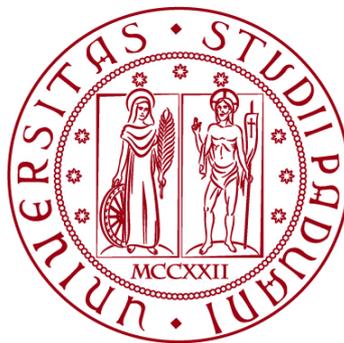


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE  
*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**TESI DI LAUREA**

# **Metodi di rilevamento delle perdite idriche lungo la rete di distribuzione del sistema acquedottistico italiano**

**Relatore: Ing. Claudia Zoccarato**

**Laureando: Jacopo Viola**

**ANNO ACCADEMICO 2023-2024**



## Sommario

1. Introduzione.....	6
2. Generalità sulle risorse idriche e il loro utilizzo.....	9
2.1 La risorsa idrica .....	9
2.2 Sistema acquedottistico .....	12
2.3 Evoluzione storica dell'acquedotto .....	14
2.4 Descrizione della rete acquedottistica .....	17
2.4.1 Opere di captazione .....	17
2.4.2 Sistema di potabilizzazione .....	18
2.4.3 Sistema di pompaggio .....	19
2.4.4 Rete di adduzione .....	20
2.4.5 Serbatoio di accumulo di testata e di estremità .....	22
2.4.6 Rete di distribuzione.....	23
2.4.7 Problematiche lungo la rete di distribuzione .....	24
3. Perdite idriche nella rete di distribuzione.....	24
3.1 Tipologie di perdite idriche .....	25
3.2 La situazione in Italia sulle perdite idriche.....	26
3.3 La situazione nell'Unione Europea sulle perdite idriche.....	30
3.4 Normativa di riferimento sulle perdite idriche .....	30
4. Metodi di ricerca delle perdite idriche.....	33
4.1 Strumenti acustici .....	34
4.1.1 Geofono .....	34
4.1.2 Aste geofoniche .....	36
4.1.3 Correlatore acustico.....	37
4.2 Strumenti di misurazione.....	39
4.2.1 Misuratore di portata .....	39
4.2.2 Misurazione delle pressioni.....	41
4.2.3 Contatori d'acqua intelligenti .....	42

4.3 Gas tracciante .....	44
4.4 Metodo del consumo zero.....	45
4.5 Metodi computerizzati.....	45
4.5.1 Distrettualizzazione .....	45
4.5.2 Modellazione .....	49
4.5.3 Strumenti di supporto alle decisioni .....	50
5. Confronto tra i vari metodi di rilevamento delle perdite.....	52
6. Ulteriori tipologie di rilevamento impiegate in altri Stati .....	53
6.1 SmartBall.....	53
6.2 Sahara Pipeline Inspection System.....	54
6.3 Trenchless Automated Leakage Repair.....	55
7. Tecnologie di ricerca emergenti .....	56
8. Esempio pratico di ricerca di una perdita idrica .....	58
9. Conclusioni.....	63
Bibliografia.....	65
Sitografia .....	66
Ringraziamenti .....	73



## 1. Introduzione

La questione delle perdite idriche, che si verificano nelle reti degli acquedotti italiani, rappresenta un grave problema per il nostro Paese. Secondi fonti ISTAT, nell'anno 2022 è stata registrata una percentuale di perdite pari al 42,4%, un valore in lieve aumento rispetto al 42.2% dell'anno 2020. Nonostante le normative imposte per migliorare il servizio idrico e gli impegni presi da molti gestori del settore nel ridurre la quantità di guasti ai propri impianti e gli sprechi d'acqua, il valore delle perdite risulta essere ancora troppo elevato. Inoltre, le condizioni delle varie infrastrutture idriche e i bassi investimenti in questo settore non aiutano a risolvere il problema. Tuttavia, tramite l'utilizzo delle strumentazioni adatte al rilevamento e la realizzazione di modelli computerizzati per individuare i guasti, i gestori idrici possono cercare di ridurre al minimo il numero di perdite alle loro infrastrutture, e di conseguenza migliorare il servizio di approvvigionamento idrico ai cittadini e alle diverse utenze presenti sul territorio.

Il presente lavoro di tesi intende trattare le metodologie disponibili per la ricerca delle perdite idriche che si verificano nelle reti di distribuzione dei centri urbani, di analizzarli e di capire quale tra questi sia il più efficace. Pertanto, si è voluto dapprima descrivere il contesto in cui si configura il problema partendo dalla definizione di risorsa idrica, per poi proseguire presentando brevemente le funzioni, le caratteristiche e le opere di cui è costituito un sistema acquedottistico, fino ad esporre il problema delle perdite idriche e dei metodi di ricerca utilizzati per individuarle.

Utilizzando i dati disponibili dal report ISTAT del periodo 2020-2023, è stata descritta la situazione italiana relativa al problema delle rotture idriche che si verificano nelle reti di approvvigionamento, riportando i valori di quantità d'acqua dolce prelevata, di quella erogata e delle perdite riscontrate a livello nazionale e regionale; è stata descritta anche la situazione europea, mostrando la grande variazioni delle percentuali di guasti alla rete idrica tra i Paesi europei. Inoltre, sono state specificate le principali normative in merito all'argomento: la *Legge Galli del 1994* relativa al servizio idrico integrato; il *Decreto Legislativo del 2006 n.152* sui compiti del gestore nel garantire un servizio idrico adeguato ed efficiente; e il *Decreto Ministeriale del 1997 n.99* sulla valutazione della gestione delle perdite e il calcolo del bilancio idrico. È stato definito anche l'obiettivo di ARERA, sulla qualità tecnica del servizio che il gestore deve rispettare.

Successivamente si è passati all'analisi dei vari strumenti di rilevamento delle perdite idriche, dove per ognuna è stato specificato il principale funzionamento, le caratteristiche, i vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica, e un eventuale esempio pratico di utilizzo o installazione nella rete. Le tecnologie riportate sono le seguenti:

- a) strumenti di ascolto delle perdite, come il geofono (apparecchio di tipo indiretto, che viene appoggiato a terra per ascoltare il rumore emesso), le aste geofoniche (apparecchio di tipo diretto, che viene posto a contatto con la condotta o con gli elementi idraulici della rete per ascoltarne il rumore) e il correlatore acustico (strumento elettroacustico che utilizza la propagazione dell'onda del rumore emesso dalla rottura all'interno della condotta);
- b) ricerca dei guasti tramite strumenti di misurazione, come quello di portata (si basa sulle particolari variazioni ottenute dalle misurazioni), di pressione (attraverso la regolazione della pressione) e i contatori d'acqua intelligenti (dall'osservazione dei dati rilevati si possono individuare eventuali anomalie);
- c) altri metodi di rilevamento pratico come il gas tracciante (dove viene utilizzato un gas inerte per rintracciare la perdita) e il consumo zero (isola tratti di condotta per misurare la portata interna);
- d) nuove metodologie che si basano su modelli, come la distrettualizzazione (consiste nel suddividere la rete in distretti per una maggiore gestione di essa), la modellazione (viene realizzata una rete virtuale simile a quella reale per facilitarne la gestione), e i sistemi di supporto alle decisioni (attraverso l'analisi dei dati permette di prendere decisioni sulla gestione della rete idrica).

Nel lavoro di tesi sono state analizzate anche tecniche di rilevamento delle perdite d'acqua utilizzate al di fuori dei confini nazionali, come la tecnologia della *SmartBall* o del *Sahara Pipeline Inspection System*. Entrambe consentono di analizzare le condotte e di individuare la presenza di eventuali rotture senza sospendere il servizio. Inoltre, la tecnologia *Trenchless Automated Leakage Repair* permette anche di riparare la condotta senza conoscere la posizione precisa della perdita. Oltre a queste tecniche di ricerca, stanno emergendo delle nuove che impiegano tecnologie satellitari, droni e l'intelligenza artificiale per svolgere al meglio il loro compito.

Dopo aver confrontato queste tecniche di rilevamento, si è notato che tutte permettono di individuare efficacemente le varie perdite idriche presenti nelle tubazioni, in modo tale da procedere immediatamente al loro riparo o sostituzione per garantire il continuo funzionamento della rete. Per di più, se usate insieme, possono fornire una maggiore precisione sulla individuazione delle perdite idriche. Con l'introduzione di nuove tecnologie di ricerca, i gestori idrici avranno la possibilità di ridurre la percentuale di rotture idriche e allo stesso tempo di fornire un servizio migliore ai cittadini, rispettando anche gli obiettivi di sostenibilità nell'utilizzo della risorsa idrica.



## 2. Generalità sulle risorse idriche e il loro utilizzo

### 2.1 La risorsa idrica

Secondo il vocabolario Treccani, il termine acqua viene definito chimicamente come:

*“acqua (ant. àqua) s. f. [lat. aqua]. – 1. Composto chimico di formula  $H_2O$  (costituito cioè di idrogeno e ossigeno in rapporto di 2:1), diffuso in natura nei suoi tre stati d’aggregazione: solido, liquido e aeriforme; nel linguaggio corrente s’intende in genere l’acqua allo stato liquido, che per la sua abbondanza sulla superficie terrestre e negli organismi viventi fu dagli antichi considerata uno dei quattro elementi.”*

Questo termine può essere distinto in base: agli usi specifici, alla tipologia di acqua che si trova in natura, alle sue caratteristiche organolettiche e chimiche, e in base al suo utilizzo pratico. E quindi si hanno:

*“**A. pura**, che è composta solo dei suoi elementi chimici senza impurezze o sostanze disciolte (è tale l’**a. distillata**, preparata con vari metodi e usata nelle industrie alimentari e farmaceutiche, per accumulatori, ecc.), in contrapp. alle **a. naturali**, tutte quelle che si trovano di fatto in natura, generalm. distinte in **a. meteoriche**, aventi origine dall’evaporazione delle masse liquide esistenti sulla superficie terrestre (che poi tornano sulla terra allo stato liquido, di pioggia o **a. piovana**, o solido, di neve o grandine), e in **a. litosferiche**, circolanti sulla crosta terrestre in superficie o in profondità; le **acque superficiali** sono dette **dilavanti** o **selvagge** se scorrenti senza sede propria, incanalate nel caso contrario, come sono le **a. fluviali, lacustri, palustri** (di fiume, di lago, di palude), complessivamente dette **a. continentali** per differenza dalle **a. marine o oceaniche** (dei mari ed oceani); le **acque sotterranee** vengono dette anche **freatiche, di falda, artesiane, salienti**, secondo che siano libere o soggette a pressioni che ne provochino la risalita, **fossili** quelle incluse in rocce, **giovanili** quelle che si liberano da magma o lave in via di consolidamento; **acque di sorgenti** o **di vena** sono le acque sotterranee che affluiscono all’esterno, e si dicono **termali** se la loro temperatura è più alta della media (nell’uso com., passare le a., fare la cura delle acque termali), e **minerali** quelle che, per la qualità e la quantità dei sali e gas contenuti, sono generalmente usate per cure idropiniche o anche preferite (per motivi igienici, dietetici, ecc.) alle acque normali: **a. minerali medicamentose; a. minerali da tavola**. Secondo il contenuto di sostanze in esse disciolte, le acque di sorgente si denominano **a. solfate** (contenenti solfati), **ferruginose** (contenenti sali di ferro), **salsoiodiche**, ecc. L’acqua si denomina anche dal sapore delle sostanze in essa disciolte: **a. dolce** (quella dei fiumi o dei laghi), **a. salata** (del mare); dal tenore di acidità: **a. acida, neutra, alcalina**; dal contenuto di sali di magnesio e di*

calcio: *a. dolce, molle, dura, durissima*. Secondo che sia o no adatta a essere bevuta, l'acqua si distingue in **potabile e non potabile**. In base agli scopi pratici per cui serve o per cui è stata usata, si hanno inoltre: *a. chiare o vive*, non ancora adoperate dall'uomo; *a. di scolo*, quelle già usate, per es., nell'irrigazione agricola; *a. nere o luride o di rifiuto o reflue*, le acque di scolo delle fognature di abitazioni, di industrie, ecc.; si dicono inoltre *a. industriali* quelle che, in base ai requisiti fisici, chimici, ecc., trovano impiego in processi industriali, o anche quelle che, residue in certe lavorazioni, debbano subire un adeguato trattamento prima di essere immesse allo scarico. [ ]”

Altri significati di acqua, riportati dal vocabolario Treccani, si possono trovare: nella poetica; per definire aree di mare; nel mondo delle costruzioni edili; “nel linguaggio giuridico (acque pubbliche e private); Altri usi estens., in cui acqua ha il sign. generico di «liquido»; e come locuzione figurativa”.

L'acqua copre il 71% della superficie del nostro pianeta Terra ed è costituita, come mostrato di seguito in Figura 1, dal 97.5% da acqua salata proveniente dagli oceani e dai mari, e il restante 3% da acqua dolce [Gruppo CAP, 15 dicembre 2021; Claber, 2010; USGS, -]. Quest'ultima si suddivide: 68.7% presente nelle calotte polari e nei ghiacciai; 30.1% nelle falde acquifere e sotterranee; 0.9% permafrost; e 0.3% nelle acque superficiali (fiumi, laghi, stagni) e nell'atmosfera [USGS, -]. Parlando in termini volumetrici, la quantità di acqua totale presente sul nostro pianeta è di circa 1390 milioni di miliardi di metri cubi, di cui 1354.8 milioni di miliardi di metri cubi di acqua salata e 35.2 milioni di miliardi di metri cubi complessivi di acqua dolce [Claber, 2010; Gruppo CAP, 15 dicembre 2021]. Dove l'acqua dolce superficiale è di 93000 miliardi di metri cubi [Claber, 2010].

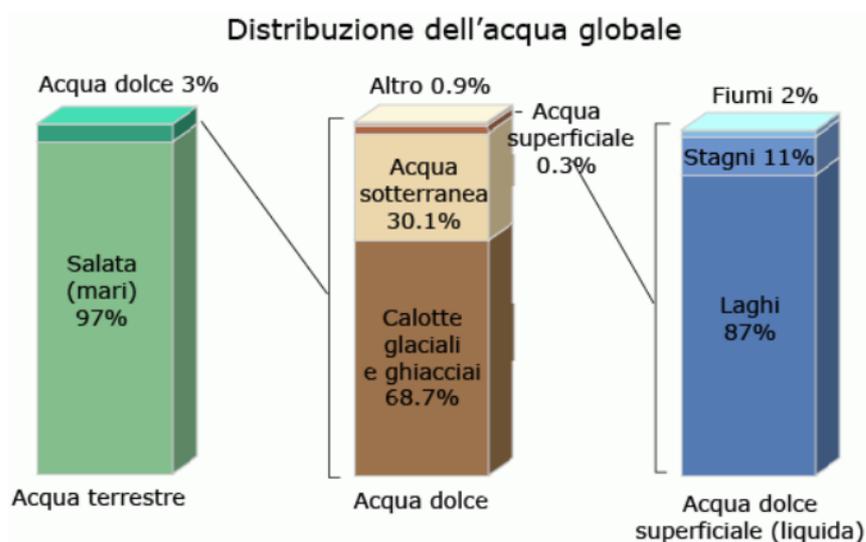


Figura 1: Distribuzione percentuale dell'acqua sul pianeta Terra. (Fonte: usgs.gov)

L'acqua assume un ruolo fondamentale all'interno del nostro pianeta Terra, perché costituisce uno dei principali elementi degli ecosistemi, soprattutto all'interno della biosfera. In più, è fondamentale nel controllo del clima e del meteo terrestre, è un'elemento indispensabile per tutti gli organismi viventi animali e vegetali conosciuti, incluso anche l'essere umano. Essa si rigenera attraverso il ciclo idrologico, esso indispensabile per garantire la vita sulla Terra e per descrivere la circolazione dell'acqua all'interno dell'idrosfera, come mostrato in Figura 2.

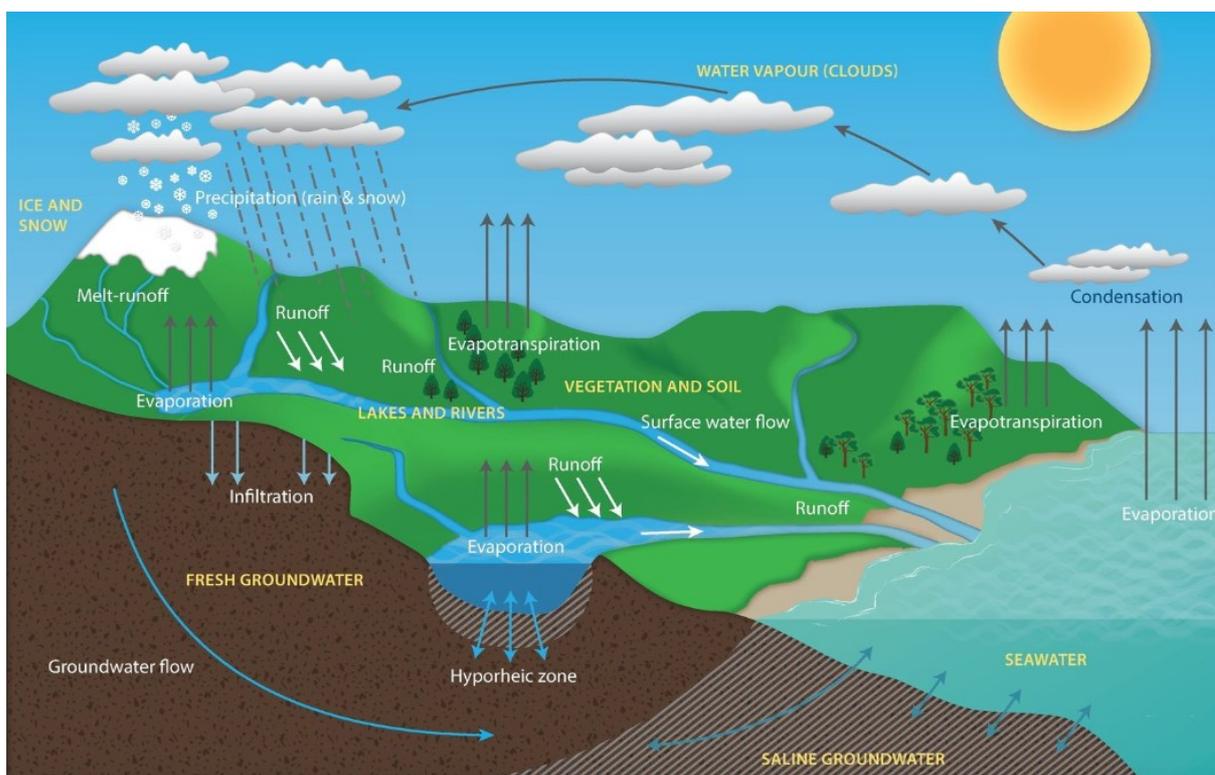


Figura 2: Ciclo idrologico dell'acqua.

(Fonte: montagna.tv)

Inoltre, insieme ai suoi servizi, è importante per la sostenibilità ambientale, il benessere dei cittadini e lo sviluppo economico. Infatti, l'acqua assume un ruolo molto importante anche nella nostra società, per questo essa rientra nell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite, in particolare viene rappresentata all'interno dell'obiettivo "Acqua pulita e servizi igienico-sanitari" con lo scopo di "Garantire a tutti la disponibilità e la gestione sostenibile dell'acqua e delle strutture igienico-sanitarie"[ISTAT, 22 marzo 2024]. A questo obiettivo se ne aggiungono altri, come il Goal 13 e 14.

La risorsa idrica viene utilizzata in molti settori produttivi, economici e civili, in quantità differenti. Principalmente è impiegata:

- nel consumo civile, per usi potabili (alimentazione e preparazione del cibo, igiene personale, pulizia degli ambienti domestici) e non potabili (negli impianti di riscaldamento domestico e di giardinaggio);
- in agricoltura, per l'irrigazione dei terreni, e nell'allevamento;
- nella produzione industriale estrattiva, alimentare, farmaceutica, manifatturiera, chimica, artigianale;
- nelle costruzioni edili;
- nella produzione energetica, soprattutto nelle centrali nucleari, in quelle che impiegano combustibili fossili, nelle centrali idroelettriche e termoelettriche;
- negli impianti di riscaldamento e di raffreddamento;
- nel settore turistico;
- nel settore terziario, quindi nella sanità privata e pubblica, nei trasporti e nella ricerca;
- nella pulizia stradale, nell'innaffiamento del verde pubblico e negli idranti dell'antincendio.

Facendo riferimento al continente europeo, il consumo di acqua registrato nei primi mesi dell'anno 2019 vede il settore agricolo rappresentare il 40% del consumo idrico totale annuo, a seguire il settore energetico con il 28%, il settore minerario e manifatturiero con il 18% e nell'uso domestico con il 12% [European Environment Agency, 14 febbraio 2019]. Questi valori variano da Stato a Stato.

## **2.2 Sistema acquedottistico**

Secondo il vocabolario Treccani, il termine acquedotto viene definito come:

*“acquedótto (ant. acquidótto) s. m. [lat. aquaeductus, cioè aquae ductus «conduttura d'acqua»]. – 1. Presa e conduzione di acque da un luogo a un altro; in questa accezione astratta, il termine è limitato alla locuz. servitù d'a. che indica, nel linguaggio giur., il diritto di derivare acqua o di condurla attraverso il fondo altrui per i bisogni della vita, e per usi agrarî o industriali. 2. Più com., il complesso delle opere che servono alla presa dell'acqua e alla sua condotta e distribuzione: la costruzione di un nuovo a.; i ruderi degli antichi a. romani. [ ]”*

Principalmente il sistema acquedottistico è impiegato per l'approvvigionamento di acqua potabile alle diverse utenze, indipendentemente che esse siano abitazioni, uffici, negozi o

attività commerciali, rispettando la normativa del *Decreto Legislativo del 23 febbraio 2023 n. 18* riguardante le caratteristiche delle acque destinate al consumo umano sia in termini di qualità che di quantità.

Questo sistema è costituito da un insieme di manufatti che permettono il prelievo dell'acqua da una sorgente naturale, la sua potabilizzazione e immagazzinamento, e da tubazioni che si estendono per chilometri sottoterra lungo tutto il territorio fino a raggiungere i vari immobili.

Esso può essere realizzato:

- con canali artificiali a pelo libero, come l'Acquedotto del Colorado;
- con tubazioni a pelo libero, come l'Acquedotto Pugliese, oppure in pressione;
- oppure con entrambi i metodi sopra riportati, come è stato fatto per quello di Peschiera-Capore, il principale acquedotto di Roma.

Si definisce dotazione idrica, il volume d'acqua medio giornaliero relativo a ciascun abitante per soddisfare il proprio fabbisogno idrico-potabile.

L'acquedotto deve essere dimensionato in base alla domanda idrica da garantire ad un certo centro urbano, tenendo conto della sua crescita demografica e della tipologia di attività presenti durante l'intera vita utile dell'impianto. Quindi si procederà alla stima del fabbisogno idrico considerando:

- la dotazione idrica media annua pro-capite, espressa in  $l/ab \cdot gg$ , cioè la quantità d'acqua complessiva da fornire per il consumo domestico, per quello pubblico con i suoi servizi, delle varie attività commerciali e di quelle turistiche, comprese le perdite lungo la rete e gli sprechi, rapportato al numero di abitanti residenti. Questo valore non deve essere inferiore a  $150 l/ab \cdot gg$  [Gioia A., 2019];
- l'andamento demografico futuro su un intervallo di circa 50 anni, facendo riferimento alla crescita del numero di residenti osservata nel passato [Mambretti S., 16 giugno 2020].

Nella valutazione della domanda bisogna tenere conto anche di altri fattori, come il clima, il livello socioeconomico, gli usi e le abitudini della popolazione, le capacità turistiche, le dimensioni e la posizione geografica dell'insediamento urbano interessato, e le sue variabilità nell'andamento dei consumi annuali, di quelli settimanali e di quelli giornalieri.

Queste informazioni vengono riportate nei Piani Regolatori Generali degli Acquedotti, oltre alle quantità delle dotazioni idriche pro-capite definite in funzione della densità abitativa del nucleo urbano.

### 2.3 Evoluzione storica dell'acquedotto

Dall'Età del Bronzo comparvero le prime popolazioni dotate di sistemi per la raccolta dell'acqua piovana, che veniva immagazzinata all'interno di cisterne scavate nella roccia.

La città di Petra, situata in una regione semidesertica della Giordania, era dotata di un proprio sistema idrico che gli permise di rendere fertile le terre del deserto. Tale sistema prevedeva il raccoglimento dell'acqua piovana e di quella delle sorgenti delle colline vicine, in una serie di vasche scavate nella roccia con lo scopo di depurarla (Figura 3), per poi, raccoglierla e conservarla all'interno di cisterne impermeabilizzate con gesso collegate a dei pozzi. Da qui, l'acqua passava all'interno di canali scavati nella roccia (Figura 3) fino a sfociare nella grande cascata vicino al monumento *Palace Tomb*. Un sistema idrico simile a questo venne realizzato nella città di Matera, dove l'acqua terminava all'interno delle abitazioni in apposite vasche sotterranee a forma di campana.



Figura 3: Vasche di raccolta dell'acqua (a sinistra) e canaletta di roccia (a destra) della città di Petra.

(Fonte: pangea-project.org)

Successivamente, i sumeri realizzarono i primi sistemi di approvvigionamento idrico delle città prelevando l'acqua del Tigre e dell'Eufrate, e quelli di drenaggio e scolo delle acque. Più avanti, furono realizzati acquedotti sotterranei nella roccia con lo scopo di convogliare l'acqua uscente dalle sorgenti delle montagne fino ai centri abitati, tali sistemi furono impiegati dai fenici, dagli assiri, dai persiani e dai greci. In Persia era una tecnica molto diffusa, quello *di Zarch* è il più esteso e il più antico con una lunghezza di 71 km e 2115 pozzi verticali, e prelevavano l'acqua dal sottosuolo [Wikipedia, 27 aprile 2024]. La città greca di Cnosso aveva una rete di approvvigionamento idrico, una per lo scarico di quella sporca e una per lo smaltimento di quella in eccesso in caso di precipitazioni intense.

Con l'arrivo dei romani si sviluppò la tecnica degli acquedotti sopraelevati ovvero di strutture formate da arcate in mattoni e cemento, come il *Pont du Gard* (riportato in Figura 4) e quello di *Segovia*. Per permettere di distribuire l'acqua delle sorgenti alle città e nelle provincie, e per gestire la pressione dell'acqua che, se fosse stata troppo elevata, avrebbe danneggiato le condotte sotterranee. Questi potevano avere anche due, tre o quattro arcate sovrapposte.



Figura 4: Tipica struttura ad archi romana, Pont du Gard in Francia.

(Fonte: franciaturismo.net)

I romani costruirono numerosissimi acquedotti in tutto l'impero e il più lungo fu quello di Cartagine con una lunghezza di circa 141 km [Wikipedia, 27 aprile 2024]. Invece, la città di Roma possedeva la più grande rete di condotte idriche e 11 acquedotti, tutt'ora ancora in funzione, che arrivavano ad una lunghezza totale di circa 350 km [Wikipedia, 27 aprile 2024]. Gli acquedotti costruiti dai romani erano molto resistenti, efficienti, ben progettati, permettevano di trasportare grandi quantità di acqua per sola gravità ed erano composti da condotte o canali interrati e dalle strutture arcate. Non tutte le città romane possedevano un acquedotto, perciò utilizzavano pozzi e vasche pubbliche e private realizzate al di sotto delle case. Queste potevano avere enormi dimensioni, come la *piscina mirabilis di Miseno* in provincia di Napoli realizzata sottoterra e possedeva una capacità di 12600 metri cubi [Rodà I., 23 settembre 2023]. A volte venivano utilizzati dei sifoni rovesci per superare le forti depressioni delle valli, ancora oggi questa tecnica viene utilizzata, ed erano costituiti da tubazioni in argilla o di piombo rinforzati con blocchi di pietra. In più gli acquedotti romani erano dotati di rubinetti per regolare la pressione e il flusso d'acqua, serbatoi di stoccaggio, vasche di sedimentazione, filtri a rete e piccole cascate per areare l'acqua. Inoltre, erano protetti

da particolari leggi per impedire l'inquinamento dell'acqua trasportata ed erano soggetti a manutenzione per garantire il corretto funzionamento.

Durante il medioevo si utilizzarono tecniche più semplici rispetto a quelle romane, ad esempio l'acqua veniva prelevata dai pozzi e trasportata in apposite cisterne o dai portatori d'acqua. In questo periodo ci fu anche un grande sviluppo di opere idriche nelle regioni musulmane per contrastare la siccità, come “*gli acquedotti di Elvas e di Siviglia nella penisola iberica, quelli di Fez e di Marrakesh in Marocco*” [Wikipedia, 27 aprile 2024].

Dal XIII secolo venne sviluppata la tecnica del trasporto dell'acqua anche in salita, come avvenne a Perugia, Orvieto e Spoleto con il *Ponte delle Torri* [Wikipedia, 27 aprile 2024]. Altre opere importanti furono costruite in Giappone, come l'*acquedotto Tamagawa*, e nell'Impero Ottomano. Il 7 maggio 1762 fu inaugurato l'*acquedotto Carolino* ideato dall'architetto Luigi Vanvitelli, per fornire la Reggia di Caserta e il Belvedere di San Leucio [Wikipedia, 27 aprile 2024].

All'inizio dell'Ottocento fu inaugurato l'*acquedotto Nottolini* per alimentare la città di Lucca. Questo sistema aveva alle estremità dell'impianto due vasche di sedimentazione e una struttura ad arcate, sulla quale l'acqua correva a pelo libero fino a raggiungere la vasca più a valle, per poi proseguire in pressione all'interno delle condotte. Questa tecnica permise di garantire l'acqua ai primi piani degli immobili della città.

Nella metà del XIX secolo vennero sviluppati nuovi materiali, come il calcestruzzo e la ghisa, e con lo sviluppo del settore metallurgico consentii di realizzare condotte in pressione senza dover realizzare tratti a pelo libero [Wikipedia, 27 aprile 2024]. Questo aveva portato ad un miglioramento delle condizioni igieniche, diminuendo le contaminazioni delle acque e quindi le malattie come il colera e il tifo. Però la realizzazione di questi nuovi sistemi acquedottistici richiedeva un finanziamento dai grandi investitori privati, tipo le banche, e quindi inizialmente furono costruiti solo nelle grandi città. Ne è l'esempio, il primo acquedotto in pressione della città di Londra realizzato nel 1854 [Wikipedia, 27 aprile 2024]. Invece in Italia nacquero molte società per azioni per la costruzione e la gestione di questi impianti, come la *Società acque potabili* di Torino nel 1852 [Wikipedia, 27 aprile 2024].

Nel XX secolo furono realizzate grandi opere acquedottistiche come l'*Acquedotto pugliese* in Italia, il *Grande fiume artificiale* in Libia e quelle per fornire d'acqua le città americane maggiormente estese [Wikipedia, 27 aprile 2024].

## 2.4 Descrizione della rete acquedottistica

Un impianto acquedottistico odierno, come quello riportato in Figura 5, è costituito da un insieme di opere collegate tra loro, dove ognuna svolge una specifica funzione. Si compone di: opere di captazione, sistema di potabilizzazione, eventuale impianto di sollevamento, rete di adduzione, di un ulteriore sistema di potabilizzazione, serbatoi di accumulo di testata o di estremità e della rete di distribuzione da cui si collegano le varie utenze con la propria rete idraulica.

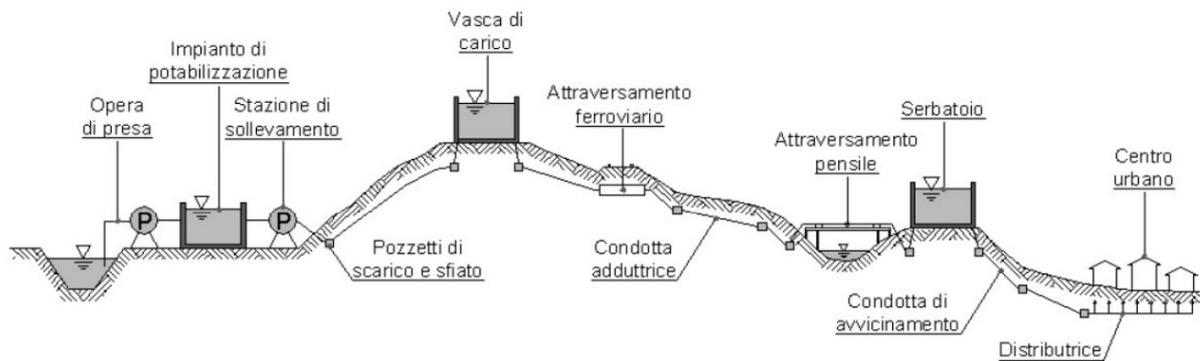


Figura 5: Schema generale di un impianto di un acquedotto.

(Fonte: Saba A., 2014)

Naturalmente le caratteristiche di un sistema acquedottistico possono cambiare a seconda della topografia del territorio su cui poggia l'intero impianto e dalla grandezza del centro urbano da servire, ovvero dall'andamento demografico e dal numero di attività presenti.

### 2.4.1 Opere di captazione

Le opere di captazione o di presa sono quelle che permettono di prelevare, regolare e derivare l'acqua da fonti superficiali (fiume, lago), sotterranee (falda freatica, falda confinata) e da sorgenti naturali. In caso di scarsità idrica da queste fonti si ricorre al prelievo di acqua marina tramite dissalatori.

Nel caso della captazione di acqua superficiale da fiume, a seconda della quantità d'acqua da emungere rispetto allo stato di magra, cioè *“la condizione di un corso d'acqua in regime di minima portata”*, si utilizzano sistemi di sollevamento dotati di pompe oppure delle traverse [Vocabolario Treccani]. Quest'ultimi consistono in uno sbarramento fluviale che può essere fisso o mobile con paratoia e di tipologie differenti in base alla grandezza della portata da derivare. In alternativa si può adoperare il sifone a cavaliere d'argine. Mentre la captazione da

lago viene eseguita tramite una torre di presa avente un certo numero di prese disposte a profondità diverse.

Nel prelievo di acque sotterranee non sorgentizie si utilizzano gallerie filtranti, cioè, cunicoli o condotte forate che permettono l'ingresso dell'acqua da uno o da entrambi i lati, oppure pozzi, ovvero uno scavo verticale nel terreno che intercetta l'acquifero (Figura 6). Quest'ultimi possono essere in muratura o autoaffondanti in calcestruzzo armato per captazioni a basse profondità, mentre per le alte si hanno i pozzi perforati realizzati con macchine per la trivellazione del terreno. In entrambi i casi si utilizza un sistema di pompaggio per portare l'acqua in superficie.

Per sorgente naturale si intende *“Il punto e il luogo in cui scaturisce, per defluire, una vena d'acqua sotterranea”* in superficie per cause naturali [Vocabolario Treccani]. In natura esistono diverse tipologie di sorgenti, come quella artesianiana, di emergenza e di sbarramento. In questo caso l'opera di presa è un manufatto incastonato nella roccia (Figura 6) e collegata con una serie di vasche (quella di raccolta, di controllo, della sedimentazione e di presa) chiuse e protette.

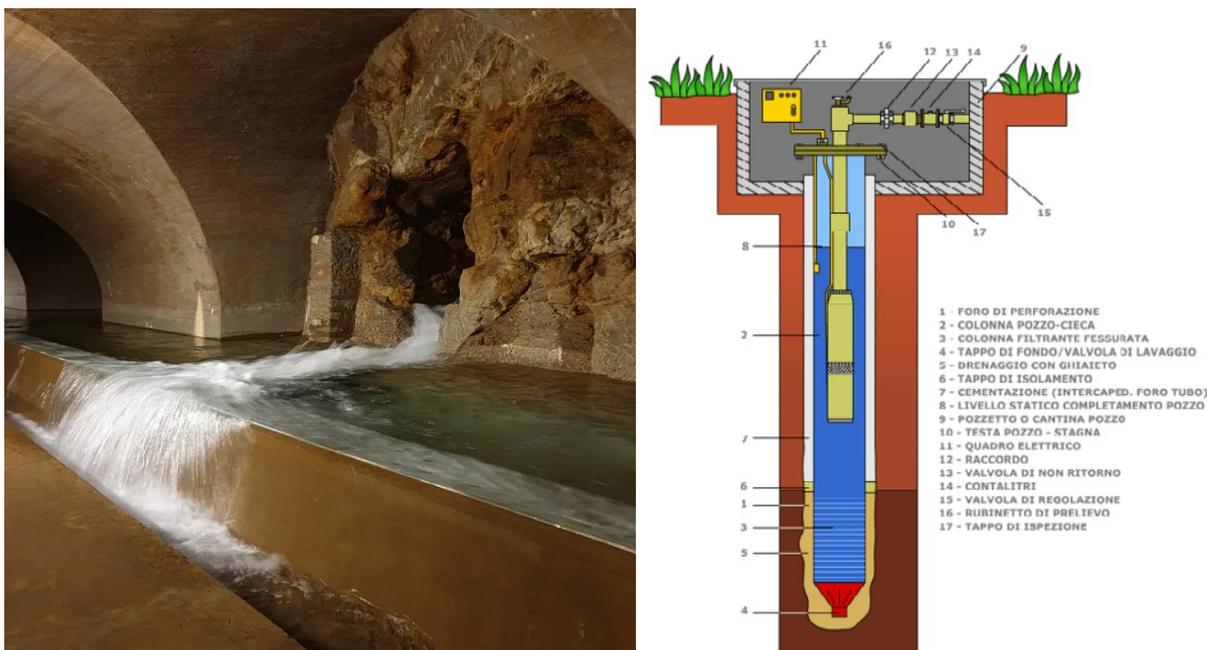


Figura 6: Opera di presa da sorgente (a sinistra) e da falda (a destra).

(Fonte: sienanews.it; acquageo.com)

#### 2.4.2 Sistema di potabilizzazione

Il sistema di potabilizzazione è un impianto che permette di migliorare le caratteristiche fisiche, visive, organolettiche, chimiche e di ridurre quelle microbiologiche negative dell'acqua prelevata senza introdurre nuove sostanze inquinanti o con effetti negativi, in modo tale da

renderla salutare e salubre per il consumo umano. Esso si posiziona subito a valle dell'opera di presa. In Figura 7 è riportato un esempio di impianto di potabilizzazione.

La depurazione dell'acqua può avvenire per mezzo di:

- trattamenti fisici: grigliatura, filtrazione, staccatura, sedimentazione e chiariflocculazione, per la rimozione di materiali e delle particelle solide grossolane, sospese e colloidali;
- trattamenti chimici: addolcimento, stabilizzazione, deferrizzazione e demanganizzazione, desilicazione, fluorizzazione e defluorazione, e aerazione o ossidazione, per la rimozione delle sostanze disciolte presenti al suo interno;
- trattamenti di affinazione: adsorbimento su carboni attivi e demineralizzazione, per perfezionare le caratteristiche organolettiche (come colore, sapore e odore) e la concentrazione di sali disciolti;
- disinfezione: clorazione, cloro-ammoniazione, ozonizzazione e irraggiamento con UV, per la rimozione dei batteri residui e dei microrganismi patogeni;
- altri trattamenti: l'osmosi inversa utilizzata nel processo di desalinizzazione dell'acqua di mare.

Il tipo e il numero di trattamenti dipenderanno dalle caratteristiche dell'acqua estratta.

Nella fase di potabilizzazione dell'acqua è fondamentale rimuovere tutti quei microrganismi patogeni e contaminanti che si possono trovare nell'acqua potabile, e che possono portare a malattie e infezioni al corpo umano, con particolare attenzione a quelli emergenti.

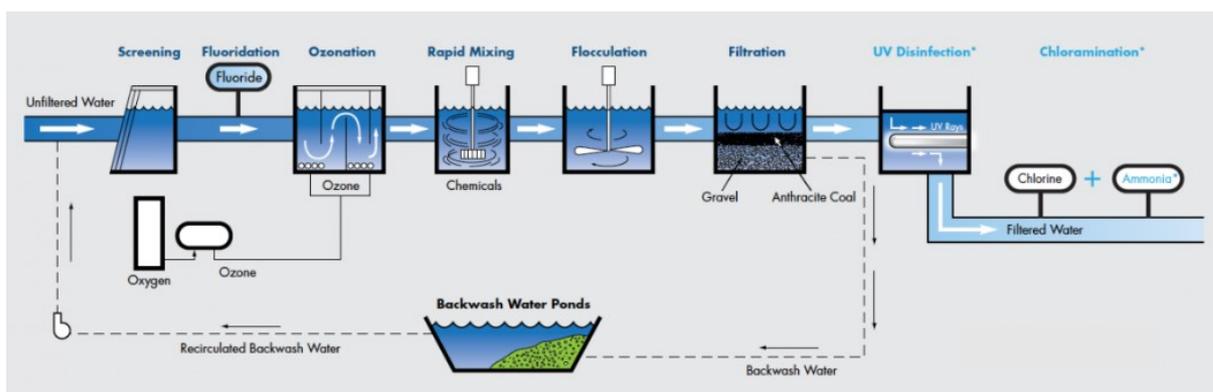


Figura 7: Schema di potabilizzazione dell'acqua.

(Fonte: betterbuildingssolutioncenter.energy.gov)

### 2.4.3 Sistema di pompaggio

Il sistema di pompaggio viene adoperato quando sia necessario portare l'acqua potabile a quote superiori rispetto al punto di prelievo e di potabilizzazione. Per fare ciò, si impiegano delle pompe dotate di girante che trasformano l'energia meccanica del motore esterno in energia

idraulica necessaria per garantire il sollevamento. Le tipologie di pompe che si possono utilizzare sono:

- radiali o assiali, in base alla direzione del flusso interna;
- ad asse orizzontale, verticale o inclinato, in base al posizionamento dell'asse rispetto all'orizzonte;
- di superficie, sommerse o coassiali di superficie, a seconda se la pompa e il suo motore sono, rispettivamente, fuori, immersa o parzialmente immersa nell'acqua;
- monocellulari o multicellulari, in base al numero di giranti contenute.

In Figura 8 viene riportato un impianto di pompaggio della condotta di adduzione.



Figura 8: Sistema di pompaggio Tubone.

(Fonte: misaitalia.it)

#### **2.4.4 Rete di adduzione**

La rete di adduzione si riferisce a una o più condotte che lavorano generalmente in pressione (come quella di Figura 9) e raramente a pelo libero, con lo scopo di convogliare l'acqua potabile dalle vasche di potabilizzazione ai serbatoi di testata o di estremità di un centro abitato. Le condotte possono essere in acciaio, ghisa o cemento, e rivestite esternamente di catrame per evitare che si ossidano e che agenti esterni contaminino l'acqua. Lungo la condotta adduttrice vengono posizionate diverse opere d'arte fondamentali per il suo funzionamento e per la sua manutenzione, ed esse sono:

- scarichi: pozzetti in calcestruzzo armato posizionati nei punti più bassi del tracciato, aventi una derivazione chiusa da una saracinesca che se aperta consente il rilascio dell'acqua presente nella condotta adduttrice nei fossi o collettori vicini, in modo tale da abbassare la pressione dell'adduttrice nel caso fosse elevata;

- sfiati: utilizzati per far uscire le bolle d'aria all'interno della condotta che potrebbero ostacolare il flusso idrico fino ad interromperlo. Essi possono essere liberi, cioè, costituiti da una tubazione con estremità curvata, o automatici, ovvero un'apparecchiatura idraulica dotata di una sfera galleggiante. Questi sono posizionati nei punti più alti del tracciato;
- opere di interruzione: vasche di capacità limitata utilizzate per annullare la piezometria in qualche punto della condotta adduttrice, per non sottoporre alcuni tratti a pressioni elevate, per consentire la derivazione di due o più condotte e per svolgere misurazioni idrauliche di controllo;
- opere di accumulo: serbatoi di grandi capacità con la funzione di garantire la continuità del servizio idrico per un certo periodo di tempo, in caso di interruzione del flusso nel tratto di monte;
- tratte pensili e sottopassi: si utilizzano nel caso di attraversamenti sospesi sopra a fiumi, torrenti o frane, e sotterranei sotto a strade, aeroporti o ferrovie.



Figura 9: Posa di una condotta di adduzione.

(Fonte: [angeliidraulica.it](http://angeliidraulica.it))

### 2.4.5 Serbatoio di accumulo di testata e di estremità

Il serbatoio di accumulo o di compenso è un vaso in calcestruzzo armato con lo scopo di accumulare e di rilasciare acqua potabile in base alle variazioni del consumo d'acqua durante il giorno (o la settimana). Esso svolge la funzione di compenso, ovvero, *“deve accumulare nelle ore di minor consumo, e particolarmente durante la notte, le acque che arrivano dalla condotta di adduzione (in entrata dalle sorgenti, dai pozzi o dal Lago), e restituire le acque durante le ore di consumo superiori alla media, in modo da fronteggiare le richieste delle ore di punta (mattino e tardo pomeriggio)”* [Lario Reti Holding S.p.A., 2021]. Inoltre, viene utilizzato per:

- garantire, in caso di perdite lungo la rete, il continuo approvvigionamento idrico alle utenze, anche in caso di manutenzione;
- fornire, in caso di incendio, una portata d'acqua di 6-7 ore in uscita dagli idranti;
- gestire la pressione dell'acqua della rete a valle, in modo tale che questa possa arrivare per gravità all'ultimo piano degli edifici (considerando un quartiere omogeneo). Per quelli più alti, verranno dotati di un'autoclave.

Il serbatoio viene costruito vicino ai centri urbani; in quelli montani può essere del tipo interrato, in caverna o a terra (Figura 10), mentre in quelli pianeggianti può essere a terra con torrino piezometrico, con autoclave o pensile, come quello riportato in Figura 10. In base al posizionamento si distinguono in serbatoi:

- di testata, situato tra la rete di adduzione e quella di distribuzione;
- di estremità, dove la rete adduttrice funziona anche da distribuzione;
- di tipo intermedio, situati all'interno del centro urbano quando questo è dotato di una rete di distribuzione suddivisa in più servizi a quote diverse.



Figura 10: Serbatoio di accumulo pensile (a sinistra) e a terra (a destra).

(Fonte: [tecnohabitingegneria.it](http://tecnohabitingegneria.it); [sicea.com](http://sicea.com))

## 2.4.6 Rete di distribuzione

La rete di distribuzione è un reticolato molto ampio di condotte interrato, aventi differenti diametri che permettono di trasportare l'acqua potabile dal serbatoio di compensazione alle varie utenze distribuite sul territorio urbano. Quest'ultime si collegheranno tramite allacci, tubazioni di diametro inferiore, e termineranno con un contatore per la misurazione del volume d'acqua consumata dall'utenza stessa. Le condotte sono realizzate in ghisa ricoperti di catrame, in PVC (polivinilcloruro), polietilene o in acciaio. Vengono posizionate sottoterra sopra alla rete fognaria, lungo il tracciato stradale del centro abitato.

La rete può essere costruita:

- a maglie aperte o ramificate, formata da una serie di tubazioni che si diramano nel territorio (come mostrato in Figura 11). Questo metodo è poco utilizzato ma più economico di quello chiuso;
- a maglie chiuse, formata da una serie di tubazioni che generano degli anelli (come mostrato in Figura 11). Questa tipologia garantisce maggiori vantaggi in termini di gestione, igiene e funzionalità;
- mista, cioè, comprende tratti a maglie aperte e chiuse.

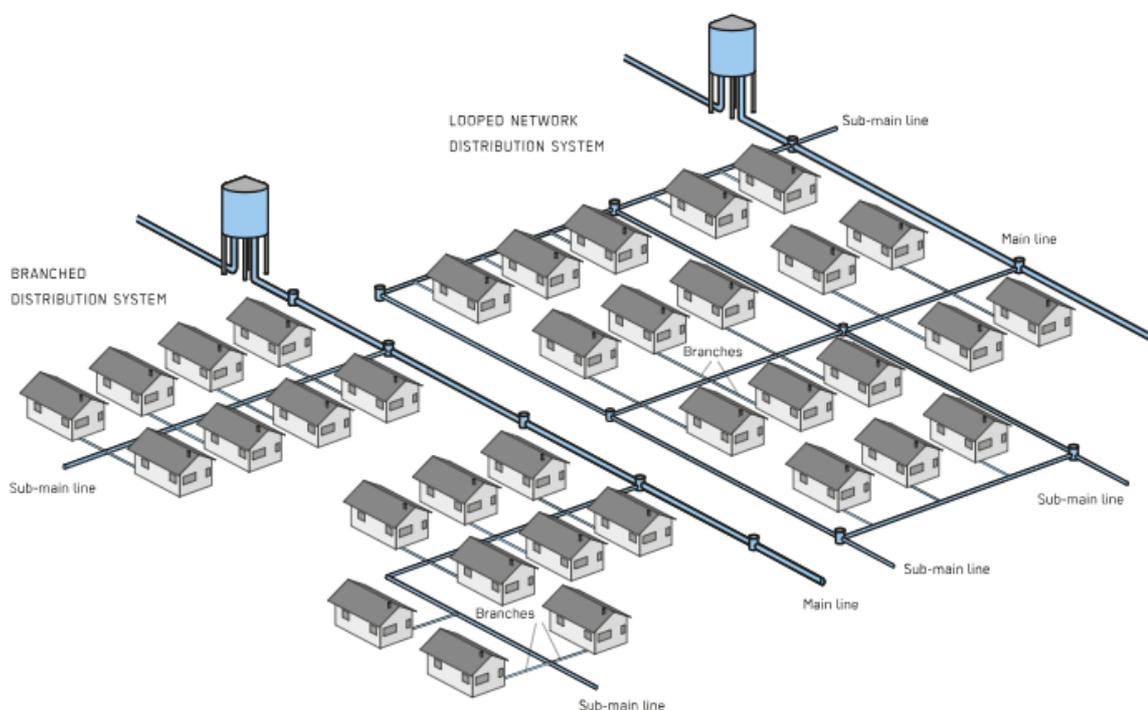


Figura 11: Schema della rete di distribuzione aperto (in basso) e chiuso (in alto) di un centro abitato.

(Fonte: emergency-wash.org)

#### **2.4.7 Problematiche lungo la rete di distribuzione**

Nella rete di distribuzione si possono riscontrare diverse problematiche che incidono sulla sua efficienza e gestione a causa della loro estensione e limitata accessibilità, ed esse riguardano:

- l'individuazione dei tratti di condotta non segnalati, in modo tale da avere una rete di distribuzione completa;
- condizioni delle condotte e degli elementi idraulici, come valvole e saracinesche;
- gli allacci abusivi alla rete idrica;
- gli errori di misurazione dei contatori;
- l'esposizione a fonti di inquinamento emergenti e di origine fognaria;
- le perdite idriche;
- investimenti insufficienti nella gestione del servizio idrico.

Spetta a tutti i gestori del Servizio Idrico Integrato, introdotto con la *Legge Galli del 1994*, a risolvere e diminuire queste problematiche, oltre a quelle che si riscontrano nelle altre parti dell'impianto acquedottistico, per garantire continuamente acqua di qualità, sicura e salubre a tutti i cittadini.

### **3. Perdite idriche nella rete di distribuzione**

Le perdite idriche nella rete di approvvigionamento includono le fuoriuscite d'acqua da uno o più punti della condotta di alimentazione che generano una diminuzione della pressione all'interno della tubazione stessa, le fuoriuscite da valvole e/o tutti quei volumi idrici non fatturati. Queste perdite possono creare danni economici notevoli, sprechi di acqua potabile e disagi per i cittadini; perciò, è necessario ridurre al minimo queste perdite. Prima di procedere alla loro individuazione nella rete, è necessario fare una loro stima attraverso un bilancio idrico che permetta di confrontare i volumi d'acqua in entrata con quelli in uscita in modo tale da verificare lo stato della rete. Quest'ultima analisi non è affatto semplice e richiede la conoscenza dei consumi delle varie utenze servite, autorizzate e no, e i valori di misura nello stesso intervallo di tempo. Questa valutazione può essere eseguita con lo schema proposto dall'International Water Association, IWA, che considera anche i diversi utilizzi dell'acqua in modo tale da individuare correttamente la perdita idrica e procedere alla loro ricerca (Figura 12).



Figura 12: Schema IWA per la valutazione delle perdite idriche.

(Fonte: larioreti.it)

### 3.1 Tipologie di perdite idriche

Esistono tre categorie di perdite idriche che si possono verificare nella rete di distribuzione:

- consumi autorizzati non contabilizzati: sono i volumi d'acqua erogati che non stati conteggiati o fatturati, come quelli utilizzati in caso di incendio, per il lavaggio delle strade, irrigazione del verde pubblico e per il funzionamento delle fontane pubbliche;
- perdite apparenti: non sono di autentiche rotture della rete, bensì dei vuoti economici difficili da individuare, come per esempio:
  - consumi non autorizzati, come gli allacci abusivi, ovvero collegamenti illegali alla rete idrica comunale;
  - errori di misura dei misuratori di portata a monte della rete e dei contatori delle utenze, che tendono a sotto misurare le portate transitate;
  - errori umani nel metodo di contabilizzazione e nella lettura dei contatori dell'utenza;
  - volumi di servizio, per garantire il continuo funzionamento dell'impianto acquedottistico comunale.
- perdite reali: sono i volumi d'acqua concretamente dispersi e quindi non più utilizzabili. Principalmente si suddividono in:
  - perdenti evidenti, ovvero le fuoriuscite d'acqua visibili, che si verificano in seguito ad improvvise rotture nella rete generando l'uscita di grandi portate d'acqua dalla superficie. La velocità di risalita in superficie dipende dalla pressione della condotta, dalla granulometria del terreno e dalle dimensioni della rottura stessa;

- quelle occulte, danno luogo all'uscita di piccole portate dalla parte bassa delle condotte o dei giunti. Sono individuabili solamente con apposite apparecchiature o metodi di rilevamento, così poi procedere alla loro riparazione. Quelle abbastanza piccole da non essere intercettate dalla strumentazione, come il gocciolamento da giunti e valvole, rappresentano la categoria delle perdite che non possono essere eliminate e che sono sempre presenti;

A queste si aggiungono anche le perdite:

- negli allacciamenti a monte del contatore di misura;
- nelle operazioni di manutenzione.

Le possibili cause di queste perdite idriche sono attribuibili alla gestione della rete di approvvigionamento poco consapevole e sostenibile, a fattori fisiologici, di deterioramento e obsolescenza degli impianti, a problemi legati all'estensione della rete e dal numero di allacci, alla pressione in esercizio, a reti mal progettate, alla corrosione, rottura, deterioramento ed età delle condotte e a giunzioni difettose o inefficienti.

### **3.2 La situazione in Italia sulle perdite idriche**

In Italia, la questione delle perdite idriche è un pesante problema e lo stato delle varie infrastrutture idriche non aiuta a migliorare la situazione.

Secondo il report dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) relativo al periodo 2020-2023, *“nel 2022, il volume di acqua prelevata per uso potabile in Italia è pari a 9.14 miliardi di metri cubi”*, necessari per garantire il fabbisogno idrico giornaliero della popolazione, di servizi pubblici come scuole, ospedali e uffici, e di tutte le attività commerciali, produttive, turistiche, agricole e industriali allacciati alla rete idrica. Nonostante dal 2018 si sia registrato una lieve diminuzione dei volumi in quasi tutte le regioni, si conferma il primato italiano all'interno dell'Unione Europea per il volume di acqua dolce complessiva prelevata per il consumo potabile, escludendo quella presa da acque marine [ISTAT, 22 marzo 2024]. In termini di consumo pro capite, il nostro Paese occupa il terzo posto dietro a Irlanda e Grecia, come mostrato in Figura 13.

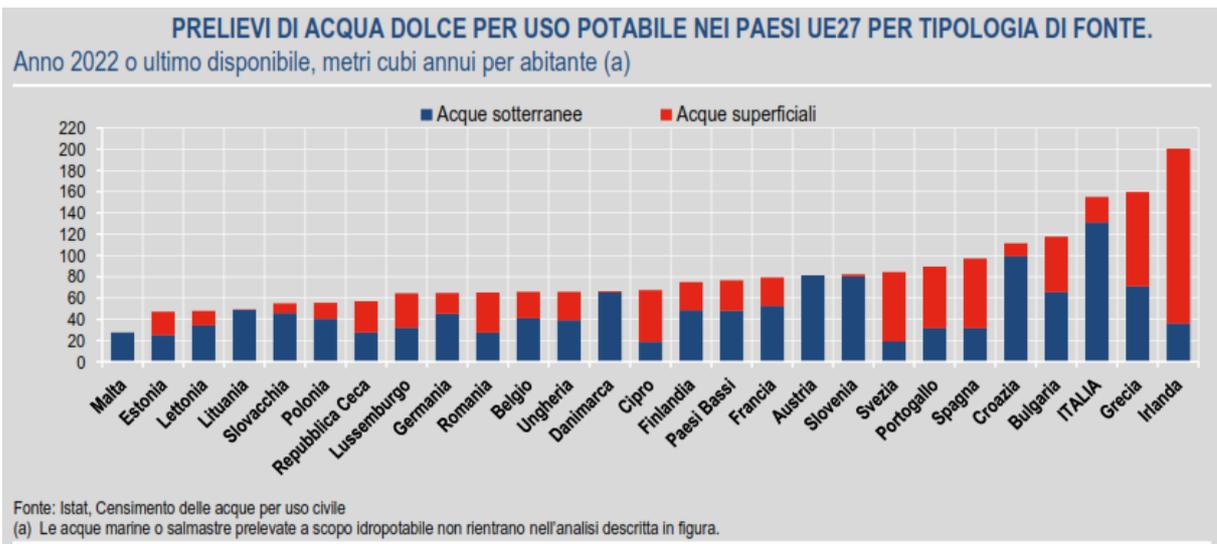


Figura 13: Grafico sull'andamento dei prelievi di acqua per scopi potabili all'interno dell'Unione Europea.

(Fonte: Report 2020-2023 ISTAT)

Ogni giorno vengono prelevati 25 milioni di metri cubi, equivalenti a 424 litri per abitante, da 37400 fonti di approvvigionamento di acqua potabile presenti sul territorio italiano, principalmente dai distretti idrografici del fiume Po e dell'Appennino meridionale [ISTAT, 22 marzo 2024]. Solo lo 0.1% di quello che è stato prelevato viene distribuito all'estero, verso la Francia e la Repubblica di San Marino [ISTAT, 22 marzo 2024]. In Italia, il prelievo dalle acque sotterranee, quindi da pozzi e sorgenti, è ampiamente diffuso, seguito da una bassa percentuale dalle acque superficiali e da una minima parte dalle acque marine o salmastre utilizzate solamente per far fronte alle carenze idriche. A seconda del tipo di fonte, ogni regione o zona territoriale è caratterizzata da differenti valori percentuali di prelievo.

Secondo il report ISTAT, *“Il volume di acqua prelevato per uso potabile si riduce all'ingresso del sistema di distribuzione per le perdite di processo nel trattamento di potabilizzazione, per le dispersioni nella rete di adduzione e per i volumi adottati all'ingrosso per usi non civili (agricoltura e industria). Nel 2022, sono immessi nelle reti comunali 8,0 miliardi di metri cubi di acqua per uso potabile (371 litri per abitante al giorno). I volumi immessi giornalieri pro-capite variano molto a livello regionale”*. Agli utenti finali viene erogata solamente un volume d'acqua complessivo di 4.6 miliardi di metri cubi, corrispondenti a 214 litri per abitante al giorno (*“36 litri in meno del 1999”*), a causa delle perdite nella rete di distribuzione (come riportato in Figura 14) [ISTAT, 22 marzo 2024]. Il volume erogato presenta un andamento decrescente negli ultimi vent'anni grazie al crescente utilizzo consapevole della risorsa idrica da parte dei cittadini. È stato possibile ottenere tale risultato grazie alle campagne di informazione sulla riduzione dei consumi da parte di molti gestori, alle limitazioni imposte a

causa dell'emergenza idrica in alcuni territori e la diffusione di sistemi di monitoraggio dei consumi.

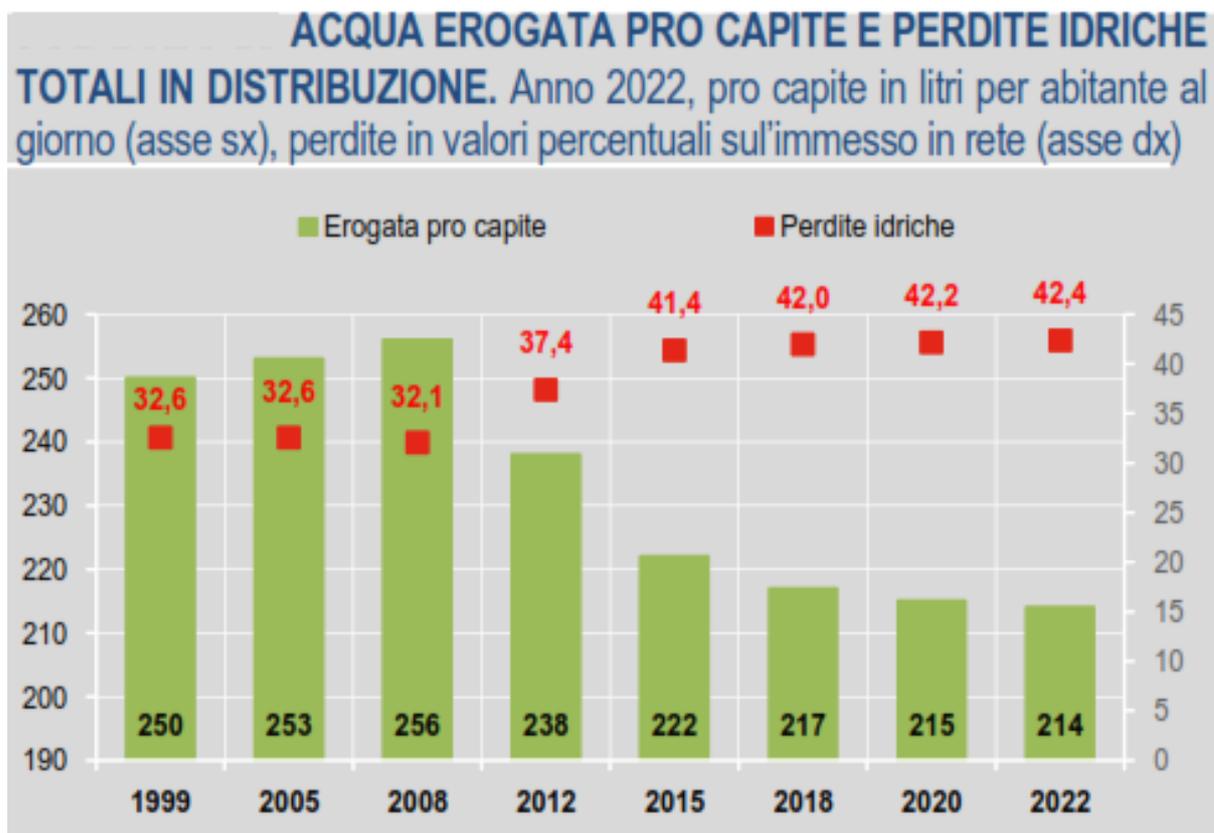


Figura 14: Grafico sull'andamento della quantità d'acqua erogata e della percentuale delle rotture idriche nella rete di distribuzione.

(Fonte: Report 2020-2023 ISTAT)

Nel 2022, l'ISTAT ha registrato nella rete di distribuzione un volume complessivo di fuoriuscite idriche di 3.4 miliardi di metri cubi, corrispondenti il 42.4% della quantità di acqua circolante nella rete idrica [ISTAT, 22 marzo 2024]. Questo valore può essere quantificato in 157 litri al giorno per abitante e rappresenterebbe il fabbisogno idrico di "43.4 milioni di persone per un intero anno" [ISTAT, 22 marzo 2024]. Purtroppo, il volume delle perdite è lievemente in continuo aumento, rispetto al 2018 si è registrato un più 2%, dovuto al permanente stato d'inefficienza della rete, nonostante negli ultimi anni molti gestori del servizio idrico hanno portato dei miglioramenti nella misurazione dei consumi e nel ridurre le perdite idriche [ISTAT, 22 marzo 2024].

Secondo il Fondo Ambiente Italiano, FAI, la quantità di perdite è fortemente legata all'età dell'intera rete acquedottistica che misura una lunghezza complessiva di 425 mila km, e con gli allacci raggiunge i 500 mila km. "Il 60% della rete nazionale è stato posato oltre 30 anni fa e il 25% supera anche i 50 anni. Ma il tasso nazionale di rinnovo è pari a 3.8 metri di condotte

per ogni km di rete: significa che a questo ritmo occorrerebbero oltre 250 anni per sostituire l'intera rete" [FAI, -].

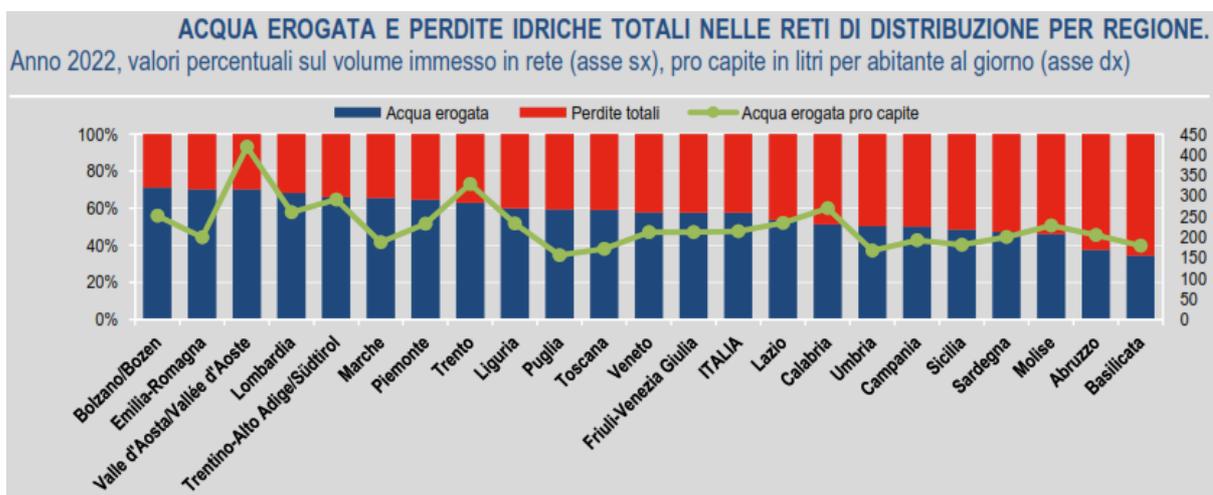


Figura 15: Grafico sull'andamento dei valori di acqua erogata e delle perdite idriche per ogni regione.

(Fonte: Report 2020-2023 ISTAT)

Si può notare, nella Figura 15, come l'andamento dell'acqua erogata e quello delle perdite varino per ogni regione, in particolare le situazioni più critiche si registrano nelle aree del Centro e in quelle del Mezzogiorno dove hanno valori di perdite più alti rispetto alla media nazionale; al Nord si hanno valori generalmente inferiori alla media nazionale.

Il report riporta anche il quantitativo di perdite idriche registrate nelle reti di distribuzione dei capoluoghi di provincia e città metropolitane, equivalente a 0.8 miliardi di metri cubi di acqua, cioè, il 35.2% del volume entrante in rete [ISTAT, 22 marzo 2024]. A partire dal 2018 queste perdite hanno subito una diminuzione, grazie all'aumento degli investimenti da parte dei gestori idrici rispetto ad altri comuni [ISTAT, 22 marzo 2024].

Inoltre, facendo riferimento all'anno 2023, il report comunica anche i dati relativi alla percentuale di soddisfazione del servizio di approvvigionamento idrico comunale da parte delle famiglie che è pari a 86.4% [ISTAT, 22 marzo 2024]. Il dato è molto variabile a livello territoriale e tra nord e sud del Paese. Circa il 70% delle persone di almeno 14 anni afferma di cercare di limitare lo spreco di acqua; il 28.8% delle famiglie affermano di non sentirsi sicuri di bere acqua di rubinetto [ISTAT, 22 marzo 2024]. Questo dato è molto diminuito rispetto al 2002 che contava il 40.1% [ISTAT, 22 marzo 2024]. Le persone con almeno 14 anni che dichiarano di essere preoccupate degli effetti dei cambiamenti climatici e/o dell'effetto serra contano il 70.8%, soprattutto per quanto riguarda l'inquinamento delle acque e il dissesto idrogeologico [ISTAT, 22 marzo 2024].

### **3.3 La situazione nell'Unione Europea sulle perdite idriche**

Il problema delle perdite idriche si estende anche all'interno del territorio europeo e in molte aree del mondo, che si aggiunge a quello della carenza di acqua nelle fonti di approvvigionamento e quello dello stress idrico.

*“Le perdite idriche variano notevolmente nell'UE: si va da meno del 5% a oltre il 50% dell'acqua prelevata che va persa. A riportarlo è una comunicazione della Commissione Europea riguardante la necessità di affrontare la sfida della carenza idrica e della siccità nell'Unione europea”* [Balocchi, 2 febbraio 2023].

Secondo la Federazione Europea delle Associazioni Nazionali dei Servizi Idrici, EurEau, *“le perdite idriche si devono attribuire all'età e allo stato della manutenzione del sistema”*. Si aggiungono altre cause come *“la lunghezza totale della rete, il numero di connessioni, i diversi sistemi idraulici nazionali e la topografia locale e quindi le caratteristiche idrauliche e pressorie”*, gli aspetti territoriali e climatici di una zona, il prezzo dell'acqua al momento dell'erogazione, e alle strategie in atto per la gestione dei guasti idrici [Balocchi, 2 febbraio 2023].

Un articolo pubblicato da National Geographic del 6 dicembre 2022 ha riportato, in seguito allo studio svolto dall'idrologo canadese Jay Famiglietti e dei suoi collaboratori, come *“la perdite media complessiva di acqua in Europa è di circa 84 miliardi di tonnellate l'anno dall'inizio del XXI secolo”*. Facendo una classifica degli stati europei in termini percentuali di fuoriuscite, Romania e Italia (42%), Irlanda (54%) e Bulgaria (64%) sono i Paesi con i tassi più elevati; al vertice della classifica del *“minor spreco”* ci sono Paesi Bassi (5%), Germania (6%), Danimarca (8%), Estonia (12%), Finlandia (17%), Repubblica Ceca (18%), Francia (20%), Belgio e Svezia (21%), Spagna e Regno Unito (23%) [Monaci S., 17 febbraio 2024]. A questo problema si lega anche quello legato alla scarsità dell'acqua, soprattutto nelle falde acquifere, e l'aumento di questo fenomeno è causato dal fatto che l'approvvigionamento idrico pubblico supera il tasso di ricarica naturale.

### **3.4 Normativa di riferimento sulle perdite idriche**

La *Legge Galli del 5 gennaio 1994* introduce il *Servizio Idrico Integrato* con lo scopo di servire una certa porzione di territorio definita Ambito Territoriale Ottimale (ATO), ed è composto da tutti quei servizi pubblici di attingimento, trasporto e distribuzione dell'acqua per scopi civili, e per la raccolta e depurazione di acque reflue e quelle per gli usi industriali. Tutti questi servizi devono essere gestiti con efficienza tecnica, efficacia ed economicità rispettando le norme nazionali e comunitarie, inoltre ha il compito e il dovere di salvaguardare la risorsa idrica in ogni sua fase. La gestione del Servizio Idrico Integrato è affidata a imprese pubbliche, private

o miste. Questa legge riporta alcune norme in materia di perdite idriche, come l'articolo 5 relativo al risparmio idrico:

*“Il risparmio della risorsa idrica è conseguito, in particolare, mediante la progressiva estensione delle seguenti misure: a) risanamento e graduale ripristino delle reti esistenti che evidenziano rilevanti perdite. [ ]. Adottato un regolamento per la definizione dei criteri e del metodo in base ai quali valutare le perdite degli acquedotti e delle fognature”* [Gazzetta Ufficiale, 5 gennaio 1994].

In aggiunta, nell'articolo 8 comma 8.2.9 viene citato che *“il gestore deve garantire un servizio continuo sia giornaliero che annuale, eccetto nei casi di manutenzione o di riparazione programmate e in quelli definiti di forza maggiore”*. Comunque, deve assicurare i livelli minimi di servizio, come la sua rintracciabilità ogni ora del giorno, lavori di primo intervento nelle prime 2 ore dalla segnalazione e la riparazione dei guasti ordinari in 12 o 24 ore in base al diametro della condotta [Gioia A., 2019].

L'articolo 149 comma 5 del *Decreto legislativo 3 aprile 2006 n. 152*, stabilisce le parti di cui si compone il *“piano d'ambito”*: analisi delle condizioni delle infrastrutture; piano degli interventi; programma finanziario; e piano di gestione dell'intero servizio verso le utenze. In più, all'articolo 162 al comma 1: il gestore del servizio idrico deve rendere trasparenti e accessibili le informazioni relative al servizio agli utenti in merito alle strumentazioni utilizzate, all'esercizio delle infrastrutture, sulla qualità e quantità delle acque erogate, inoltre deve diffondere la cultura dell'acqua.

Nel *Decreto Ministeriale 08 gennaio 1997, n. 99, “Regolamento sui criteri e sul metodo in base ai quali valutare le perdite degli acquedotti e delle fognature”*, riporta all'articolo 1 *“Oggetto ed ambito d'applicazione”* al comma 1:

*“Il presente regolamento, [ ], i criteri ed il metodo in base ai quali sono valutate le perdite degli acquedotti e delle fognature. Esso indica, altresì, la guida per la effettuazione delle rilevazioni e l'organizzazione del relativo sistema di monitoraggio nonché le regole per la stesura dei rapporti di cui [ ] il gestore trasmette al Ministero dei lavori pubblici”* [Normattiva, 8 gennaio 1997].

All'articolo 2 *“Valutazioni delle perdite”* definisce il concetto di *bilancio idrico* che i gestori devono eseguire:

1. *“Le procedure di valutazione delle perdite di cui al presente regolamento sono finalizzate alla formulazione di “bilanci idrici nelle reti e negli impianti”, sia nel loro complesso, sia in parte di essi, mediante la compiuta conoscenza dei volumi immessi nel sistema in un prefissato arco temporale e di quelli in uscita. Detti bilanci si fondano*

*su misurazioni di portate, o su stime per quelle non misurabili, integrati in un determinato tempo di osservazione. La stima delle portate non misurabili è effettuata con livelli di attendibilità progressivamente crescenti, mediante l'attuazione, anche con gradualità, di opportuni adeguamenti strutturali dei sistemi di acquedotto e fognature esistenti, al fine di rendere il più possibile obiettivo e certo il metodo di controllo dei volumi in entrata e in uscita. [ ].*

2. *In via transitoria il gestore è tenuto comunque ad effettuare una stima delle perdite, qualora non siano misurabili, anche basate su opportuni sistemi periodici di lettura e fatturazione.*
3. *La conoscenza dei volumi che concorrono alla formazione dei bilanci idrici è quanto più possibile disaggregata per componenti e per zone, al fine di rendere più puntuale la conoscenza dell'entità e della distribuzione delle perdite, anche attraverso la determinazione di appropriati indici di funzionalità e di disservizio [ ].*
4. *In dipendenza dell'esito dei bilanci, il gestore procederà ad una appropriata e specifica "campagna di ricerca delle perdite" per provvedere alle necessarie riparazioni. [ ]."*

[Normattiva, 8 gennaio 1997]

All'articolo 3 "Rapporti annuali":

*"Il gestore trasmette annualmente al Ministero dei lavori pubblici - Osservatorio dei servizi idrici, entro il mese di febbraio appositi rapporti [ ] indicanti i dati sui volumi d'acqua degli impianti di acquedotto e di fognatura nonché il valore dei parametri di valutazione delle perdite"* [Normattiva, 8 gennaio 1997].

All'articolo 4 "Norma transitoria":

1. *"Nella convenzione tra gli enti locali di cui all'articolo 9 della legge n. 36/1994 ed i soggetti gestori sono indicati tempi, modalità ed oneri per adeguare le reti e gli impianti esistenti, ai fini della valutazione delle perdite in conformità alle prescrizioni del presente regolamento"* [Normattiva, 8 gennaio 1997].

Questo decreto ministeriale del '97 aveva introdotto alcune novità in merito alla distrettualizzazione della rete, al bisogno di disporre di misure affidabili, indicazioni al gestore per ridurre le perdite, come la posizione dei contatori di misurazione nella rete di distribuzione, e per la valutazione dei consumi superiori al fabbisogno richiesto. Questa norma non specifica la percentuale di volumi d'acqua che possono non essere recuperati da parte del gestore, perché considerate economicamente poco vantaggiose. Questo valore è stato definito all'interno del *Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri (DPCM) del 4 marzo 1996*, dove attribuisce alle reti di adduzione e di distribuzione un valore percentuale di perdite non superiori del 20%,

nel caso fosse maggiore bisognerà eseguire interventi di manutenzione entro un adeguato periodo di tempo [Gioia A., 2019].

Oltre a questi riferimenti normativi, un gestore idrico deve anche conseguire gli obiettivi di ARERA, Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente, in materia di qualità tecnica con *“l’obiettivo di migliorare l’impatto sull’ambiente e la continuità e sicurezza del servizio reso agli utenti”*, attraverso investimenti e interventi di potenziamento del servizio idrico integrato [ARERA, -]. In seguito alla *delibera 917/2017/R/idr del 27 dicembre 2017*, ARERA ha stabilito 7 macro-indicatori per analizzare le prestazioni dei gestori idrici nel migliorare il proprio servizio, con lo scopo di verificare il rispetto degli obiettivi prestabiliti, viste anche le necessità di contrastare il cambiamento climatico. La loro misurazione comporta, in base ai risultati ottenuti, l’assegnazione di premi e penalità. I macro-indicatori riferiti agli acquedotti sono: M0 resilienza idrica, M1 perdite idriche, M2 interruzioni di servizio e M3 qualità acqua erogata.

*“La salvaguardia delle risorse idriche e la gestione [ ] dei servizi idrici rientrano anche tra gli obiettivi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)”*, che offre l’opportunità di rendere il sistema idrico italiano più efficace, efficiente e sostenibile, specialmente in quei territori soggetti a maggiori situazioni di criticità idrica [ISTAT, 22 marzo 2024]. Recentemente, il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ha stanziato un miliardo di euro dei fondi del PNRR per risolvere i guasti idrici lungo le reti di distribuzione, l’inserimento di sistemi di monitoraggio avanzati e la digitalizzazione della rete stessa. Purtroppo, le risorse messe a disposizione non bastano a risolvere del tutto il problema e per avere un sistema acquedottistico paragonabile con quelli del resto d’Europa.

#### **4. Metodi di ricerca delle perdite idriche**

La ricerca e la riparazione di guasti alla rete idrica, in particolare la loro prevenzione, assumono un ruolo fondamentale nella gestione del servizio di approvvigionamento d’acqua e, con l’aiuto della tecnologia, è possibile contrastare questo problema e conseguentemente aumentare l’efficienza del servizio fornito verso le utenze. Inoltre, anche la velocità nell’individuare e riparare una rottura nella condotta è molto importante, perché il volume di acqua perso da questa è dato dal prodotto tra la portata dell’acqua che transita nel tubo e il tempo che trascorre tra la formazione della rottura e la sua riparazione.

Le perdite idriche apparenti possono essere gestite sostituendo i contatori delle utenze e i misuratori di portata e pressione malfunzionanti, riducendo gli allacci abusivi e controllando i consumi autorizzati ma non contabilizzati. Mentre, quelle reali possono essere ridotte ispezionando frequentemente la rete di distribuzione con l’impiego di diverse metodologie di

ricerca, e garantendo una velocità e qualità della riparazione a seconda dell'entità del danno. Infatti, per scoprire una fuoriuscita d'acqua si utilizzano strumenti di rilevamento di vario genere che permettono di individuare il punto esatto o approssimativo della rottura nella condotta, così da procedere subito con i lavori di riparazione e quindi il ripristino del servizio idrico alle utenze. Questi metodi, sostanzialmente, si suddividono in quattro categorie:

- strumenti acustici, utilizzati da un operatore specializzato:
  - geofono;
  - aste geofoniche;
  - correlatore acustico.
- strumentazione di misurazione, che segnalano la presenza di eventuali problemi alla rete in presenza di particolari variazioni nelle misurazioni:
  - misuratore di portata;
  - misuratore di pressione;
  - contatori d'acqua intelligenti.
- altri metodi di ricerca utilizzati in campo sono:
  - gas tracciante;
  - metodo del consumo zero.
- metodi computerizzati, costruiti appositamente per una certa rete idrica per garantire una maggiore gestione e controllo:
  - distrettualizzazione;
  - modellazione;
  - sistemi di supporto alle decisioni.

#### **4.1 Strumenti acustici**

Gli strumenti acustici sfruttano il fatto che una rottura nella condotta produce un certo suono che si può propagare orizzontalmente nella tubazione e verticalmente nel terreno; la sua entità dipende dalla *“pressione di esercizio, dal materiale, dal tipo di frattura, dalla distanza tra punto di ascolto e perdita, e dall'ambiente esterno”* [Reinaud L., 2023]. Combinando e variando queste caratteristiche si possono ottenere dei rumori diversi, che possono facilitare o meno la localizzazione della perdita che gli genera.

##### **4.1.1 Geofono**

Il geofono è uno strumento che impiega il principio di ascolto indiretto delle vibrazioni del rumore che si propagano nel terreno per rilevare la presenza di una perdita idrica.

Per utilizzare questo strumento è molto importante conoscere la planimetria della rete di distribuzione, in quanto questo tipo di ricerca prevede di appoggiare lo strumento di ascolto sulla superficie stradale sopra alla condotta da analizzare, e di rilevare il rumore, quello di massima intensità, generato dalla perdita (come mostrato in Figura 16). In questa fase, bisogna tenere conto che la velocità di propagazione del suono dipenderà dal materiale della tubazione e dalla tipologia di terreno in cui è stata posata. Il suono ascoltato viene amplificato per essere inviato alle cuffie dell'operatore e allo stesso tempo, trasmesso ad uno schermo che gli permette di visualizzarne l'intensità e di capire qual è il punto preciso in cui è avvenuta la perdita.



Figura 16: Esempio di applicazione del geofono.

(Fonte: campagnasrl.com)

Esistono due tipologie di geofoni: quello *“meccanico, senza amplificazione e filtrazione del rumore,”* e quello *“elettroacustico, dotati di microfono che capta il rumore direttamente sulla superficie del terreno”* [Reinaud L., 2023].

I vantaggi nell'utilizzare il geofono per l'individuazione delle perdite idriche sono i seguenti:

- è in grado di individuare con precisione il punto dove è avvenuta la perdita;
- riduce i tempi di intervento nella riparazione del guasto;
- permette di individuare le perdite prima che queste generino danni importanti, così da ridurre i costi di riparazione e quelli di manutenzione;
- è uno strumento veloce ed efficiente da utilizzare, e facile da trasportare.

Invece, gli svantaggi sono:

- richiede un operatore qualificato con esperienza per evitare di commettere errori di interpretazione del suono;
- presenza di elementi di disturbo, come profondità di posa della condotta e rumori esterni;
- difficoltà nell'avere un ambiente silenzioso.

#### 4.1.2 Aste geofoniche

Le aste geofoniche sono strumenti ad ascolto diretto che posizionati a contatto con la tubazione della rete di distribuzione oppure su altri dispositivi idraulici (come valvole e saracinesche), permettono di rilevare il rumore causato dalla perdita idrica.

Esistono due tipologie di apparecchi: quelli meccanici e quelli elettroacustici (come mostrato di seguito in Figura 17). Il primo è formato “da un puntale metallico collegato ad una membrana avente funzione di amplificazione meccanica delle vibrazioni captate dal tubo”, su cui l'operatore appoggia il suo orecchio [Reinaud L., 2023]. Mentre, il secondo tipo è composto “da un accelerometro (un sensore in grado di misurare l'accelerazione) collegato ad un puntale metallico ed ad un amplificatore” del suono a batterie collegato alle cuffie dell'operatore e da uno schermo per visualizzare la potenza, di regolare la frequenza e di registrare rumori ascoltati recentemente [Reinaud L., 2023].

Come per il geofono, permette di arrivare al punto dove si è verificata la rottura seguendo gradualmente l'aumento dell'intensità del rumore.



Figura 17: A sinistra l'asta geofonica di tipo meccanica; a destra quella elettroacustica.

(Fonte: pipelinestore.it; ricercaperdita.it)

Le aste geofoniche vengono di solito impiegate nelle prime fasi di ricerca delle perdite idriche, per poi utilizzare strumenti più precisi, come geofoni e correlatori acustici, per individuare il punto esatto in cui si trovano.

I vantaggi nell'utilizzare questo strumento sono:

- aiuta a ridurre l'area di ricerca della perdita idrica;
- i modelli elettroacustici hanno una ottima praticità;
- è caratterizzato da una buona trasmissione del rumore.

Un problema di questo strumento, oltre a quelli riscontrati con il geofono, è quello di aumentare i tempi di individuazione di una rottura nell'intera rete idrica.

Le aste geofoniche e il geofono sono strumenti diversi, ma entrambi molto utilizzati nella ricerca delle perdite. Il primo viene messo a contatto con le valvole della rete idrica, mentre il secondo viene appoggiato sul terreno e non sulla tubazione.

#### **4.1.3 Correlatore acustico**

Il correlatore acustico è uno strumento elettroacustico utilizzato per individuare con maggiore precisione la posizione delle perdite idriche nella rete di distribuzione tramite il rumore emesso dalla rottura stessa. Per farlo utilizza le tre proprietà che caratterizzano il suono di una perdita: è aleatorio, ovvero il suo sviluppo nel tempo non segue nessuna regola; la velocità di propagazione è uguale da entrambi i versi; ha un carattere permanente, che lo differenzia dagli altri rumori.

Lo strumento acustico (come mostrato in Figura 18) si compone di: due o più sensori oppure microfoni ad alta sensibilità posizionati ad una certa distanza tra loro all'interno dei pozzetti dello stesso tratto di condotta, di un amplificatore del segnale elettrico e di una unità principale, detta correlatore, gestita dall'operatore che osserva i segnali. I sensori possono essere a contatto con la tubazione, detti accelerometri, oppure con l'acqua, detti idrofoni. Entrambi permettono di intercettare il rumore prodotto dalla perdita che si propaga lungo la tubazione. Appena viene sentito il suono, l'unità principale *“conoscendo la lunghezza della tubazione tra i due sensori, il materiale e il diametro della tubazione”*, analizza il tempo di propagazione del rumore che si è generato e calcola il punto esatto dove è avvenuta la perdita idrica [Reinaud L., 2023]. Affinché questo avvenga, la condotta deve essere costantemente in pressione e priva di aria al suo interno.

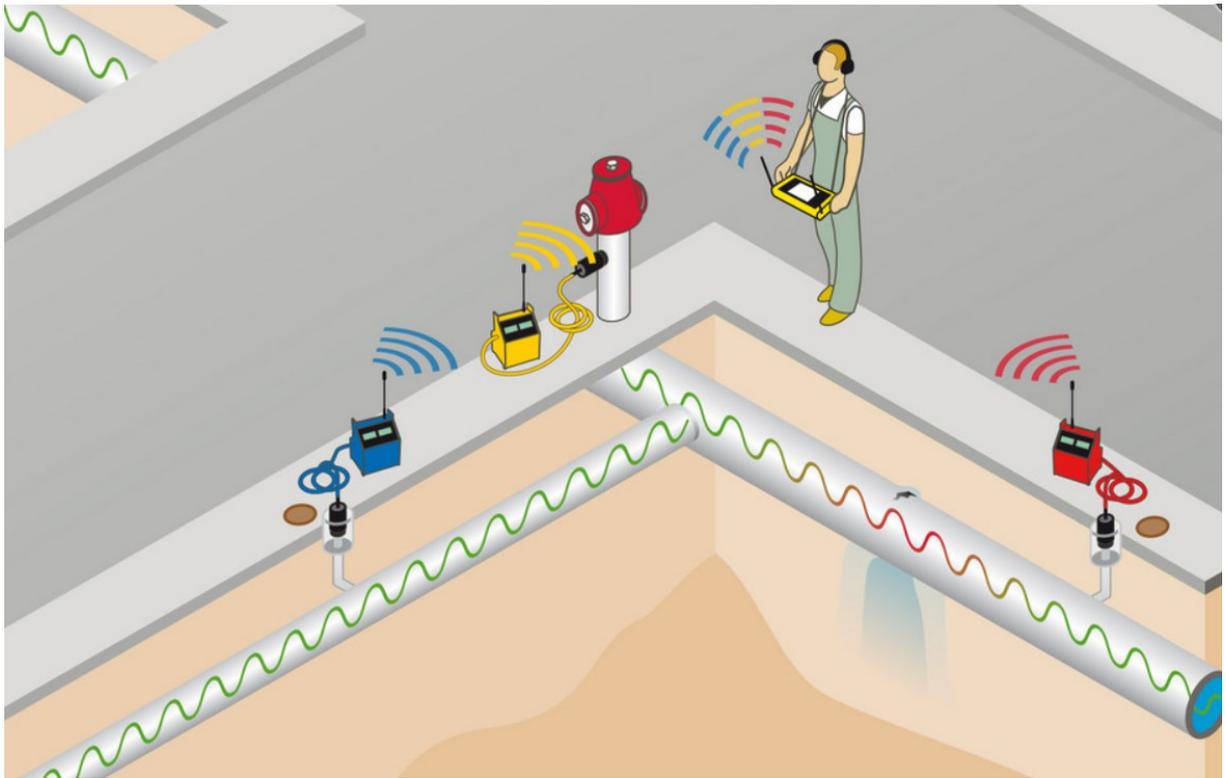


Figura 18: Esempio di applicazione del correlatore acustico dotato di più sensori.

(Fonte: it.trotec.com)

Vantaggi nell'utilizzare il correlatore acustico, sono i seguenti:

- garantisce una ottima efficacia e velocità nella ricerca delle perdite;
- consente un monitoraggio continuo della rete idrica;
- facilita le operazioni di ritrovamento di nuove rotture;
- permette di risparmiare quantità d'acqua immessa in rete;
- è molto utile nel caso di una rete soggetta a frequenti rotture.

Invece, gli svantaggi sono:

- difficoltà nella distinzione dei rumori relativi ad una perdita e quelli di sottofondo.

Il correlatore acustico può essere impiegato anche in modalità fissa, come nel caso della rete di Annone di Brianza, per avere maggiori vantaggi nella gestione dei guasti. Infatti, in questa rete sono stati installati dei contatori acustici statici nei pozzetti, in grado di captare i suoni generati da una perdita idrica. Tale metodo funziona esattamente come il correlatore acustico "mobile", solamente che permette di controllare costantemente la presenza di guasti nella rete di distribuzione. Questa metodologia impiega anche i contatori delle diverse utenze per eseguire una prelocalizzazione del guasto.

## 4.2 Strumenti di misurazione

### 4.2.1 Misuratore di portata

Il misuratore di portata, come dice il nome stesso, serve per misurare la portata che circola all'interno delle condotte idriche di una rete di approvvigionamento.

Lo strumento viene installato ripetutamente lungo l'intera linea della condotta con lo scopo di segnalare una perdita, data dalla differenza tra la portata rilevata a monte e quella a valle del tratto della tubazione in cui è avvenuta. In caso di segnalazione, la circolazione all'interno del medesimo tratto viene automaticamente interrotto tramite valvole, e viene inviata una comunicazione elettronica alla squadra di pronto intervento del gestore competente che gli informa del punto esatto dove è avvenuta la perdita per procedere al ripristino della condotta.



Figura 19: A sinistra il misuratore di portata ad ultrasuoni; a destra quello elettromagnetico.

(Fonte: arwmisure.it; tecnovaht.it)

Esistono diverse tipologie di misuratori di portata fissi o portatili dotati di tecnologie innovative. Essi possono essere: ad ultrasuoni o elettromagnetici (come quelli di Figura 19). I primi sono capaci di misurare la portata volumetrica in base alla differenza del tempo di transito delle onde ultrasonore di andata e di ritorno misurate tra due trasduttori montati esternamente al tubo. Quest'ultimi funzionano "sia da generatori di segnale che da ricevitori e sono in comunicazione acustica tra loro" [Selemark, -]. Lo strumento può anche disporre di un display wireless per osservare i risultati di misura e può essere dotato di trasmettitore. Inoltre, permette di misurare la portata dall'esterno della condotta senza interrompere il flusso d'acqua,

nemmeno durante la sua installazione, e possono essere del tipo fissi oppure *Clamp-on*, cioè, attaccati esternamente alla tubazione. Quest'ultima tipologia è molto impiegata e offre molti vantaggi, come bassi costi e rapidi tempi di installazione e consentono di eseguire una misurazione continua per qualsiasi valore di pressione interna; si distinguono in fissi, mobili oppure in misuratori di controllo.

I misuratori elettromagnetici misurano la portata volumetrica dell'acqua con maggior precisione e funzionano seguendo la legge dell'induzione elettromagnetica. Ovvero, nel *"misuratore viene generato un campo magnetico ed incanalato nel liquido che scorre all'interno del corpo. Secondo la Legge di Faraday la portata di un fluido conduttore dentro il campo magnetico genera una differenza di potenziale di Volts che è raccolta dagli elettrodi sulle pareti del tubo. [ ] Il voltaggio generato è proporzionale al movimento del fluido e il microprocessore trasforma la differenza di potenziale in portata volumetrica attuale"* [Tecnova HT S.r.l.,-]. Questo strumento, a differenza di quello ad ultrasuoni, viene inserito tra le condotte con l'interruzione del servizio.

Vantaggi nell'utilizzare un misuratore di portata, sono i seguenti:

- garantisce elevate precisioni nelle misure;
- consente di registrare, memorizzare e visualizzare i dati di misura da remoto.
- le tipologie portatili o mobili non necessitano di interrompere il flusso d'acqua durante la loro installazione;
- può anche calcolare la velocità media del flusso d'acqua per garantire un'alta qualità;
- può non avere il bisogno di essere alimentato da fonti esterne.

Invece, gli svantaggi sono:

- i misuratori fissi di portata non sono ideali nel caso si debba eseguire una loro manutenzione e quando bisogna svolgere delle misurazioni temporanee;
- i misuratori elettromagnetici sono particolarmente costosi.

Un esempio di applicazione di questo strumento è quello del telecontrollo, che permette ai gestori idrici di monitorare da remoto le portate in entrata e quelle di uscita dalla rete, e di osservare eventuali anomalie e perdite. Più precisamente, viene realizzato un software adattato alla rete idrica del gestore che gli consente di monitorarla e di gestire i guasti. Inoltre, aiuta nel valutare la qualità dell'acqua, così da garantire un coretto trattamento delle caratteristiche organolettiche.

#### 4.2.2 Misurazione delle pressioni

I misuratori di pressione sono strumenti dotati di sensori con il compito di registrare e monitorare costantemente la pressione interna alle condotte della rete idrica.

A seconda delle necessità, esso può controllare questa variabile attraverso una valvola di regolazione, così da avere un valore ottimale in tutto l'impianto che varierà in base all'area, alla differenza di quota e ai consumi. Inoltre, permette di abbassare la pressione durante la notte dove c'è un basso utilizzo di acqua potabile, proteggendo le condotte e i vari collegamenti soggetti a forti picchi di pressione, riduce la frequenza della presenza di nuove rotture, riduce i volumi di acqua persi e garantisce una ottima qualità di servizio agli utenti serviti dalla rete. I misuratori di pressione funzionano secondo il metodo induttivo magnetico, ovvero, un convertitore di segnale collegato allo strumento produce una corrente per alimentare una bobina magnetica, che a sua volta crea un campo magnetico alternato e genera una tensione uguale alla velocità del flusso d'acqua, dopodiché il convertitore elabora il segnale per calcolare la portata e lo comunica ai sistemi di controllo esterni.



Figura 20: Condotta idrica con misuratore di pressione.

(Fonte: pipecare)

Come nei misuratori di portata, anche questi strumenti possono essere fissi oppure portatili (Figura 20), e sono molto utili durante le operazioni di manutenzione regolare. Possono essere montati con la funzione *hot tapping*, perforazione del tubo sotto pressione, ovvero senza

sospendere il servizio idrico, senza considerare le caratteristiche della condotta e in modo rapido e semplice.

Vantaggi nell'utilizzare questo strumento sono i seguenti:

- permette di abbassare la pressione in modo tale da diminuire automaticamente le perdite di acqua;
- può essere installato anche in spazi ristretti, utilizzando dei piccoli misuratori di portata dotati di trasmettitori per trasmettere i dati a distanza;
- regola la pressione interna a seconda dell'orario giornaliero;
- consente di eseguire misure da remoto;
- garantisce elevate precisioni e velocità di misura, anche quando il flusso è relativamente basso o nel caso di variazione di esso;
- consente di suddividere la rete in distretti.

Un sistema simile a questo è quello *Wlm-System*, ovvero una piattaforma software che impiega l'intelligenza artificiale per esaminare tutti i dati registrati e cercare la formazione di eventuali perdite idriche. È costituito da una serie di misuratori installati sulla rete in grado di registrare simultaneamente anche altri parametri, come il rumore e la temperatura.

#### **4.2.3 Contatori d'acqua intelligenti**

I contatori d'acqua intelligenti sono di tipo a ultrasuoni (come quello di Figura 21) e costituiscono la nuova generazione delle misurazioni intelligenti, che attraverso i dati rilevati dalla rete di distribuzione permettono di ridurre gli sprechi, di garantire un utilizzo più responsabile e sostenibile dell'acqua, e di gestire efficacemente la sua erogazione.



Figura 21: Contatore d'acqua intelligente.

(Fonte: Giornale Padovaoggi)

Utilizzando questa tipologia di contatori, si può creare una rete fissa di comunicazione a lungo raggio per svolgere da remoto una serie di operazioni, come la lettura in tempo reale dei contatori stessi, raccogliere e osservare i dati registrati. Inoltre, la rete di contatori è dotata di sistemi di segnalazione in caso di anomalie e perdite.

La realizzazione di questa rete di contatori consente al gestore idrico di individuare la presenza di perdite nel sistema di distribuzione e decidere se bloccare o diminuire l'erogazione dell'acqua alle utenze, finché non sia stata riparata; permette, inoltre, di segnalare la presenza di tutti quei consumi d'acqua non fatturabile, come quella uscente dalle fontane, e degli allacci abusivi; può adattare il sistema di contatori alle proprie esigenze e aggiornarlo in cui ci sia un ampliamento alla rete idrica.

I vantaggi nell'installare un contatore intelligente sono i seguenti:

- permette di conoscere in tempo reale le condizioni della rete di distribuzione e di migliorare l'assistenza dei clienti;
- può captare acusticamente i guasti della rete di approvvigionamento;
- garantisce bassi costi di realizzazione e riduce i tempi di allestimento di tutte quelle apparecchiature presenti in altre tipologie di ricerca;
- eseguono le misure dei consumi con elevata precisione;
- può non essere alimentato da fonti esterne;
- consente di migliorare il servizio alle utenze garantendo anche una gestione individuale dell'erogazione di acqua.

Invece, gli svantaggi sono:

- richiede un operatore qualificato per l'installazione e programmazione del sistema di gestione della rete fissa;
- restituisce i valori delle misurazioni in ore oppure in giorni;
- nella formazione della rete fissa è necessario adoperare solo contatori intelligenti compatibili.

Un esempio di applicazione di contatori d'acqua intelligenti lo si ha con il gestore Etra SpA-Società benefit, la multiutility del bacino del Brenta, che da qualche anno ha iniziato una campagna di sostituzione dei vecchi contatori con quelli intelligenti, per raggiungere una gestione più sostenibile della risorsa idrica. *“Tali contatori verranno letti dagli operatori Etra tramite l'utilizzo di ricevitore radio collegato a uno smartphone o tablet in modalità walk-by (camminando) o drive-by (in macchina)”*, che gli permetterà di eseguire letture veloci e di individuare eventuali perdite idriche alla rete di distribuzione [ETRA S.p.A., -].

### 4.3 Gas tracciante

Il gas tracciante è un gas inerte inserito all'interno della condotta della rete idrica per individuare la presenza di perdite (come mostrato in Figura 22), in particolare dalle microfratture più complicate da rilevare con le altre tecniche di ricerca, come il geofono.



Figura 22: Ricerca della perdita idrica con il gas tracciante.

(Fonte: rilevaperdite.com)

Il gas utilizzato è una miscela inerte composta dal 5% di idrogeno e per il 95% di azoto [Analisi Termografiche, -].

Un problema di questo metodo riguarda la necessità di interruzione del servizio idrico, isolando il tratto di condotta da analizzare tramite la chiusura delle apposite valvole e rimuovendo la quantità d'acqua al suo interno. A questo punto, viene iniettata la miscela di gas al suo interno che, in presenza di una rottura, esce fino in superficie e viene rilevata con l'impiego di particolari strumenti.

Vantaggi che si hanno utilizzando il gas tracciante sono i seguenti:

- riesce a rilevare anche le micro-rotture nelle tubazioni;
- può attraversare tutti gli strati di terreno, anche cemento e asfalto;
- la miscela *“non è né tossica, né infiammabile, né corrosiva, né pericoloso per l'ambiente”* [Barnabo' S., -].

Invece, gli svantaggi sono:

- non è molto utilizzato, veloce e preciso;
- è molto costoso;
- richiede un operatore qualificato con esperienza;
- l'uscita del gas dipende dal tipo di terreno. Nel caso quest'ultimo sia argilloso può dare una posizione diversa da quella della perdita, al contrario con uno ghiaioso si ottiene una posizione più precisa.

#### **4.4 Metodo del consumo zero**

Il metodo del consumo zero prevede di individuare le perdite idriche mediante un apposito macchinario che alimenta una porzione isolata della rete di distribuzione tramite la chiusura di valvole, e di misurare la portata transitante all'interno di essa.

In particolare, questa tecnica consiste nel collegare un idrante situato esternamente al tratto isolato con uno all'interno. Analizzando in tempo reale l'andamento delle portate per circa 30 minuti, permette di osservare la presenza di eventuali perdite nella rete.

I vantaggi di questa tecnica sono i seguenti:

- consente di misurare la grandezza della perdita;
- ideale come metodo di prelocalizzazione dei guasti.

Gli svantaggi sono:

- necessita di cartografia della rete aggiornata;
- il tratto da analizzare deve essere dotato di idranti per collegarsi.

#### **4.5 Metodi computerizzati**

##### **4.5.1 Distrettualizzazione**

La distrettualizzazione consiste nel suddividere l'intera rete di distribuzione in microaree, dette distretti (come mostrato in Figura 23), monitorate da strumenti di misura e progettate secondo una serie di criteri stabiliti. Quest'ultimi sono:

- le condotte di adduzione non vengono considerate durante la progettazione dei distretti;
- il perimetro di ogni distretto viene definito in base all'andamento del tracciato della rete idrica, e a seconda della portata e dello stato delle condotte posizionate lungo il suo confine;
- il numero delle utenze servite è definito in modo tale che queste non generino una perdita superiore a 1 l/s e deve essere compreso tra le 1000 e le 3000 unità. Nella

realizzazione della grandezza del distretto bisogna tenere conto la necessità di limitare la quantità di saracinesche poste nel suo perimetro;

- la pressione ai nodi del distretto, nelle ore di punta, deve essere la stessa che è stata stabilita dalla carta dei servizi;
- in genere vengono realizzati distretti con un unico ingresso, detto *classico*, così da avere un continuo monitoraggio della portata e dei livelli di perdita nella rete, e di regolare la pressione. Nel caso questo non fosse possibile, tramite un modello calibrato della rete si decide se progettare distretti con due entrate dotate di misuratori oppure di modificare la rete appositamente per ottenere la configurazione con un ingresso. Questo dipenderà dal risultato dell'analisi costi-benefici;
- il distretto *classico* può contenere al suo interno anche un serbatoio di estremità. In genere in questo caso, non è possibile effettuare una regolazione delle pressioni e la portata deve essere monitorata anche all'ingresso e uscita del serbatoio;
- per utenze particolari, come aziende ospedaliere, penitenziari o aziende con cicli speciali, devono essere inserite in quei distretti con due ingressi, a meno che non siano dotati di un impianto interno con dotazione idrica autonoma e superiore alle 24 ore;
- il distretto *a cascata* si utilizza in presenza di reti di distribuzione molto estese che non possono essere servite da connessioni da condotte primarie. Questo metodo prevede un ingresso ed una uscita. Si impiega anche nel caso di reti dotate di serbatoi intermedi;
- le dimensioni e le caratteristiche dei misuratori di portata dipendono dalle portate ottenute dal modello calibrato della rete e dalle dimensioni delle condotte su cui verranno installati.

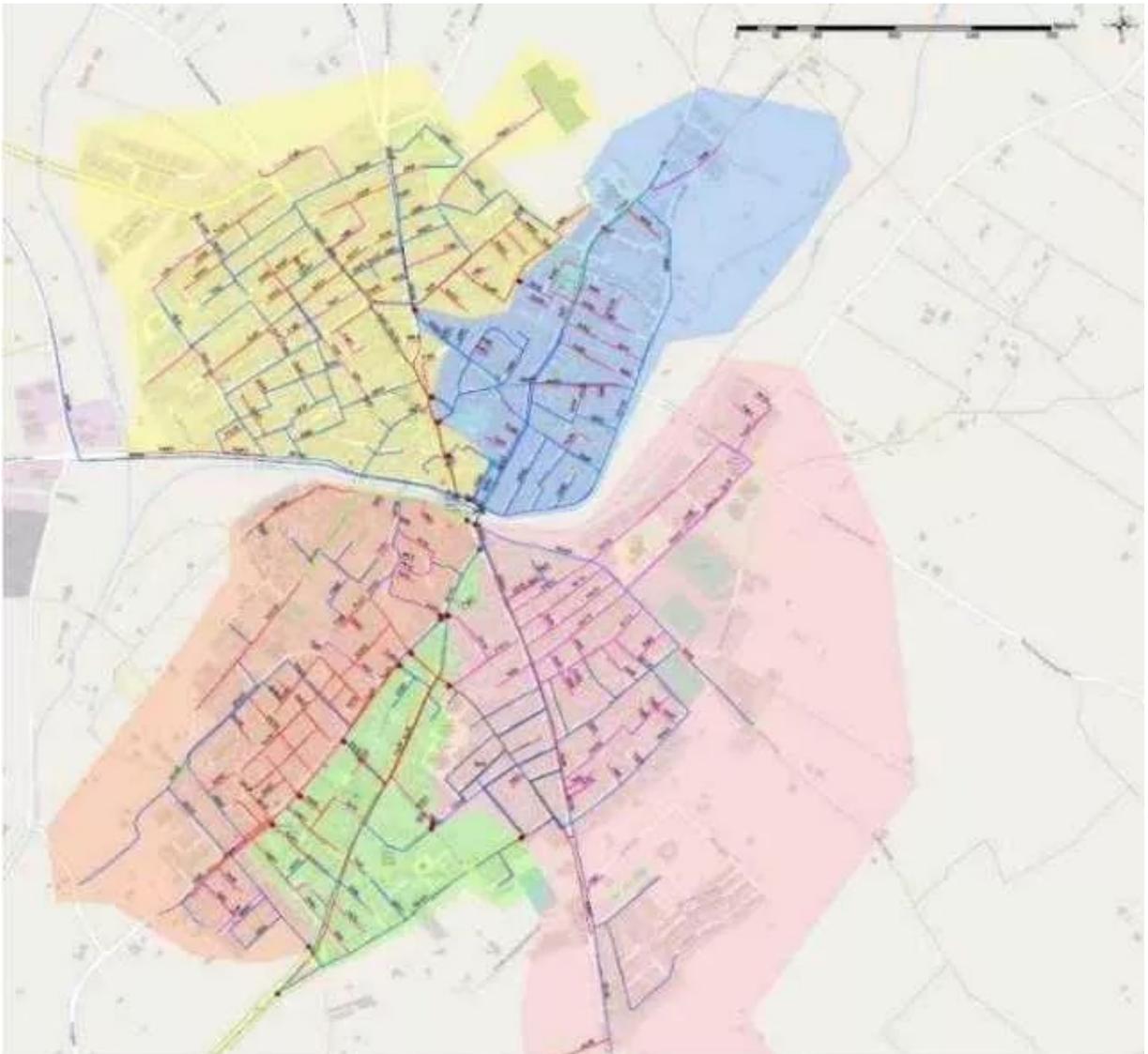


Figura 23: Esempio di suddivisione di un centro urbano in distretti.

(Fonte: youtg.net)

In ogni singola rete vengono installati dei misuratori fissi di portata e di pressione nei punti più importanti, con lo scopo di monitorarle continuamente. Perciò, il loro controllo è vantaggioso, perché a seconda della fascia oraria permette di verificare la presenza di eventuali perdite, soprattutto in quelle notturne. Infatti, in queste ore si registrano consumi d'acqua minimi dalle utenze e analizzando la presenza di grandi variazioni nei grafici sull'andamento delle portate in ingresso al distretto, indicano la presenza di un guasto alla rete; questa tecnica è definita analisi di passo. In caso di perdita, viene individuato subito il distretto interessato e si procede alle operazioni di localizzazione della rottura.

Questo metodo consente di quantificare velocemente il livello delle dispersioni che si verificano nel tempo, lo stato di salute della rete stessa, e il recupero idrico ed economico che si avrebbe dopo l'intervento di riparazione.

L'installazione di valvole per ridurre la pressione permetterebbe di ridurre le perdite, inoltre con la loro corretta disposizione e regolazione del grado di apertura delle valvole stesse permetterebbe di diminuire i problemi legati all'efficienza idraulica della rete.

Esistono due tipologie di distrettualizzazione: quella fisica oppure quella virtuale. La prima permette di gestire i distretti e la rete, attraverso la regolazione di valvole che porterebbero ad un cambiamento delle *“prestazioni idrauliche e della qualità dell'acqua”*, consentendo anche un maggior controllo delle perdite [Di Nardo A., Di Natale M, -]. Tali operazioni possono essere effettuate in base ai valori registrati dagli strumenti di misura di portata e pressione installati. Questa tipologia distrettuale non è molto affidabile ed efficace, perché riduce i collegamenti interni della rete e la qualità del servizio; è più difficile da attuare, perché bisogna effettuare una simulazione della rete per controllare le variazioni di funzionamento. Anche se, garantisce maggiori possibilità di gestione, fornendo la possibilità di regolare la pressione nelle ore di minor consumo e per proteggere le *“reti acquedottistica dalla contaminazione accidentale o intenzionale”* [[Di Nardo A., Di Natale M, -]. Invece, nel metodo virtuale si utilizzano solamente le apparecchiature di misura per gestire il sistema idrico senza modificare alcune sue funzionalità. Questo gli permette di conservare il comportamento a maglie, come definire i distretti e di monitorare di continuo le misure di portata e pressione, così da quantificare le perdite idriche a scala di macro-bacino e di valutarne la loro evoluzione temporale.

I vantaggi nell'applicazione di una distrettualizzazione sono:

- permette di esaminare le perdite idriche che si verificherebbero nella rete di ogni distretto, di programmare gli interventi di riparazione e di controllarne il risultato;
- gestire e controllare le pressioni interne alle condotte, per ridurre le perdite in base alle differenti necessità delle aree urbane da servire;
- consente una maggiore gestione, efficienza, controllo e monitoraggio dei parametri quantitativi e qualitativi della rete, e ne garantisce un corretto funzionamento;
- facilita i lavori di realizzazione di una possibile estensione della rete idrica;
- permette di agevolare il calcolo del bilancio idrico;
- protegge e limita gli effetti di una eventuale contaminazione dell'acqua da fonti esterne;
- ideale nel caso di una rete di distribuzione ad albero o ramificata.

Gli svantaggi sono:

- difficile da applicare nel caso di reti già progettate e realizzate, sia per motivi tecnici che per quelli economici e gestionali;
- complicato da realizzare nel caso di rete costituita da molti percorsi chiusi o a maglie.

Negli ultimi anni, sono state introdotte diverse tecniche per migliorare le procedure di distrettualizzazione di un sistema di approvvigionamento idrico. Esse permettono di definire la “*forma e la dimensione dei distretti basati su procedure diverse volte a ridurre il numero di collegamenti [ ] bilanciando il numero di nodi*”, e di selezionare i punti della rete dove si installeranno gli strumenti di misurazione di portata e di pressione, utilizzando metodi che consentono di minimizzare i costi e le condizioni delle tubazioni.

Un esempio pratico di distrettualizzazione della rete di distribuzione è quello realizzato da Nuove Acque, gestore idrico per la provincia aretina e parte di quella senese. Partendo dalla città di Arezzo hanno proceduto alla realizzazione di questo metodo di controllo delle perdite idriche suddividendo l'intera rete idrica in 60 distretti, ciascuno comprendente all'incirca 6 km [Frulli N., 3 agosto 2018]. Ognuno di questi distretti viene monitorato indipendentemente per analizzare le portate d'acqua erogate e l'andamento nel tempo dei consumi, in modo tale da individuare la presenza di perdite. Questo sistema permette al gestore di controllare anche le pressioni interne alla rete di approvvigionamento, così da poter migliorare il servizio all'utenza e ridurre al minimo gli sprechi.

#### **4.5.2 Modellazione**

La modellazione di una rete di distribuzione consente di controllare la rete di distribuzione esistente e di verificare scenari futuri di progetto.

In pratica viene realizzato un modello specifico per una determinata rete, dove vengono riportate le caratteristiche geometriche (come diametri, materiali e collegamenti) e idrauliche, riguardanti il funzionamento e la gestione di essa. Viene eseguita una calibrazione dei parametri del modello, ovvero si modificano i suoi valori per farlo combaciare con quanto avviene nella realtà. Perciò, si procede con la raccolta dei dati tramite GIS, *Geographic information system*, e si realizza la planimetria generale dell'intera area in cui si trova la rete. In questa si riportano le condotte principali di adduzione e distribuzione e tutti gli altri elementi di cui si compone l'impianto, come i serbatoi e le pompe. Successivamente, si aggiorna il progetto con le informazioni osservate e prese dai sopralluoghi, e dalle interviste fatte al personale tecnico. Infine, si procede alla sistemazione delle anomalie cartografiche riscontrate e si ricostruisce l'intero schema idraulico della rete per capire come essa funziona. Si prosegue realizzando il modello geometrico, quindi, si riporta la struttura della rete con tutti i suoi elementi (tubazioni, pozzetti, valvole e misuratori), si definiscono i vari parametri di *defaults* delle saracinesche, valvole, serbatoi e pompe, e si riportano i valori dei consumi fatturati. Si esegue una campagna di monitoraggio sulla rete esistente posizionando temporaneamente dei misuratori di portata e di pressione. Infine, si procede alla calibrazione di questo modello in modo tale da avere una

sovrapposizione più precisa possibile con quanto è stato misurato, poi spetterà al modellista capire le differenze che si generano in questa operazione nella rappresentazione del fenomeno reale.

Con il modello pronto si può simulare il comportamento della rete a nuove chiusure, analizzare l'andamento dei valori di pressione e portata, dimensionare gli strumenti di misura e le valvole, e capire su come modificare e gestire la rete.

Vantaggi della modellazione sono:

- permette di controllare la rete di distribuzione esistente;
- aiuta nella gestione della rete;
- è conveniente nelle reti idriche di grandi estensioni, mentre non è necessario per una di un piccolo centro urbano;
- permette di prevenire o ipotizzare eventuali perdite idriche.

Invece, gli svantaggi:

- difficoltà nel reperire tutte le informazioni sull'intera rete;
- difficoltà con il modello di riprodurre il fenomeno reale.

Alcuni esempi di modelli possono essere: quelli *Scada (supervisory control and data acquisition)*, che permettono il monitoraggio e la misurazione spontanea delle più importanti caratteristiche fisiche, chimiche, meccaniche e ambientali di tutte le strutture; e le piattaforme *Ict (Information & communication technologies)*, che possono anche eseguire una stima continua delle condizioni delle infrastrutture e riprodurre i possibili comportamenti e fragilità future. Con l'utilizzo dei dati ricavati dai sensori, questo modello *Ict* permette di eseguire una manutenzione specifica e preventiva per adottare tutte quelle misure, come la sostituzione delle parti dell'impianto obsolete, ancora prima che si verifichi una perdita idrica.

#### **4.5.3 Strumenti di supporto alle decisioni**

Il sistema di supporto alle decisioni è un software di analisi dei dati che fornisce supporto nel prendere delle decisioni importanti a riguardo di un certo problema che non può essere risolto con dei normali modelli matematici o quantitativi. Nel caso delle perdite idriche, permette di prendere scelte future nella sostituzione delle condotte di una rete di distribuzione in modo tale da evitare che si verifichi una rottura.

Questo metodo si compone di una particolare struttura:

- analisi dei dati: comprende le caratteristiche generali delle condotte e la cronologia temporale delle riparazioni delle rotture;

- proprietà delle condotte: contiene tutti valori riguardanti i diametri, materiali ed età di posa di ogni singola tubazione della rete. Si può svolgere anche una stima dei dati mancanti di alcune tubazioni facendo riferimento a quelle vicine;
- variabili esplicative aggiuntive: informazioni sulla tipologia di terreno, della strada, di traffico pesante, vicinanza a linee ferroviarie, elettriche e altre servizi, sulla presenza e profondità della falda;
- calcolo della probabilità di guasto: in base ai dati dei punti riportati sopra si definisce il tasso della perdita prevista;
- calcolo della conseguenza del guasto: si stimano gli impatti che si verificherebbero in caso di perdita;
- calcolo del rischio: definito come il prodotto tra la probabilità e le conseguenze del guasto, a cui s'aggiunge il costo di riparazione e i fattori limite, come il vincolo sulla lunghezza della rete che si può sostituire (definito nel piano annuale di sostituzione) e quello sul budget annuale per la manutenzione preventiva (definito nel piano quinquennale di sostituzione).

Questo strumento di supporto alle decisioni è ancora in fase di studio ed esistono pochissimi casi in cui è stato utilizzato.

Vantaggi di questo metodo sono i seguenti:

- garantisce una maggiore gestione della rete;
- permette di sostituire una condotta prima che questa si rompi.

Invece, gli svantaggi sono:

- disposizione di pochi dati e informazioni sulle perdite idriche che si sono verificate;
- difficoltà di aggiornamento della banca dati e che questi siano precisi;
- è un sistema molto costoso e richiede molto personale per realizzarlo.

Un esempio di questo sistema è il Sistema informativo nazionale federato delle infrastrutture, Sinfì, ovvero “*un registro informatizzato geo-referenziato [ ], basato su software GIS (Geographic Information System)*” [Einaudi L., 31/03/2023], dove vengono condivise tutte le infrastrutture, comprese quelle idriche, presenti sul territorio nazionale. Al suo interno contiene una banca dati contenente tutte le informazioni su queste strutture, caricate dai propri gestori privati e pubblici, e che possono essere consultate in secondo momento. Questo sistema comprende la maggior parte della rete idrica di distribuzione e quella di smaltimento, mentre non contiene dati sulle perdite idriche. Permette un efficace sistema di monitoraggio e gestione, di prendere adeguate decisioni future per la programmazione degli interventi (i dati sono

organizzati per classi di rischi potenziale e relative priorità degli interventi) e di conoscere la presenza di possibili interferenze durante gli scavi.

## **5. Confronto tra i vari metodi di rilevamento delle perdite**

Tutti i sistemi di rilevamento delle perdite idriche, sia quelli strumentali che quelli informatici, sono complementari tra loro, ovvero vanno utilizzati insieme in modo tale da avere un risultato più preciso del punto esatto in cui si trova la rottura nella condotta. Così facendo, si ottengono maggiori vantaggi in termini di tempo, quantità d'acqua risparmiata, bilancio idrico, costi e di continuità del servizio. Infatti, è molto fondamentale ridurre i tempi di ricerca dei guasti, soprattutto di quelli occulti, altrimenti si avrebbero maggiori volumi d'acqua sprecati, oltre a quelli rilasciati al momento della rottura prima dell'intervento della squadra addetta alle riparazioni, a discapito anche del principio di sostenibilità della risorsa idrica. In più, si avrebbero lunghi tempi di disservizio per i cittadini, i costi di riparazione aumenterebbero e inciderebbe sul bilancio idrico complessivo. Quindi, un utilizzo singolo dei vari metodi di ricerca non è conveniente, per gli stessi motivi appena citati ma di carattere opposto.

In generale, i metodi di rilevamento delle perdite idriche possono essere distinti in base a: praticità d'uso, come il geofono e le aste geofoniche; facilità di utilizzo, dove molti sistemi di ricerca necessitano di operatori qualificati e con anni di esperienza sul campo; velocità nell'individuare i guasti, tipo il correlatore acustico; capacità di monitoraggio da remoto, come i contatori intelligenti e il metodo della distrettualizzazione; e in base al costo di realizzazione, tipico dei nuovi sistemi computerizzati come il sistema di supporto alle decisioni, oppure di ricerca, nel caso dei gas traccianti.

Confrontando i vari metodi di ricerca, si può notare che solo i contatori intelligenti, correlatori acustici statici, la distrettualizzazione, e i misuratori di portata e pressione hanno bisogno di interventi alla rete per installare apparecchiature per il monitoraggio di essa. Questo genera un ulteriore vantaggio rispetto alle altre tipologie, perché permettono di controllare continuamente il comportamento della rete di distribuzione tramite l'analisi dei grafici e in caso di variazioni anomale indicare la presenza di una perdita idrica.

I modelli e i sistemi di supporto alle decisioni, anche se diversi, forniscono maggiori vantaggi in termini di prevenzione delle rotture dando la possibilità ai gestori di intervenire subito alla sostituzione della condotta, prima che si verifichi veramente il guasto. Per questo motivo, la prevenzione consente di verificare lo stato di salute delle condotte, così da garantire in ogni momento un servizio idrico continuativo, efficace ed efficiente per tutte le utenze servite. Inoltre, permette di stilare una lista delle priorità di intervento e di definire le strategie di miglioramento del servizio stesso.

Esistono sistemi che integrano i modelli predittivi con le analisi avanzate della rete, così da utilizzare i dati registrati da varie fonti, come quelli dei contatori intelligenti, previsioni meteorologiche e modelli storici, consentendo ai gestori idrici di prevedere la domanda d'acqua, realizzare le infrastrutture necessarie e migliorare il proprio servizio.

## **6. Ulteriori tipologie di rilevamento impiegate in altri Stati**

Oltre ai metodi di ricerca tradizionali e più tecnologici, appena descritti, largamente impiegati con misure diverse in Italia, esistono altre tipologie utilizzate all'estero che consentono di individuare le perdite idriche nella rete di distribuzione. Tra queste ci sono la *SmartBall*, il *Sahara Pipeline Inspection System* e il *Trenchless Automated Leakage Repair*.

### **6.1 SmartBall**

La tecnologia canadese *SmartBall* viene impiegata per cercare le perdite idriche nelle condotte di grandi dimensioni e di osservare le caratteristiche di queste ultime. Inoltre, può essere utilizzata per mappare e confermare il tracciato della rete di distribuzione.

Questo strumento è dotato di una sfera in alluminio coperta esternamente da un guscio di espanso protettivo, mentre all'interno contiene diverse strumentazioni: “*un sensore acustico altamente sensibile, uno magnetico per rilevare guasti nei giunti, uno di temperatura, un accelerometro triassiale e un trasmettitore dotato di GPS*” [Xylem, -].

Lo strumento viene inserito all'interno della tubazione senza sospendere il servizio idrico (come mostrato in Figura 24), e fatta trasportare dal flusso dell'acqua circolante al suo interno, anche se questo fosse basso. In questo modo riesce a registrare costantemente i rumori interni e altri dati della condotta, fino a quando non giunge al punto di prelievo definito, dove sarà estratta con apposite strumentazioni. I suoi spostamenti vengono monitorati da alcuni ricevitori installati esternamente alla condotta, che in base ai valori sul tempo, sulla posizione e quelli sulla velocità, permetteranno di indentificare con precisione il punto esatto delle perdite idriche molto piccole e la presenza di sacche d'aria, causate da un malfunzionamento degli sfiati. I dati rilevati vengono elaborati da un software, che restituirà i risultati con la posizione e dimensione della rottura che si è verificata nella rete di distribuzione.

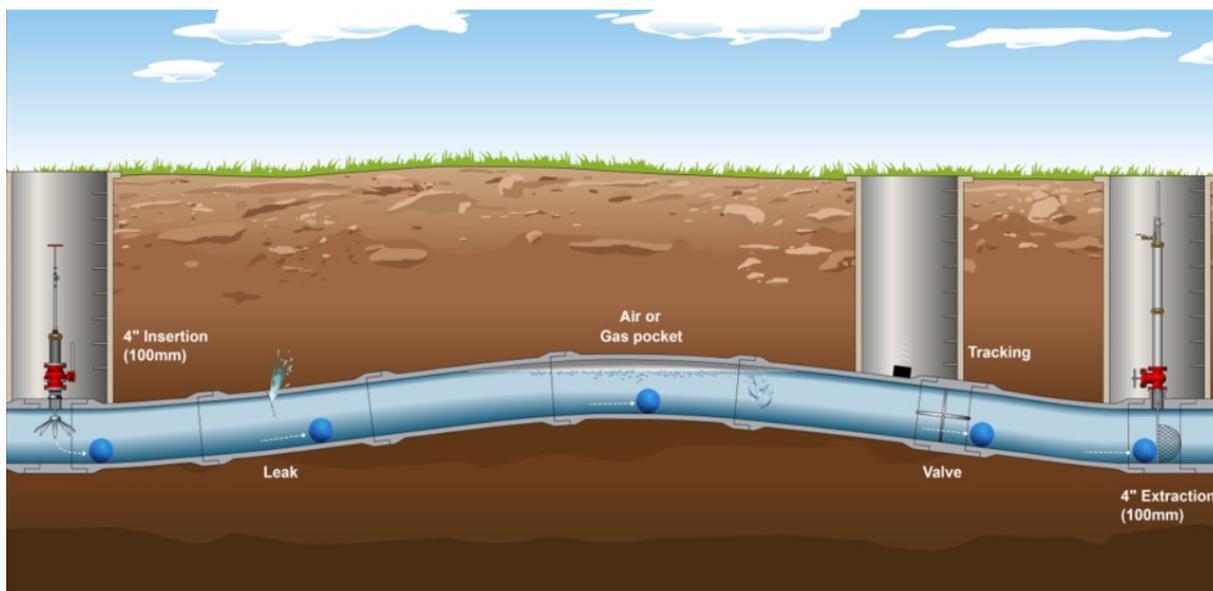


Figura 24: Descrizione delle diverse fasi di funzionamento della SmartBall.

(Fonte: enasud.com)

Il metodo della *SmartBall* consente ai gestori idrici di individuare i guasti con maggiore precisione distinguendo il suono generato da una perdita da quelli di sottofondo, ridurre i volumi d'acqua non fattorizzati, di programmare le riparazioni e, se possibile, le sostituzioni delle tubazioni più rovinate, in modo tale da ridurre gli interventi più costosi e che causano forti problemi alle utenze. In più, fornisce ai gestori un metodo facile, sicuro ed economico rispetto a quelli in cui bisogna interrompere il servizio, e può essere implementato a qualche sistema di gestione computerizzato.

Questa tipologia di ricerca è stata adottata in molti Stati del mondo, tra cui l'Italia.

## 6.2 Sahara Pipeline Inspection System

Il metodo inglese *Sahara* è un particolare sistema di ispezione per monitorare le condizioni delle condotte di distribuzione e per controllare la presenza di eventuali perdite idriche, senza interrompere il servizio alle utenze.

Tale sistema può essere dotato di:

- vari sensori di ispezione altamente precisi, per rilevare tutte le informazioni necessarie sulle tubazioni, e si distinguono in acustici, per individuare le rotture idriche, e quelli di pressione, per tracciare il profilo verticale e per segnalare la presenza di ostruzioni;
- una telecamera, con lo scopo di fornire immagini interne delle condotte in tempo reale, di verificare la presenza di sedimenti e segni di corrosione;
- funzione di conduttività, per individuare guasti nelle tubazioni appena posate e raccordi metallici smarriti, e per definire il tracciato e la profondità di quelle condotte non registrate;

- sonar, per controllare le condizioni del profilo interno e della sezione trasversale della condotta, come il diametro del tubo e la grandezza delle sacche d'aria.

Questi sensori vengono installati su un cavo avvolgibile, che può essere costituito da un sistema di localizzazione per mappare le condotte in tempo reale e per segnare con precisione le posizioni delle perdite, anche di quelle più piccole, e le sacche d'aria rilevate.

Di seguito in Figura 25, viene portato un esempio figurativo dell'applicazione di tale sistema.

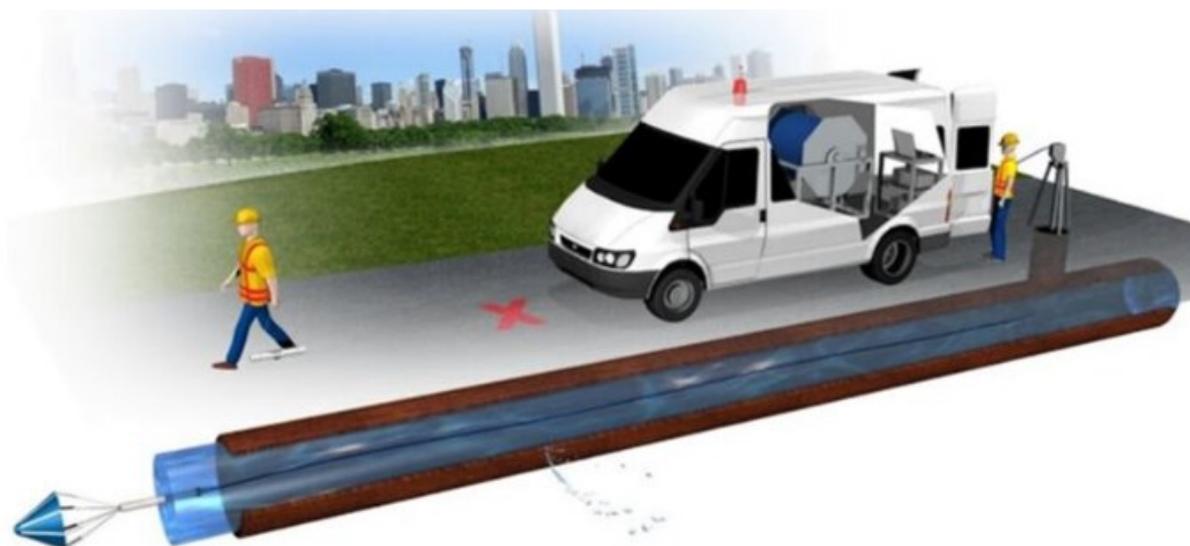


Figura 25: Sistema di ispezione delle perdite idriche Sahara.

(Fonte: wrccgroup.com)

Lo strumento, come nel caso della *SmartBall*, viene inserito all'interno della tubazione e fatto trasportare dal flusso d'acqua.

Il sistema *Sahara*, grazie alle sue caratteristiche flessibilità e adattabilità, può essere impiegato in qualsiasi tipo di tubazione e consente ai gestori idrici di garantire un servizio di approvvigionamento idrico più efficace.

### 6.3 Trenchless Automated Leakage Repair

Il sistema israeliano *Trenchless Automated Leakage Repair, Talr*, permette di riparare le condotte e gli allacciamenti della rete idrica caratterizzati da molte perdite “distribuite lungo sezioni di tubazioni fino a circa 500m”, senza il bisogno di individuarle specificamente ed eseguire scavi [Rotella L, -]. Così da avere una forte riduzione delle perdite in tempi rapidi e garantendo riparazioni efficaci per una decina di anni.

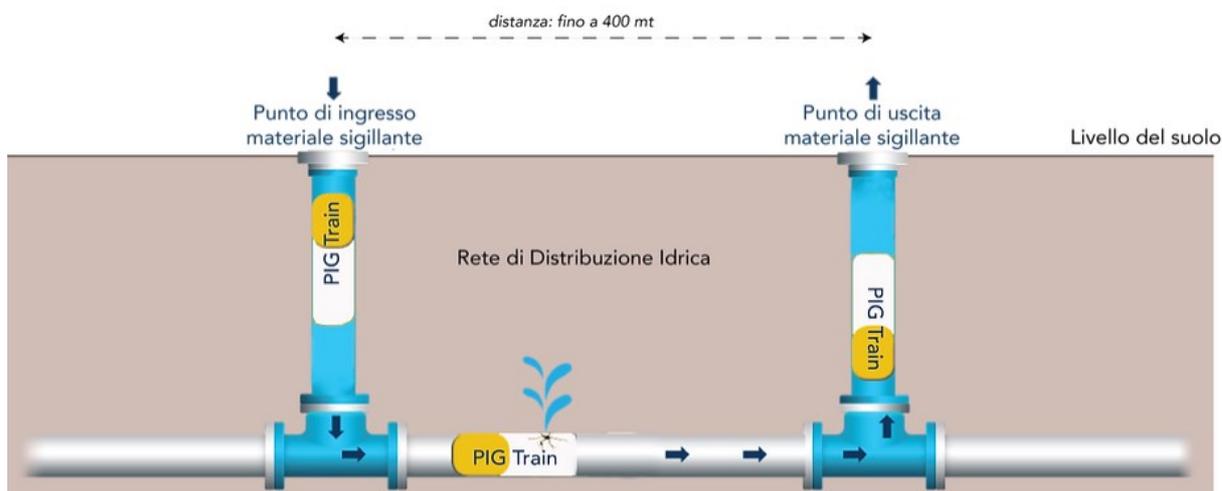


Figura 26: Esempio di applicazione del sistema Talr.

(Fonte: pipecareitalia.com)

Questa “tecnologia brevettata a livello internazionale si basa sull’utilizzo di un composto a base vegetale-alimentare, detto *Pig-Train*, che sigilla istantaneamente tutti i punti di perdita lungo la tubazione in pressione” (come in Figura 26) [Rotella L, -]. Una volta isolato il tratto di condotte interessato, viene misurata la torbidità dell’acqua e le perdite presenti, tramite un apposito apparecchio detto *Launcher*. Con quest’ultimo, viene iniettato il composto *Pig-Train* nella condotta, che percorrendola sotto la spinta esercitata dall’acqua circolante all’interno di essa, individua e ripara automaticamente le varie perdite. Il materiale in eccesso uscente dal punto di sezione finale della rete, come idranti o pozzetti di ispezione, “viene raccolto in un apposito filtro, essiccato e smaltito come un normale rifiuto” [Pipecare S.r.l., -]. Infine, viene verificata l’efficacia dell’operazione di riparazione e con il ricambio d’acqua viene ripristinato il livello iniziale di torbidità dell’acqua.

Il sistema *Talr* consente ai gestori idrici di velocizzare le procedure di individuazione e riparazione di tutte le rotture presenti, senza modificare il diametro interno della condotta. Inoltre, permette di aumentare la vita utile della rete idrica, di ridurre i consumi energetici, e una maggiore gestione della percentuale di guasti e sprechi d’acqua della rete di distribuzione, soprattutto se questa fosse suddivisa in distretti.

## 7. Tecnologie di ricerca emergenti

Recentemente, sono state sviluppate nuove tecnologie aggiuntive per la ricerca di perdite idriche nella rete di distribuzione, tra queste troviamo quella satellitare *Asterra*. Quest’ultima impiega una serie di fotografie satellitari realizzate sulla rete per individuare le possibili perdite e mediante una ricerca sul campo, viene verificato se queste sono effettivamente dei guasti o delle semplici interferenze. Questa tecnica di rilevamento satellitare si compone di più fasi:

- prelocalizzazione delle rotture, ovvero si *“acquisiscono le immagini grezze della rete tramite radar utilizzando la tecnologia SAR, Synthetic Aperture Radar”*, oppure con l’impiego di un aereo [Lario Reti Holding S.p.A., 2021];
- pulizia delle immagini da vegetazione, edifici e altri elementi artificiali;
- analisi algoritmica, dove avviene la *“distinzione tra acqua e altri oggetti/sostanze tramite costante dielettrica con distinguo fra i diversi tipi di acqua presenti nel terreno tramite conducibilità elettrica”*, così da evidenziare *“la presenza di acqua potabile sul terreno in prossimità delle tubazioni dell’acquedotto”* [Lario Reti Holding S.p.A., 2021; 2F Water Venture S.r.l., -]. Inoltre, implementando uno specifico algoritmo è possibile visualizzare anche le condizioni delle condotte della rete;
- utilizzando il GIS vengono indicate le posizioni delle perdite idriche, ognuna marcata con un certo colore in base all’importanza;
- infine, le squadre di intervento procedono all’individuazione precisa delle rotture segnalate.

L’impiego di tecnologia satellitare permette di ridurre i tempi e i costi di ricerca rispetto ai metodi tradizionali, di controllare aree estese, di diminuire la quantità d’acqua non contabilizzata, e di risparmiare energia e risorsa idrica. Un esempio di questo metodo di rilevamento è stato applicato alla rete idrica dal gestore Lario Reti Holding nella provincia di Lecco, che ha permesso di individuare 58 perdite su 587 km dei 2600 km complessivi di rete [Lario Reti Holding S.p.A., 2021].

Un’altra tecnica di ricerca delle perdite idriche permette di integrare le capacità dell’intelligenza artificiale alla rete di sensori *IoT* di elettro-vibro-acustica, con lo scopo di minimizzare gli sprechi d’acqua e rendere il servizio idrico più efficace, duraturo e sostenibile. In pratica, viene emesso un suono particolare all’interno della condotta e tramite dei sensori disposti lungo di essa, viene captato e definito il suo flusso medio, così da valutarne la variazione di frequenza. Quindi, viene creato il sistema digitale contenente i dati dei sensori *IoT* e che consentirà di studiare i parametri acustici, elettrici, vibrazionali e quelli di pressione della rete idrica. In questo processo verrà impiegata anche l’intelligenza artificiale, che contribuirà nell’individuazione della posizione precisa della perdita. Questa tecnica consentirà ai gestori idrici di eseguire interventi di riparazione più mirati e precisi, di monitorare costantemente la propria rete di distribuzione e di utilizzare un modello informatico facile da applicare anche ad altre reti e con la funzione di prevenire possibili degrading interni delle condotte.

Oltre a queste nuove tecniche di ricerca, esistono delle altre metodologie in fase di studio, come quella data dalla collaborazione tra l'Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (Cnr-Irea) e la start-up innovativa Flyted. Essi stanno collaborando nel trovare nuove soluzioni efficaci ed efficienti per monitorare le condizioni delle condotte ed individuare le perdite idriche nelle reti di distribuzione di grandi dimensioni. A differenza degli altri metodi, il progetto prevede di raccogliere *“i dati sulle condutture tramite l'impiego di droni sia multirottore che ad ala fissa, mentre il monitoraggio nelle aree cittadine avverrà attraverso strumenti di terra”* [Rotella L., -].

## **8. Esempio pratico di ricerca di una perdita idrica**

Di seguito viene riportato un esempio di applicazione di alcuni metodi di ricerca per individuare le perdite idriche all'interno di una rete di distribuzione di un comune italiano (per motivi di riservatezza non verranno riportati i nomi del gestore idrico, delle aziende coinvolte e quello del comune interessato).

L'appalto consiste nello svolgere una campagna di misurazioni e di trovare delle soluzioni idonee per migliorare l'assetto della rete e per consentire una gestione attiva delle perdite, intervenendo sui consumi e sul risparmio della risorsa idrica.

Il sistema acquedottistico del centro abitato in questione è costituito da due serbatoi di accumulo di testata posizionati a quote differenti, uno a 75 metri slm e l'altro a 51 metri slm, e sono nominati rispettivamente Alto e Basso. Quest'ultimo è costituito da due vasche della capacità complessiva di oltre 3000 m<sup>3</sup> e fornisce la maggior parte del territorio urbano per un totale di 24.66 km di rete di distribuzione. Invece quello Alto, con una capienza complessiva di 650 m<sup>3</sup> e una rete di 1.68 km, serve le restanti unità abitative posizionate a 35 metri slm, che non possono essere servite da quello Basso a causa di problemi di carico piezometrico insufficiente, come era stato proposto dalla Committenza.

Nel complesso, la rete di distribuzione si estende per un totale di 26.35 km (dato calcolato sommando le lunghezze delle condotte riportate nei file forniti dalla Committenza con quelle misurate durante il sopralluogo), e si compone di una serie di maglie nell'area del centro urbano e da tre rami di condotta che si allontanano dall'abitato per servire le aree più periferiche. Le due reti che partono dai due serbatoi sono idraulicamente scollegate. Nella costruzione di queste, sono state utilizzate nella maggior parte condotte in ghisa (78%), con diametri di 80, 100 e 250 mm, il restante è in polietilene (15%) e acciaio (11%).

Il serbatoio Basso è alimentato da una condotta adduttrice in acciaio dotata di un misuratore di portata magnetico connesso al telecontrollo del gestore idrico, che gli fornisce una portata

giornaliera costante con valori medi che variano dal minimo invernale di 13 l/s (riferito al mese di dicembre 2019) al massimo estivo di 30 l/s (riferito al mese di agosto 2019). Le due condotte in ghisa e in uscita da questo serbatoio sono anch'esse monitorate da misuratori di portata di tipo magnetico connesso al telecontrollo. La prima alimenta a gravità la grande maggioranza delle utenze con una portata media che varia tra il minimo invernale di 12.36 l/s e il massimo estivo di 29.24 l/s. Mentre, la seconda uscita è una tubazione di adduzione in pressione con il compito di portare l'acqua verso il serbatoio Alto tramite un sistema di pompaggio. Quest'ultimo, in base al periodo stagionale, entra sempre in funzione almeno una volta al giorno fino a raggiungere il livello massimo di circa 3 m della vasca. Il serbatoio Alto ha una condotta in uscita in ghisa, monitorata con misuratore volumetrico connesso al telecontrollo, per servire le utenze situate nella zona più alta del comune. In quest'area, il consumo idrico si aggira su valori inferiori a 1 l/s, con modesti aumenti durante il periodo estivo.

Prima di apportare modifiche alla rete di distribuzione idrica, è stato eseguito un sopralluogo per raccogliere informazioni utili alla comprensione del suo funzionamento e per verificarne lo schema idraulico. Quindi, per prima cosa sono stati visitati gli impianti che compongono l'infrastruttura acquedottistica comunale con lo scopo di trovare la presenza di criticità di qualsiasi entità. Allo stesso tempo, sono state effettuate interviste agli operatori di zona in merito a quelle situazioni critiche già note, come la presenza di aree con bassa o eccessiva pressione, condotte non in buone condizioni soggette a frequenti riparazioni e anomalie funzionali. Inoltre, a causa dell'assenza di planimetrie aggiornate della rete di distribuzione, sono stati eseguiti sopralluoghi alla rete insieme al responsabile di zona, con lo scopo di verificare la correttezza delle informazioni ricevute. In particolare, sono state verificate quelle zone di interconnessione tra reti differenti, la corrispondenza con le cartografie consegnate, e ispezionati i nodi idraulici già dotati di misuratori di portata e valvole motorizzate, installate al tempo per un sistema di monitoraggio della rete che non è mai entrato in funzione. Durante il sopralluogo sono emerse poche criticità relative a problematiche gestionali e di assetto della rete idrica.

Inoltre, sono stati individuati anche i punti di misura ottimali necessari per poter effettuare il monitoraggio dei parametri idraulici della rete, come quelli posizionati sulle condotte principali all'ingresso della rete stessa utili al calcolo del bilancio idrico. Questi punti sono stati definiti in base alla fattibilità tecnica e di ottenere misure affidabili per effettuare il monitoraggio temporaneo delle pressioni per un periodo di due settimane dal 13/02/2019 al 26/02/2019, con lo scopo di quantificarle e di individuare la presenza di perdite idriche. Nella fase di monitoraggio sono stati impiegati dei trasduttori di pressione installati sulla condotta per

misurare indirettamente il carico piezometrico, convertendo la pressione del fluido in segnale elettrico.

Da questa attività di rilevamento segue quella dell'analisi delle pressioni, dove sono stati messi a disposizione dalla Committenza anche i dati di portata e di livello trasmessi dai misuratori al sistema di telecontrollo del gestore. I risultati di analisi non hanno fatto emergere particolari criticità, risultando in tutti i casi coerenti con quanto atteso dagli operatori della rete e in ciascun punto riflettono il carico piezometrico dei due serbatoi, con oscillazioni contenute nel tempo. I valori ottenuti dal serbatoio Alto sono risultati carenti e discontinui, perciò è stato consigliato di verificare il sistema di trasmissione dei dati e di indagare sulle cause delle mancanze ripetute e continue del segnale di ricezione. Per completare il bilancio idrico e sviluppare l'analisi, è stato ricostruito il segnale di portata in uscita assente del serbatoio Alto. Visto il suo basso contributo, le assunzioni che sono state prese su di esso non hanno inciso sui valori di portata complessivi immessi nella rete di distribuzione, quest'ultima data dalla somma dei due contributi in uscita dal serbatoio Basso e da quello Alto.

L'andamento del consumo misurato riflette l'uso tipicamente domestico della risorsa idrica soprattutto nel periodo autunnale e invernale (come mostrato di seguito in Figura 27). Ed essendo una località turistica, il picco di domanda serale è più importante nei mesi estivi, con consumi che rimangono invariati nel fine settimana. Non avendo a disposizione nessun dato di fatturazione all'utenza, i consumi invernali sono stati utilizzati per stimare le perdite idriche risultate pari a 4-5 l/s, equivalenti ad una perdita lineare di 0.12 l/s/km. Questo valore è stato considerato un risultato ottimale, visto che il limite fissato dall'ARERA per il macro-indicatore M1 (perdite idriche) per la realtà acquedottistica italiana risulta pari a 0.17 l/s/km.

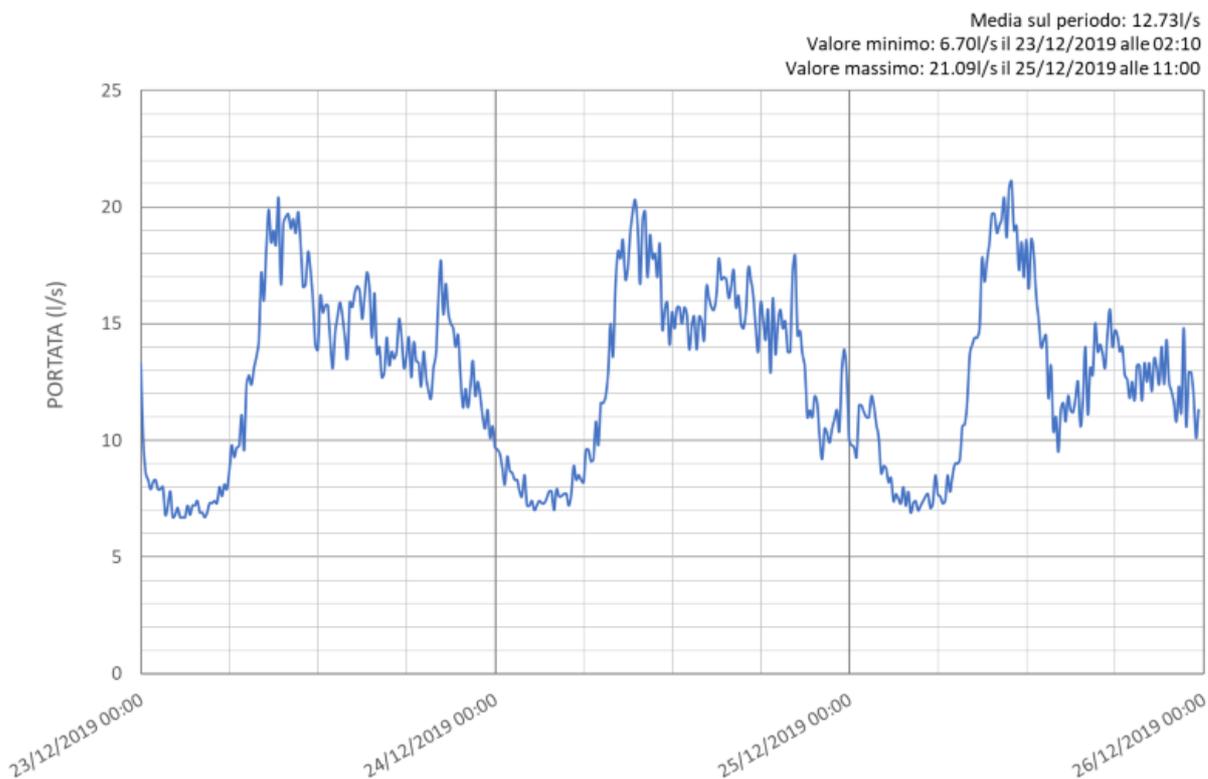


Figura 27: Andamento della portata in ingresso nella rete di distribuzione nel periodo dal 23 al 26 dicembre 2019.

Con i dati messi a disposizione dalla Committenza riguardanti i volumi idrici complessivi immessi in rete relativi agli anni 2016, 2017 e 2018, è stato dimostrato il generale aumento dei volumi annui forniti, registrando un più 5% nel 2017 (rispetto al 2016) e più 4% nel 2018 (rispetto al 2017).

Per ridurre i consumi e risparmiare sulla risorsa idrica, così da contenere il numero delle perdite, è stato deciso di applicare il metodo della distrettualizzazione (come in Figura 28). Infatti, questo permette di definire per ogni distretto le quantità di acqua in ingresso, quella in uscita e quella erogata alle diverse utenze. Dove i punti di ingresso e quelli in uscita del distretto assumono un ruolo importante nel monitoraggio continuo della rete.

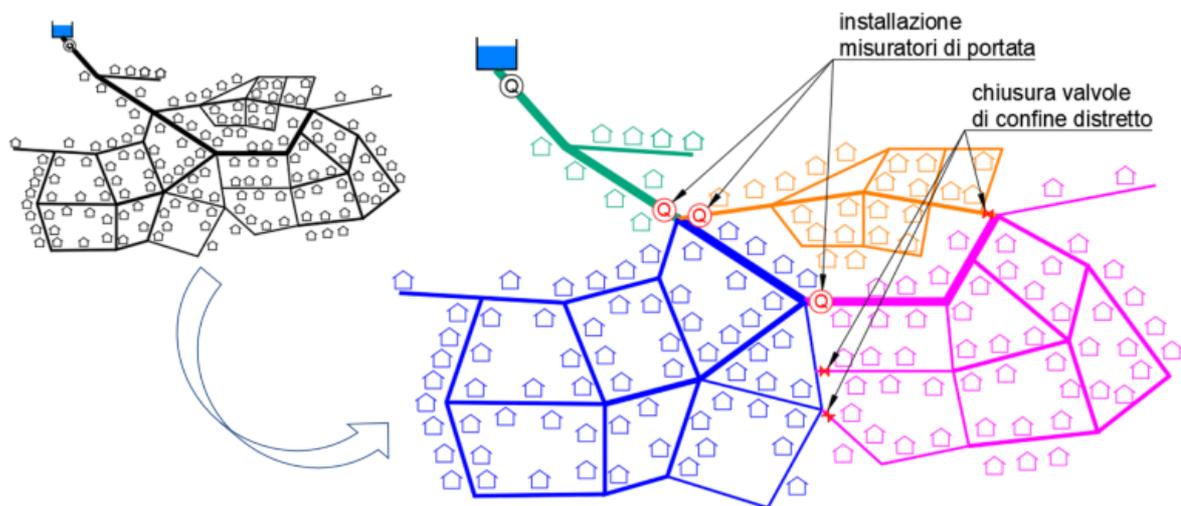


Figura 28: Esempio di suddivisione della rete di distribuzione in distretti.

Alla Committenza è stato proposto di suddividere la rete di distribuzione in sei distretti, cercando per ognuno di contenere l'estensione e di sfruttare al meglio l'attuale configurazione idraulica della rete di distribuzione. Sulle condotte, considerate al confine di ogni distretto virtuale, saranno installati temporaneamente gli strumenti di misura della portata, usufruendo delle camerette già esistenti in rete, senza realizzarne di nuove; in quelle considerate al confine dei distretti fisici, saranno chiuse le saracinesche o valvole già presenti, dopo aver verificato la loro tenuta e manovrabilità. Inoltre, verranno installati anche strumenti di misura della portata all'uscita dei due serbatoi di accumulo, con lo scopo di verificare l'attendibilità degli strumenti di misura della portata attualmente presenti. Per ogni distretto è stato previsto l'installazione di almeno uno strumento di misura della pressione, in base alla presenza di pozzetti o di allacci all'utenza adeguati.

Per verificare l'efficacia di questo metodo è stato deciso di eseguire una campagna di monitoraggio temporanea di portate e pressioni. Se l'esito risulterà positivo, ovvero le pressioni di esercizio non si discostano in maniera significativa da quelle ottenute prima della distrettualizzazione, la configurazione precedente della rete potrà essere mantenuta in esercizio. Comunque, ogni distretto sarà soggetto al monitoraggio permanente, con lo scopo di controllare la presenza di eventuali perdite, errori nelle misurazioni, difficoltà di trasmissione dei dati e continue variazioni nelle registrazioni.

## 9. Conclusioni

La questione delle perdite idriche rappresenta un grande problema per tutti i gestori idrici, sia in termini economici che tecnici, affinché venga garantito un continuo e qualitativo servizio di approvvigionamento alle diverse utenze distribuite su tutto il territorio.

Nel lavoro di tesi si è voluto creare un percorso che partisse dal significato di acqua, specificando la sua importanza ambientale e nella società, fino alla descrizione dei vari metodi di ricerca delle perdite idriche che permettono di aiutare a ridurre al minimo le rotture idriche nella rete di distribuzione e gli sprechi d'acqua, con lo scopo di utilizzare al meglio questa risorsa e di avere una maggiore sostenibilità di essa.

Attraverso l'analisi dei metodi di ricerca delle perdite nelle condotte della rete di distribuzione idrica, i gestori del servizio idrico possono capire come queste tecniche funzionano e scegliere quella più conveniente alla riduzione dei guasti. Le tipologie che sono state illustrate nel presente lavoro consentono di individuare la presenza di eventuali perdite alla rete, specialmente di quelle reali, permettendo, quindi, alle squadre di intervento di procedere ai lavori di sostituzione oppure di riparazione delle condotte, e di svolgere operazioni di efficientamento della rete idrica.

Dal confronto delle tecniche di rilevamento si è notato che non esiste una tecnologia preferibile alle altre e che possa essere utilizzata da sola, ma deve esserci un'integrazione tra metodologie per fornire una maggiore precisione sulla presenza di anomalie e guasti. Inoltre, con la continua evoluzione tecnologica, i gestori idrici potranno utilizzare attrezzature oppure modelli informatici all'avanguardia per ridurre la percentuale di perdite idriche della propria rete di distribuzione e nelle altre parti dell'impianto acquedottistico. Inoltre, le medesime tecnologie consentiranno di soddisfare al meglio la continua e crescente domanda idrica, fornendo un servizio duraturo, continuativo, efficace e sostenibile verso i cittadini.

Al problema di rilevare tutte le rotture nelle condotte, specialmente di quelle occulte, potrebbero venire in aiuto anche altre soluzioni impiegate in altri settori industriali, tipo quello petrolifero e quello del gas.



## Bibliografia

Gioia A., 2019, *Gestione delle risorse idriche*, URL:

<https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/303/RISORSE%20IDRICHE%202019-2020/04-NORMATIVA-DOTAZIONI.pdf>, consultato il 28/07/2024

Mambretti S., 16 giugno 2020, *Schemi di acquedotto*, URL:

<https://www.fast.mi.it/wp-content/uploads/2019/11/Mambretti-1-Schemi-di-acquedotto.pdf>, consultato il 29/07/2024

Saba A., 2014, *Funzioni e opere principali degli acquedotti*, URL:

<https://web.unica.it/static/resources/cms/documents/A01A02Generalitefabbisogni.pdf>, consultato il 31/07/2024

Arborea S., 2013, *Opere di presa*, URL:

[https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/438/003\\_Opere%20di%20presa.pdf](https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/438/003_Opere%20di%20presa.pdf), consultato il 01/08/2024

Dicatechpoliba, 2019, *Opere di presa*, URL:

<https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/303/RISORSE%20IDRICHE%202019-2020/06-OPERE%20DI%20PRESA.pdf>, consultato il 01/08/2024

Zanghi F., 25 novembre 2013, *Impianti d'acquedotto*, URL:

[https://profzanghi.weebly.com/uploads/9/0/0/4/9004706/impianti\\_dacquedotto.pdf](https://profzanghi.weebly.com/uploads/9/0/0/4/9004706/impianti_dacquedotto.pdf), consultato il 02/08/2024

Capra A., 2008, *Impianti di sollevamento*, URL:

[https://www.unirc.it/documentazione/materiale\\_didattico/598\\_2008\\_71\\_3132.pdf](https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/598_2008_71_3132.pdf), consultato il 02/08/2024

Raimondi A., 26-29 aprile 2021, *Serbatoi*, URL:

<https://data.fast.mi.it/wp-content/uploads/2021/04/RAIMONDI.pdf>, consultato il 03/08/2024

ISTAT, 22 marzo 2024, *Ancora elevate le perdite idriche della rete di distribuzione*, URL:

<https://www.istat.it/it/files/2024/03/Report-GMA-Anno-2024.pdf>, consultato il 04/08/2024

Mambretti S., 16-17 giugno 2020, *Schemi di acquedotto*, URL:

<https://www.fast.mi.it/wp-content/uploads/2019/11/Mambretti-1-Schemi-di-acquedotto.pdf>, consultato il 07/08/2024

Criminisi A., Fantozzi M., Fontanazza C., Freni G., Lambert A., 2010, *Le perdite apparenti e sotto misurazione*, URL:

<http://www.studiomarcofantozzi.it/w/wp-content/uploads/2015/03/Perdite-Apparenti-SEM-n.2-20101.pdf>, consultato il 07/08/2024

AMGA Azienda Multiservizi S.p.A., Amt der Karntner Landesregierung, CAFC S.p.A., Carniacque S.p.A., Stadtwerke Klagenfurt AG, 2013, *La guida per la gestione delle perdite idriche nelle reti*, URL:

<http://www.madchild.it/ingciv/images/appunti/CostruzioniIdrauliche/WP3-IT.pdf>, consultato il 09/08/2024

Reinaud L., 2023, *Ricerca delle perdite idriche*, URL:

<https://www.ndt.net/article/aipnd2007/files/orig/58.pdf>, consultato il 11/08/2024

## Sitografia

Treccani, *Acqua*, <https://www.treccani.it/vocabolario/acqua/>, consultato il 24/07/2024

Claber, *Quanta acqua c'è sulla Terra?*, 2010, [https://www.green-world.it/it/aqua-love/quanta\\_acqua\\_terra.asp](https://www.green-world.it/it/aqua-love/quanta_acqua_terra.asp), consultato il 25/07/2024

USGS, *Distribuzione dell'acqua globale*, <https://www.usgs.gov/media/images/distribuzione-dellacqua-globale>, consultato il 25/07/2024

Gruppo CAP, *Percentuale di acqua sulla Terra: quantità e distribuzione*, 15/12/2021, <https://acquadelrubinetto.gruppocap.it/acqua-e-scienza/percentuale-acqua-sulla-terra/> consultato il 25/07/2024

Wikipedia, *Acqua*, 03/07/2024, <https://it.wikipedia.org/wiki/Acqua>, consultato il 26/07/2024

Pillepich N., *Il ciclo dell'acqua in poche parole: cos'è e come funziona?*, 30/07/2022, <https://www.geopop.it/il-ciclo-dellacqua-in-pocheparole-cos-e-come-funziona/>, consultato il 26/07/2024

European Environment Agency, *Uso dell'acqua in Europa- Quantità e qualità esposte a grandi sfide*, 14/02/2019, <https://www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2018/articoli/uso-dell2019acqua-in-europa-2014>, consultato il 26/07/2024

Il trattamento acqua, *Gli usi dell'acqua*, [https://www.iltrattamentoacqua.eu/usi\\_acqua.htm](https://www.iltrattamentoacqua.eu/usi_acqua.htm), consultato il 27/07/2024

CAFC S.p.A., *Gli usi dell'acqua*, <https://www.cafcspa.com/educational/acqua/usi-dell-acqua/usi-dell-acqua.html>, consultato 27/07/2024

Agenzia per la Coesione Territoriale, *Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile*, <https://www.agenziacoesione.gov.it/comunicazione/agenda-2030-per-lo-sviluppo-sostenibile/> consultato il 27/07/2024

Treccani, *Acquedotto*, <https://www.treccani.it/vocabolario/acquedotto/>, consultato il 28/07/2024

Wikipedia, *Acquedotto*, 27/04/2024, <https://it.wikipedia.org/wiki/Acquedotto>, consultato il 28/07/2024

Lo Monaco A., *Scoperti dopo 2000 anni i Giardini Monumentali Perduti di Pietra*, <https://www.vanillamagazine.it/scoperti-dopo-2-000-anni-i-giardini-monumentali-perduti-di-petra/>, consultato il 29/07/2024

Pangea, *Città d'acqua*, <http://www.pangea-project.org/citta-dacqua/>, consultato 29/07/2024

Cartwright M., *Acquedotto*, <https://www.worldhistory.org/trans/it/1-518/acquedotto/>, consultato il 30/07/2024

Wikipedia, *Acquedotto romano*, 24/07/2024

[https://it.wikipedia.org/wiki/Acquedotto\\_romano](https://it.wikipedia.org/wiki/Acquedotto_romano), consultato il 30/07/2024

Rodà I., *Acquedotti, i capolavori dell'ingegneria romana*, 23/09/2023,

[https://www.storicang.it/a/acquedotti-i-capolavori-dellingegneria-romana\\_16372](https://www.storicang.it/a/acquedotti-i-capolavori-dellingegneria-romana_16372), consultato il 30/07/2024

Mignami Ingegneria, *Acquedotti: dalla sorgente al centro abitato*, <https://mignami-ingegneria.ch/acquedotti/>, consultato il 31/07/2024

Nosengo N., Zizi M., *Acquedotti*,

[https://www.treccani.it/enciclopedia/acquedotti\\_\(Enciclopedia-dei-ragazzi\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/acquedotti_(Enciclopedia-dei-ragazzi)/), consultato il 31/07/2024

Treccani, *Magra*, <https://www.treccani.it/vocabolario/magra/>, consultato il 01/08/2024

Treccani, *Sorgente*, <https://www.treccani.it/vocabolario/sorgente/>, consultato il 01/08/2024

Wikipedia, *Potabilizzazione dell'acqua*, 04/05/2024,

[https://it.wikipedia.org/wiki/Potabilizzazione\\_dell%27acqua](https://it.wikipedia.org/wiki/Potabilizzazione_dell%27acqua), consultato il 01/08/2024

Istituto Superiore di Sanità, *Oms: le nuove linee guida sulla qualità dell'acqua potabile*, 07/07/2011, <https://www.epicentro.iss.it/ambiente/2011>, consultato il 02/08/2024

InKlima, *Adduzione Acqua: cosa significa e a cosa serve?*, <https://inklima.it/adduzione-acqua/>, consultato il 02/08/2024

Lario Reti Holding S.p.A., *Serbatoio di accumulo*, 2021, <https://www.larioreti.it/servizio-idrico/impianti-gestiti/impianti-acquedotto/serbatoi-accumulo/>, consultato il 03/08/2024

Water Supply Technologies in Emergencies, *Sistema di distribuzione comunitaria*,

<https://www.emergency-wash.org/water/en/technologies/technology/community-distribution-system>, consultato il 03/08/2024

Acquedotto industriale Soc. Coop. A.R.L., *Schema di funzionamento e planimetria generale dell'impianto*, <https://www.acquedottoindustriale.it/it/default/42208-0-0/impianto.aspx>, consultato il 03/08/2024

Einaudi L., *Interventi infrastrutturali e piattaforme tecnologiche di contrasto all'emergenza idrica*, 31/03/2023, <https://futura-network.eu/acqua-e-servizi-igienici/683-3799/interventi-infrastrutturali-e-piattaforme-tecnologiche-di-contrasto-allemergenza-idrica>, consultato il 05/08/2024

Balocchi A., *Perdite idriche: Italia ed Europa fanno acqua da tutte le parti*, 02/02/2023, <https://wisesociety.it/ambiente-e-scienza/perdite-idriche-in-italia-e-europa-dati/>, consultato il 06/08/2024

Barnett C., *Europe's water crisis is much worse than we thought*, 06/12/2022, <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/europes-water-crisis-drought-worse-grace>, consultato il 06/08/2024

Monaci S., *Acqua sprecata. Infrastrutture idriche italiane tra le più vecchie d'Europa: il 25% ha più di 50 anni*, 17/02/2024, <https://www.ilsole24ore.com/art/acqua-sprecata-infrastrutture-idriche-italiane-le-piu-vecchie-d-europa-25percento-ha-piu-50-anni-AFNkcCiC>, consultato il 06/08/2024

Wikipedia, *Bilancio idrico*, 02/05/2020, [https://it.wikipedia.org/wiki/Bilancio\\_idrico](https://it.wikipedia.org/wiki/Bilancio_idrico), consultato il 07/08/2024

FAI, *Emergenza idrica: La dispersione d'acqua*, <https://fondoambiente.it/il-fai/il-fai-che-vigila/salva-l-acqua/emergenza-idrica-la-dispersione/>, consultato il 07/08/2024

Openpolis, *Le perdite di acqua potabile sono un problema nel nostro paese*, 09/10/2020, <https://www.openpolis.it/le-perdite-di-acqua-potabile-sono-un-problema-nel-nostro-paese/>, consultato il 08/08/2024

Gazzetta Ufficiale, *Legge 5 gennaio 1994, n.36*, 05/01/1994, <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1994/01/19/094G0049/sg>, consultato il 08/08/2024

Normattiva, *Decreto legislativo 3 aprile 2006, n.152*, 03/04/2006, <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006-04-03;152>, consultato il 08/08/2024

Normattiva, *Decreto 8 gennaio 1997, n.99*, 08/01/1997, <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:ministero.lavori.pubblici:decreto:1997-01-08;99!vig=>, consultato il 08/08/2024

Allegri Geom. Primo s.r.l., *Cos'è e come funziona il servizio idrico integrato in Italia*, <https://www.allegriecologia.it/servizio-idrico-integrato/>, consultato il 09/08/2024

Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, *PNRR, MIT: un miliardo di euro in più per la riduzione delle perdite idriche*, 07/05/2024, <https://www.mit.gov.it/comunicazione/news/pnrr-mit-un-miliardo-di-euro-piu-per-la-riduzione-delle-perdite-idriche>, consultato il 09/08/2024

ARERA, *Qualità tecnica del servizio idrico integrato*, <https://www.arera.it/dati-e-statistiche/dettaglio/qtsii>, consultato il 10/08/2024

Publiacqua, *Le nuove regole dell'ARERA per la qualità tecnica*, <https://senzafiltro.publiacqua.it/novita-qualita-tecnica-arera/>, consultato il 10/08/2024

Lario Reti Holding S.p.A., *Ricerca Perdite*, 2021, <https://www.larioreti.it/servizio-idrico/innovazione-tecnologica/ricerca-perdite/>, consultato il 10/08/2024

Analisi Termografiche, *Perdite acqua su lunghi tratti di tubazioni interrato*, <https://www.analistermografiche.net/ricerca-perdite/perdite-acqua-su-lunghi-tratti-di-tubazioni-interrate/>, consultato il 10/08/2024

Hansbrand, *AcquaTest T10*, <https://hansbrand.it/prodotto/aquatest-t10/>, consultato il 11/08/2024

EP S.r.l, *Perdite Idriche*, <https://www.epsas.it/perdite-idriche/>, consultato il 11/08/2024

ARW Misure, *Misuratore di portata ultrasuoni*, <https://www.arwmisure.it/flussimetro-arw-3000-misuratore-di-portata-ultrasuoni>, consultato il 11/08/2024

Ital Control Meters, *Misuratori di portata ultrasuoni*, <https://www.italcontrol.it/misure-di-portata-ultrasuoni/>, consultato il 12/08/2024

Endress+Hauser Italia S.p.A., *Misuratore di portata elettromagnetico*, <https://www.it.endress.com/it/panoramica-strumentazione-da-campo/Misura-di-portata/Proline-Promag-W-800-5W8C?t.tabId=product-overview>, consultato il 12/08/2024

Fuji Electric, *Misuratore di portata elettromagnetico a batteria*, <https://www.fujielectric.fr/it/tecnologie/misuratore-di-portata-elettromagnetico-stand-alone-m5000/>, consultato il 12/08/2024

Tecnova HT S.r.l., *Misuratore di Portata Elettromagnetico o Magnetico: come funziona?*, <https://tecnovaht.it/misuratore-di-portata-elettromagnetico/>, consultato il 12/08/2024

Sodo N., *Clamp-on flow meters: il funzionamento del flussimetro a ultrasuoni*, <https://www.selemark.it/ultrasuoni-clamp-on/>, consultato il 13/08/2024

Fuji Electric, *Vantaggi e svantaggi dei misuratori di portata a ultrasuoni e elettromagnetici*, <https://www.fujielectric.fr/it/blog/vantaggi-e-svantaggi-dei-misuratori-di-portata-a-ultrasuoni-e-elettromagnetici/>, consultato il 13/08/2024

WIKA Italia S.r.l. & C. sas, *Misuratore di portata*, [https://www.wika.com/it-it/flc\\_1222.WIKA](https://www.wika.com/it-it/flc_1222.WIKA), consultato il 13/08/2024

Lacroix, *Gestione dinamica delle pressioni*, <https://www.lacroix-environment.it/applicazioni/gestione-acqua/reti-distribuzione-acqua-potabile/gestione-dinamica-pressioni>, consultato il 13/08/2024

Pipecare S.r.l., *Sensori WLM*, <https://www.pipecareitalia.com/sensori-wlm>, consultato il 13/08/2024

Kamstrup, *Tecnologie di comunicazione*, <https://www.kamstrup.com/it-it/insights/tecnologie-di-comunicazione-acqua>, consultato il 14/08/2024

Pietro Fiorentini S.p.A., *Contatori acqua smart a ultrasuoni*, <https://www.fiorentini.com/it/category/soluzioni/prodotti/prodotti-per-lacqua/contatori-acqua/contatori-acqua-smart-a-ultrasuoni/>, consultato il 14/08/2024

ETRA S.p.A., *ETRA sempre più sostenibile e green... a suon di nuovi contatori*, 25/10/2022, <https://www.etraspa.it/area-stampa/comunicati-stampa/etra-sempre-pi%C3%B9-sostenibile-e-green-%E2%80%A6-suon-di-nuovi-contatori-0>, consultato il 14/08/2024

Rileva Perdite, *I gas traccianti, cosa sono e a cosa servono*, <https://www.rilevaperdite.com/gas-traccianti-cosa-cosa-servono/>, consultato il 14/08/2024

Barnabo' S., *Ricerca perdite con gas tracciante*, <https://www.barnaboh2o.it/ricerca-perdite-con-gas-tracciante/>, consultato il 14/08/2024

Di Nardo A., Di Natale M., *Criteri di distrettualizzazione delle reti idriche di distribuzione*, 06/2017, [https://www.researchgate.net/publication/318393089\\_CRITERI\\_DI\\_DISTRETTUALIZZAZIONE DELLE RETI IDRICHE DI DISTRIBUZIONE](https://www.researchgate.net/publication/318393089_CRITERI_DI_DISTRETTUALIZZAZIONE DELLE RETI IDRICHE DI DISTRIBUZIONE), consultato il 15/08/2024

Lacroix, *Distrettualizzazione e rilevamento delle perdite*, <https://www.lacroix-environment.it/applicazioni/gestione-acqua/reti-distribuzione-acqua-potabile/distrettualizzazione-rilevamento-perdite>, consultato il 15/08/2024

Frulli N., *Nuove Acque sempre più green: risparmiato il 4 per cento di acqua prelevato dall'ambiente*, 03/08/2018, <https://www.arezzone.it/green/nuove-acqui.html>, consultato il 15/08/2024

Wikipedia, *Decision support system*, 29/12/2023, [https://it.wikipedia.org/wiki/Decision\\_support\\_system](https://it.wikipedia.org/wiki/Decision_support_system), consultato il 16/08/2024

Rotella L., *Per trovare le perdite d'acqua negli acquedotti italiani si usa la tecnologia*, 04/11/2022, <https://www.greenplanner.it/2022/11/04/tecnologia-perdite-idriche-acquedotti/>, consultato il 16/08/2024

Ena Sud S.r.l., *SmartBall La strumentazione e la piattaforma*, [https://enasud.com/ricerca\\_perdite-smartball/](https://enasud.com/ricerca_perdite-smartball/), consultato il 16/08/2024

Xylem, *SmartBall e PipeDiver: verifica delle condutture senza interrompere il servizio*, 21/12/2020, <https://www.xylem.com/it-it/making-waves/water-utilities-news/xylem-smartball-pipediver-assess-pipeline-no-disrupting-service/>, consultato il 17/08/2024

Xylem, *Pure Technologies SmartBall Inline Free-Swimming Inspection Platform*,  
<https://www.xylem.com/en-us/products--services/pipeline-assessment/smartball-inline-free-swimming-inspection-platform/>, consultato il 17/08/2024

Water Research Centre Limited, *SmartBall Pipeline Inspection Technology*,  
<https://www.wrcgroup.com/services/smartball/>, consultato il 17/08/2024

Water Research Centre Limited, *Sahara Pipeline Inspection System*,  
<https://www.wrcgroup.com/services/sahara-pipeline-leakage-inspection/>, consultato il 17/08/2024

Pipecare S.r.l., *TALR (Trenchless Automated Leakage Repair)*,  
<https://www.pipecareitalia.com/talr-tech>, consultato il 18/08/2024

Curapipe, *Who Needs TALR?*, 2019, <https://www.curapipe.com/who-needs-talr>, consultato il 18/08/2024

2F Water Venture S.r.l., *ASTERRA*, <https://2fwaterventure.it/asterra-utilis/>, consultato il 18/08/2024

Servizi a Rete, *Onyax: Ricerca perdite acqua e gas con IoT e Intelligenza Artificiale*,  
05/07/2024, <https://serviziarete.it/onyax-ricerca-perdite-acqua-e-gas-con-iot-e-intelligenza-artificiale/>, consultato il 18/08/2024



## **Ringraziamenti**

In questo ultimo paragrafo di tesi, vorrei esprimere la mia gratitudine a tutte le persone che mi hanno aiutato nella sua realizzazione e per avermi sostenuto in questo percorso universitario.

In primo luogo, desidero ringraziare la mia relatrice Prof.ssa Claudia Zoccarato per aver accettato la mia proposta di tesi e per avermi seguito durante la sua redazione. Nonché, il Prof. Pietro Teatini per aver contribuito alla revisione del mio lavoro.

Un grazie va anche all'Ing. Valentina Ruzza per la disponibilità nel rispondere alle domande in merito all'argomento della mia tesi e per aver fornito il materiale utile per una maggiore comprensione del tema affrontato.

Desidero ringraziare specialmente i miei genitori, per avermi permesso di scegliere il mio percorso di studi, e avermi spronato a dare il massimo, anche nei momenti più difficili.

Un particolare grazie lo devo fare a mia sorella Elena e a mia nonna Gabriella, per avermi sempre incoraggiato molto in questi anni, le loro parole sono sempre state d'aiuto.

Un sincero grazie va a tutti i miei parenti che hanno mostrato interesse per i miei studi.

Voglio ringraziare i miei amici del corso di Università: Luca, Lorenzo, Alberto ed Elisa, per essere stati al mio fianco durante questo lungo periodo. Senza il loro supporto tutto sarebbe stato molto più difficile.

Infine, voglio ringraziare tutti i miei amici: Stefano, Giovanni, Giacomo, Edoardo, Mattia, Chiara, Giacomo, Anna, Tommaso, Marco, Luca, Giorgia, Andrea ed Eugenia. La vostra compagnia è davvero speciale e sono molto contento di farne parte.