CENTRO STUDI

TIM

Smart Infrastructure

Le infrastrutture italiane tra sfide e innovazione

2025

CENTRO STUDI

TIM

in collaborazione con

INTESA SANPAOLO INNOVATION CENTER

POLIMI SCHOOL OF MANAGEMENT | osservatori.net digital innovation

COMTEL Innovation

Centro Studi TIM

Con il contributo di INTESA SANPAOLO INNOVATION CENTER S.P.A.
Osservatori Digital Innovation del Politecnico di Milano
Comtel Innovation - Centro Studi e Insight

Roma, 27 novembre 2025

Salvo diversa indicazione, tutti i contenuti pubblicati sono soggetti alla licenza Creative Commons - attribuzione - versione 3.0.
https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/it/

INDICE

Introduzione 6

Le infrastrutture 8

CAPITOLO 1: Le infrastrutture civili 9

L'importanza delle infrastrutture civili 9
Infrastrutture civili ad alto impatto socioeconomico: reti di trasporto 10
Manutenzione e sicurezza delle Infrastrutture di trasporto: ANSFISA e AINOP 12
Un diverso modello di gestione delle infrastrutture di trasporto 14
Gestione e manutenzione dei ponti e dei viadotti 16
Gestione e manutenzione delle gallerie 18
Monitoraggio Infrastrutturale Intelligente: Origini, Evoluzione e Prospettive 19
Il cambiamento tecnologico nella gestione delle infrastrutture civili 23
Evoluzione tecnologica: i tre fattori chiave dello SHM 23
Le tecnologie chiave: dalla raccolta alla manutenzione intelligente 24
Evoluzioni ed innovazioni: nuove frontiere del monitoraggio 29
La Tecnologia DFOS 30
Monitoraggio satellitare 32
Tecnologie complementari 35
Le tecnologie non distruttive (NDT) 35

CAPITOLO 2: Le infrastrutture elettriche 41

Il ruolo delle smart grid nella nuova era energetica 41
Gli Energy Management System (EMS) 42
Evoluzione del quadro normativo e regolatorio 43
Componenti e tecnologie delle smart grid 44
Focus sulle tecnologie abilitanti 45

CAPITOLO 3: Le infrastrutture idriche 49

Monitoraggio intelligente delle reti idriche: la rivoluzione della digitalizzazione 49
Normativa e strategie europee 51
Tecnologie per il water monitoring 52

Lo scenario europeo 57

CAPITOLO 4: Lo sviluppo infrastrutturale nell'UE 58

Dalla "connettività fisica" alle «piattaforme abilitanti» 58
Anni '90 – Le fondamenta del mercato unico 58

Primi anni 2000 – Allargamento e digitalizzazione 59
Anni 2020 – Crisi, transizione e autonomia strategica 59
Le iniziative previste in Next Generation EU 60
Allocazione fondi RRF tra energia, trasporti e acqua 61
Un ambito di interesse crescente: la resilienza delle reti 65

CAPITOLO 5: Le infrastrutture nei principali Paesi UE 69
Dalla normativa europea alle realtà nazionali 69

Il mercato e i benefici 76

CAPITOLO 6: Il mercato del monitoraggio 77
Il monitoraggio delle infrastrutture 77
Mercato del monitoraggio delle infrastrutture civili 78
Infrastrutture civili 80
Mercato del monitoraggio delle infrastrutture elettriche 81
Settore elettrico 83
Mercato del monitoraggio delle infrastrutture idriche 84
Settore idrico 86
Smart Energy 87
Smart Road 89

CAPITOLO 7: Benefici economici 90
Principali motivazioni per l'adozione di soluzioni smart 90
I benefici derivanti dell'adozione delle tecnologie di monitoraggio intelligente 95
I benefici economici per le infrastrutture civili 95
I benefici economici per le reti elettriche 103
La riduzione dei costi delle reti idriche 106

CAPITOLO 8: I benefici per l'ambiente 110
Infrastrutture civili smart: ponti e strade più verdi 110
Impatto climatico del monitoraggio elettrico 112
I vantaggi ambientali dello smart metering e monitoring delle reti idriche 114
Conclusioni 116

APPENDICE 117
La Smart Infrastructure Challenge di TIM 117

Introduzione

Strade e ponti. Acquedotti e fognature. La civiltà romana si è fatta largo attraverso una fitta rete di infrastrutture, che hanno attraversato i secoli lasciando al mondo una testimonianza di grandezza, così come è accaduto per altre antiche civiltà asiatiche ed americane.

Quasi un paio di millenni dopo, grazie al vapore e alle scoperte del diciannovesimo secolo, una nuova stagione di sviluppo infrastrutturale ci ha portato ferrovie, gasdotti, reti elettriche e telefoniche, che hanno alimentato progresso e crescita economica.

Poi le reti sono diventate leggere, sfruttando i segnali radio che viaggiano nell'etere. Nelle nostre case sono arrivate in questo modo prima la radio e la tv, poi la voce e i dati. Le reti mobili hanno portato ovunque nel mondo la rivoluzione digitale.

Oggi le infrastrutture si stanno trasformando in reti intelligenti e sostenibili per diventare sempre più efficienti, ridurre gli sprechi, minimizzare i rischi, garantire una maggiore resilienza. Per questo si sovrappongono tra di loro, in alcuni casi si integrano e si innervano l'una all'altra, sfumando i confini che le separano. È una metamorfosi silenziosa ma radicale: il ponte, il porto, il tratto ferroviario conservano la forma che conosciamo, ma la loro natura cambia, proiettandoli in una dimensione infrastrutturale parallela.
Prendiamo una diga. È una struttura solida che sbarra un corso d'acqua, ne regola il flusso e crea un bacino idrico. Ma oggi è molto di più: genera energia idroelettrica, ospita impianti fotovoltaici galleggianti, fornisce acqua per produrre idrogeno e raffreddare data center. Può trasformare fiumi in vie navigabili, ospitare strade sulla cresta e antenne 5G per connettività avanzata. Grazie ai sensori, diventa un organismo sensibile che ascolta, misura e reagisce, permettendo monitoraggio remoto, sicurezza e manutenzione predittiva, ma anche un termometro che rileva gli stimoli dell'ambiente circostante come vibrazioni, variazioni di pressione, situazione climatica. Ecco, quindi, che una diga non è più solo un semplice sbarramento, ma si trasforma in una chiave di volta che tiene unite tra di loro reti idriche, energetiche, di trasporto, di telecomunicazioni, digitali e – grazie allo sviluppo tecnologico – si arricchisce di connotati che ne espandono la valenza e la rendono più funzionale.
La disponibilità dei dati, la potenza interpretativa, la rapidità delle connessioni, la sinergia tra droni e sensoristica trasforma le diverse reti in ecosistemi intelligenti ed interconnessi che dialogano tra loro e disegnano scenari dinamici, in cui ogni nodo diventa parte di un sistema più ampio ed è in grado di operare oltre la propria funzione

originaria, trasformando la complessità in opportunità condivise di crescita sostenibile.
Questo processo di cambiamento investe necessariamente tutto il tessuto infrastrutturale di un Paese che deve essere ripensato e riprogettato in una ottica differente rispetto al passato per adattarsi ad un contesto che cambia di continuo e propone sfide sempre differenti. In un clima geopolitico complesso come quello presente, ai temi della crescita e della sostenibilità si aggiunge quello della resilienza, dal momento che un sistema così pervasivo e fondamentale per le nostre società deve essere in grado di confrontarsi con i rischi crescenti di questo periodo storico.
Questo rapporto, realizzato dal Centro Studi TIM, con la collaborazione di Intesa Sanpaolo Innovation Center, Osservatori Digital Innovation del Politecnico di Milano e Comtel Innovation - Centro Studi e Insight, è dedicato ad osservare il processo di trasformazione delle reti strategiche del nostro Paese, con una particolare attenzione alle infrastrutture civili, idriche ed energetiche. Il robusto piano di ripresa e resilienza avviato per far ripartire i sistemi economici europei a seguito delle misure di contenimento della pandemia, ha dato un nuovo slancio agli investimenti infrastrutturali in Europa e in Italia.

In particolare, l'obiettivo di questo rapporto è focalizzato sugli aspetti relativi al monitoraggio digitale delle infrastrutture, un fattore essenziale per rendere realmente smart le risorse e i nodi delle reti e una leva strategica per la sicurezza, l'efficienza e la crescita sostenibile del Paese. Partendo da un esame della dotazione infrastrutturale italiana, il rapporto effettua una panoramica sulle principali evoluzioni tecnologiche che stanno modificando questi settori ed offre un dimensionamento del mercato del monitoraggio digitale delle reti. I piani di sviluppo in atto in Italia vengono messi a confronto con i processi di trasformazione avviati negli altri principali Paesi europei evidenziando un comune percorso verso infrastrutture più sicure, efficienti e sostenibili grazie al digitale. Attraverso una serie di esempi, vengono infine quantificati dei benefici che questa evoluzione potrebbe portare in termini di minori costi, sviluppo economico, sostenibilità e resilienza.
Il percorso di trasformazione delle infrastrutture che stiamo affrontando oggi va ben oltre il semplice aggiornamento tecnologico. È qualcosa di più profondo e complesso che investe le strategie di sviluppo, la competitività e la coesione sociale di un Paese. Oggi abbiamo l'opportunità, le tecnologie e le risorse per costruire un sistema infrastrutturale a prova di futuro. Le reti che aiuteranno le prossime generazioni ad affrontare le sfide economiche, ambientali e sociali di domani. Dobbiamo avere il coraggio di saper trasformare questa opportunità in cambiamento.

Prima parte

Le **infrastrutture**

CAPITOLO 1: Le infrastrutture civili

L'importanza delle infrastrutture civili

Le infrastrutture garantiscono servizi essenziali per il corretto funzionamento dell'economia: strade, ferrovie, porti, scuole, ospedali, ecc. La loro rilevanza è evidente se si considera che, nei Paesi industrializzati, rappresentano il 35-40% del patrimonio complessivo, costituendo una delle quattro grandi aree del settore delle costruzioni, insieme a edilizia, restauro e impiantistica.

Per una classificazione appropriata è necessario analizzare sia la funzione delle diverse strutture all'interno del sistema infrastrutturale, sia le loro caratteristiche distintive[1]. Tra le classificazioni presenti in letteratura, quella proposta da D. Biehl[2] in un suo lavoro del (1991) è particolarmente significativa in ottica di digitalizzazione e distingue tra:

- **Infrastrutture a rete**

  Comprendono tutti i sistemi diffusi sul territorio e caratterizzati da nodi interconnessi. Per essere efficienti, devono raggiungere ampie aree geografiche o un elevato numero di utenti.

  Esempi:

  reti di trasporto stradali e ferroviarie, reti di comunicazione, sistemi di distribuzione di energia elettrica, gas e acqua, vie navigabili e opere di difesa del suolo.

- **Infrastrutture puntuali**

  Sono strutture con elevata immobilità, indivisibilità, insostituibilità e polivalenza.

  Esempi:

  ospedali, scuole, musei, oltre alle infrastrutture di base come carceri, stazioni di polizia ed esercito, tribunali.

Secondo Biehl[3], le infrastrutture svolgono un ruolo determinante nello sviluppo di un'area geografica, misurabile in termini di reddito, produttività e occupazione:

> ***«Una regione ben dotata di infrastrutture avrà un vantaggio competitivo rispetto a una meno attrezzata, traducendosi in un PIL pro-capite più elevato e/o in maggiori livelli occupazionali. Di conseguenza, produttività, redditi e occupazione regionale crescono al crescere della dotazione infrastrutturale».*** ***(Biehl, 1991)***

Inoltre, le infrastrutture sono tra i fattori di sviluppo regionale su cui i decisori politici possono intervenire direttamente, evidenziando la necessità di quantificare la loro effettiva presenza sul territorio[4].

Infrastrutture civili ad alto impatto socioeconomico: reti di trasporto

Tra le infrastrutture che supportano direttamente la produzione, oltre alle reti per la distribuzione di energia e gas, quelle per la captazione e distribuzione dell'acqua, le reti fognarie e di telecomunicazioni (inclusa la connettività Internet e la banda larga), rientrano le infrastrutture di trasporto, progettate per migliorare la mobilità di persone e merci e favorire lo sviluppo socioeconomico e la competitività dei territori. Si distinguono tre tipologie principali:

- Infrastrutture stradali: strade urbane, extraurbane e autostrade.
- Infrastrutture ferroviarie: reti nazionali, regionali e metropolitane.
- Infrastrutture aeroportuali: aeroporti e porti per il trasporto marittimo.

Per quantificare le infrastrutture stradali e ferroviarie in Italia un utile riferimento è il rapporto realizzato dall' Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali e Autostradali ANSFISA.

Secondo le ultime rilevazioni, il Paese dispone di oltre 840.000 km di rete stradale, oltre 60.000 ponti e più di 2.200 gallerie[5]. L'Italia detiene il primato nell'Unione Europea per numero di gallerie stradali e ferroviarie.

Inoltre, la rete ferroviaria nazionale e regionale si estende per circa 18.900 km, con 5.443 passaggi a livello, 288 stazioni e 225 km di linee di trasporto rapido di massa (metropolitane), di cui 131,6 km in galleria[6].

Un patrimonio infrastrutturale ampio

L'Italia detiene il primato nell'Unione Europea per numero di gallerie stradali e ferroviarie.

Il patrimonio infrastrutturale da gestire è quindi estremamente ampio, con oltre 8.000 soggetti tra gestori e imprese che erogano servizi. Degli 840.000 km di rete stradale, solo poco più di 35.000 km (circa il 4%) sono strade statali e autostrade; la maggior parte, circa l'80%, è gestita dai Comuni, che contano 7.904 gestori. Seguono 123 gestori di strade provinciali, regionali e delle città metropolitane, responsabili del 16% della rete. In sintesi, oltre il 96% delle strade italiane è sotto la gestione degli enti locali, mentre il restante 4% è affidato a gestori nazionali come Anas S.p.A. (Gruppo FS Italiane) e le società concessionarie autostradali[7].

Una eccessiva polverizzazione gestionale

oltre 8.000 soggetti tra gestori e imprese

Secondo il rapporto UPI del 27/08/2018, le Province delle Regioni a Statuto Ordinario (escluse le città metropolitane) amministrano circa 100.000 km di strade, su cui insistono almeno 30.000 infrastrutture tra ponti, viadotti e gallerie[8]. La manutenzione della rete stradale e autostradale non a pedaggio di interesse nazionale è affidata ad Anas S.p.A. tramite concessione e convenzione con il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2002). Attualmente Anas gestisce oltre 32.000 km di strade e autostrade, 18.720 ponti e viadotti e 2.157 gallerie[9]. Più di 8.000 km sono invece gestiti dalle concessionarie autostradali, di cui 4.187 km appartengono alla rete TEN-T (Reti di Trasporto Trans-europee). Tuttavia, le condizioni di queste opere sono note in modo completo solo per il 10%[10].

Una prima ricognizione di ANSFISA su circa 800.000 km di rete stradale (regioni, province, città metropolitane e comuni) ha evidenziato dati incompleti e spesso carenti. La stratificazione normativa, i frequenti cambi di gestione e la vetustà delle opere rendono difficile avere informazioni certe sulla rete e sulle sue caratteristiche. Le ultime rilevazioni sul sistema viario comunale risalgono al 1999, indicando circa 668.000 km di strade comunali e oltre 135.000 km di strade provinciali e regionali. Mancano anche dati qualitativi, indispensabili per definire moderni Sistemi di Gestione della Sicurezza. ANSFISA ha avviato una ricognizione coinvolgendo gli enti locali per raccogliere informazioni sulla rete di competenza[11].

Secondo il Codice della Strada, gli enti proprietari sono responsabili della manutenzione, gestione e pulizia delle strade e delle relative pertinenze, nonché della segnaletica e del controllo tecnico dell'efficienza. In generale, la sicurezza delle infrastrutture è responsabilità diretta dei gestori[12].

Una conoscenza incompleta e carente.

La stratificazione normativa, i frequenti cambi di gestione e la vetustà delle opere rendono difficile avere informazioni certe

Manutenzione e sicurezza delle Infrastrutture di trasporto: ANSFISA e AINOP

Le infrastrutture, con il tempo e l'uso, subiscono un naturale processo di usura che, se non gestito, porta a un deterioramento del patrimonio con conseguenze negative sull'economia, sulla sicurezza degli utenti, sull'efficienza dei servizi e con costi di ricostruzione sempre più elevati. La manutenzione ha come obiettivo principale la conservazione del bene nel tempo. Le infrastrutture civili – strade, ponti, gallerie – che costituiscono la rete di trasporto di persone, merci e servizi (acquedotti, gasdotti, elettrodotti, reti di telecomunicazione) sono state realizzate nell'arco di oltre 70-90 anni. Uno studio del Politecnico di Milano di qualche anno fa stimava che in In Italia ci fossero almeno 1.900 ponti che presentavano "altissimi rischi strutturali" sui 61.000 esistenti nel Paese[13].

Elevato rischio di deterioramento.

Circa 1.900 ponti che presentavano "altissimi rischi strutturali" sui 61.000 esistenti nel Paese.

Le criticità principali derivano dall'elevato numero di variabili: materiali, dimensioni, epoca di costruzione, mancanza di informazioni dettagliate su molte opere e difficoltà nel definire criteri di valutazione e gestione uniformi. A ciò si aggiunge la carenza di risorse economiche e di personale qualificato per effettuare rilievi e ispezioni approfondite sull'intero parco infrastrutturale. Gli enti gestori devono operare con budget limitati, mantenendo le opere in esercizio senza interrompere il servizio, partendo da una fase conoscitiva sullo stato attuale e passando poi alla programmazione e realizzazione degli interventi.

La necessità di investire in conoscenza e risorse per la manutenzione è cresciuta negli ultimi anni, sia per la maggiore consapevolezza sullo stato delle infrastrutture sia per l'evoluzione normativa, stimolata purtroppo da una grave tragedia, il crollo del ponte Morandi, che ha stimolato l'adozione di pratiche manutentive e progettuali già possibili da anni ma non ancora implementate. All'indomani del crollo è stato infatti varato il cosiddetto Decreto Genova, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale il 19 novembre del 2018, che, pur non essendo una Normativa per le costruzioni, è un traguardo importante nella storia italiana per la salvaguardia delle grandi opere. Il Decreto contiene informazioni riguardo il monitoraggio strutturale delle opere pubbliche introducendo la tecnologia 5G ed utilizzando strumentazioni più innovative. Il Ministero ha l'obbligo di adottare piani straordinari per opere con maggiori criticità, individuando degli ordini di priorità in base alla pericolosità territoriale e di vulnerabilità.

Svolta dopo la tragedia del ponte Morandi. *Italia accelera su monitoraggio e innovazione, istituendo ANSFISA e AINOP per tutelare le grandi opere pubbliche*

Proprio al fine di gestire in modo corretto e coerente questo processo, è stata creata ANSFISA[14] (art.12), che tra i vari compiti ha anche quello di redigere un

piano nazionale per l'adeguamento e lo sviluppo delle infrastrutture stradale ed autostradali, al fine di garantirne la sicurezza.

L'Agenzia ANSFISA, operativa dal 30 novembre 2020, ha incorporato l'ANSF (Agenzia per la Sicurezza delle Ferrovie), trasferendo il know-how ferroviario al settore stradale, autostradale e dei trasporti rapidi di massa[15]. Il suo compito è vigilare sulle condizioni di sicurezza delle infrastrutture. L'agenzia, con il supporto di ANCI (Associazione Nazionale Comuni Italiani) e UPI (Unione Province Italiane), sta promuovendo l'adozione di sistemi di gestione, monitoraggio e controllo, accompagnando i gestori – soprattutto quelli con minori risorse – nell'implementazione di Sistemi di Gestione della Sicurezza efficaci[16].

Gli obiettivi di ANSFISA sono innalzare gli standard di sicurezza delle infrastrutture terrestri, certificare e pianificare gli interventi di manutenzione, oltre a digitalizzare e potenziare i processi di verifica, favorendo l'adozione di strategie di manutenzione preventiva. Per attuare tale strategia è indispensabile una mappatura completa delle opere, basata su criteri di classificazione certi.

Sicurezza delle strade italiane: i risultati del primo rapporto ANSFISA

La costituzione di ANSFISA ha portato ad una prima fotografia dello stato di salute delle infrastrutture viarie e ferroviarie italiane. Secondo il rapporto 2020 il 90% della rete autostradale disponeva di un sistema di gestione certificato.

- Tra le certificazioni più diffuse:
- ISO 9001 – Gestione per la qualità
- ISO 14001 – Gestione ambientale
- ISO/IEC 27001 – Sicurezza delle informazioni
- ISO 45001 – Salute e sicurezza sul lavoro
- UNI ISO 39001 – Sicurezza stradale

La norma ISO 39001 definisce lo standard internazionale per la gestione della sicurezza stradale, includendo gestione del rischio e conformità normativa. L'adozione di un Road Traffic Management System certificato ISO 39001 contribuisce alla riduzione degli incidenti gravi.

Il sistema consente il monitoraggio costante delle attività e dei processi correlati, con obiettivi di prevenzione, controllo e miglioramento continuo. È destinato a società di trasporto, manutenzione stradale, logistica e aziende con flotte aziendali.

In parallelo all' ANSFISA è stato creato un archivio informatico nazionale delle opere pubbliche (AINOP[17]), istituito dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti con la legge n. 130 del 16 novembre 2018 e il D.M. n. 430 dell'8 ottobre 2019. L'AINOP ha lo scopo di censire l'intero patrimonio di opere pubbliche di competenza di enti statali, regionali, locali, province autonome, città metropolitane e comuni, identificando ogni opera pubblica con un codice; esso fa riferimento: ai dati tecnici, lo stato e il grado di efficienza, l'attività di manutenzione ordinaria e lo stato dei lavori.

L'AINOP è gestito tramite una piattaforma digitale che consente di identificare l'opera e la sua collocazione territoriale[18], fornendo strumenti per il monitoraggio tecnico, la prevenzione delle criticità e l'attivazione di sistemi intelligenti di allerta. Inoltre, permette di visualizzare un "fascicolo virtuale" dell'opera, utile per individuare le infrastrutture da mettere in sicurezza e per definire le priorità.

***Svolta dopo la tragedia del ponte Morandi**. Italia accelera su monitoraggio e innovazione, istituendo ANSFISA e AINOP per tutelare le grandi opere pubbliche*

Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche

Nove sezioni specializzate per monitorare lo stato delle infrastrutture civili italiane

L'AINOP è organizzato in 9 sezioni:

- Ponti, viadotti e cavalcavia stradali
- Ponti, viadotti e cavalcavia ferroviari
- Strade
- Ferrovie nazionali, regionali e metropolitane
- Aeroporti
- Dighe e acquedotti
- Gallerie ferroviarie e stradali
- Porti e infrastrutture portuali
- Edilizia pubblica

Ogni sezione è suddivisa in sottosezioni che raccolgono dati anagrafici, informazioni tecniche e storiche, dati economico-finanziari, elementi sulla gestione e sulla sicurezza, monitoraggi continui tramite sensori e rilevazioni satellitari, stato di efficienza, attività di manutenzione ordinaria e straordinaria, documentazione fotografica e segnalazioni

Un diverso modello di gestione delle infrastrutture di trasporto

La gestione della manutenzione delle infrastrutture viarie non deve limitarsi alla gestione delle emergenze e al ripristino, ma includere attività di analisi del rischio e valutazione preventiva. L'obiettivo è privilegiare interventi mirati rispetto a manutenzioni indiscriminate, fornendo linee guida per orientare i grandi investimenti oggi destinati alla sicurezza e alla conoscenza.

Questo è possibile grazie alla digitalizzazione delle infrastrutture, integrata con sistemi di monitoraggio il cui costo è ormai trascurabile rispetto alla costruzione di nuove opere.

Tali sistemi consentono misurazioni in tempo reale che, opportunamente analizzate, forniscono informazioni utili ai gestori.

Dalla gestione delle emergenze alla valutazione preventiva.
interventi mirati e tempestive grazie alla digitalizzazione delle infrastrutture

Infrastrutture più efficienti e sostenibili grazie ai fondi europei del PNRR

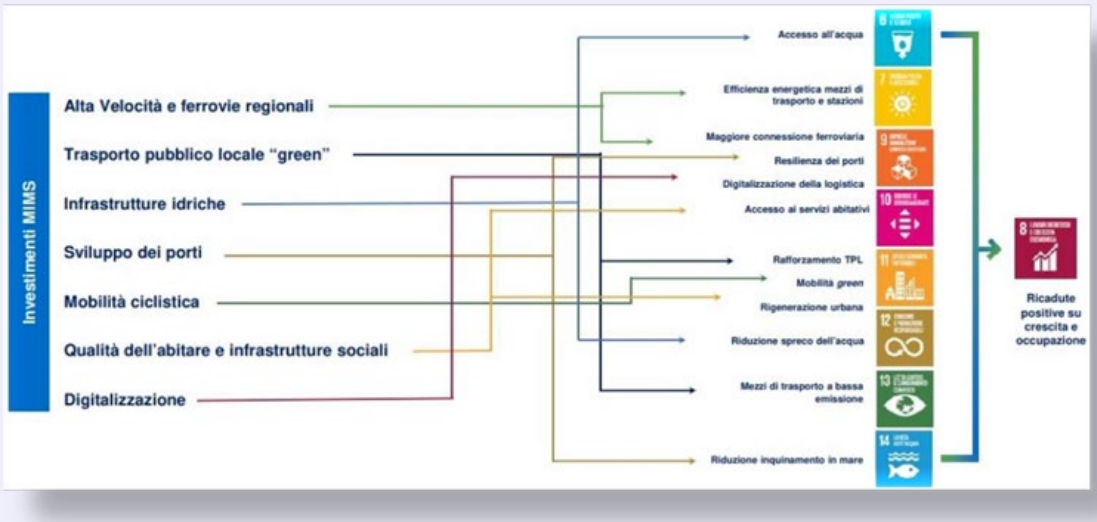
Per innovare il sistema di gestione delle infrastrutture, l'Italia ha potuto beneficiare degli investimenti previsti dal Next Generation EU (NGEU), che destina risorse senza precedenti alla transizione digitale e alla sostenibilità, creando le condizioni per integrare innovazione tecnologica e governance infrastrutturale.

L'Italia è il principale beneficiario dei due strumenti cardine del NGEU: il Dispositivo per la Ripresa e Resilienza (RRF) e il Pacchetto REACT-EU. Il RRF mette a disposizione 191,5 miliardi di euro da utilizzare entro il 2026. Per accedere a tali risorse, il governo italiano ha presentato alla Commissione Europea il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) il 30 aprile 2021, contenente progetti, investimenti e riforme con criteri di allocazione e scadenze, approvati dall'UE.

A queste risorse si aggiungono quelle del Piano complementare nazionale, con obiettivi analoghi ma orizzonte temporale più ampio.

Durante l'attuazione del PNRR, il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) è responsabile della gestione complessiva del Piano e dell'assegnazione delle risorse ai soggetti attuatori: Regioni, Province autonome, enti locali, concessionari e altre autorità o aziende coinvolte nella realizzazione degli interventi e nell'ammodernamento del sistema dei trasporti per uno sviluppo sostenibile, per il perseguimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030

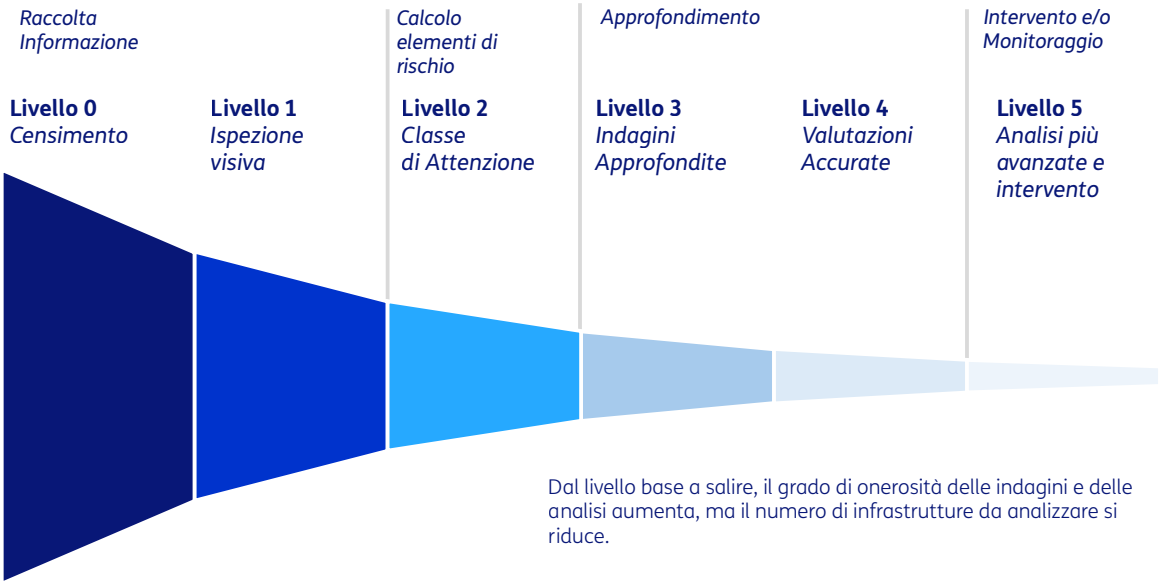
Analisi degli investimenti del MIT in relazione agli obiettivi dell'Agenda 2030



Fonte: MIT - Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Gestione e manutenzione dei ponti e dei viadotti

Nel 2020 il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ha emanato le Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti che riguardano la gestione della sicurezza dei ponti e dei viadotti esistenti[19]. L'obiettivo è garantire che queste infrastrutture siano monitorate e mantenute in condizioni sicure attraverso tre attività principali: il censimento e la classificazione del rischio, la verifica della sicurezza e il monitoraggio continuo. Poiché in Italia il numero di ponti è molto elevato e le loro caratteristiche sono complesse, è stato adottato un approccio multilivello che partendo dalla raccolta delle informazioni di base, calcola la Classe di Attenzione (CdA) dell'opera e identifica il livello dei controlli, in funzione della criticità rilevata. Infine, l'ultimo capitolo delle Linee Guida, traduce i risultati dei livelli precedenti e la CdA in azioni concrete di sorveglianza, monitoraggio e manutenzione, garantendo un approccio continuo e mirato alla sicurezza dei ponti. (vedi scheda)



Dal livello base a salire, il grado di onerosità delle indagini e delle analisi aumenta, ma il numero di infrastrutture da analizzare si riduce.

La classe di attenzione (CdA) è il cuore del sistema: ogni ponte viene inserito in una delle cinque categorie, dalla più alta alla più bAassa, in ordine di priorità:
Classe Alta;
Classe Medio – Alta;
Classe Media;
Classe Medio – Bassa;
Classe Bassa.

Le categorie di rischio considerate rilevanti sono: strutturale e fondazionale, sismico, frane ed idraulico; ad ognuno di essi è associata una CdA.
Per ogni tipologia di rischio si individuano dei fattori primari e secondari e se ne calcola: la vulnerabilità, la pericolosità e l'esposizione.
I ponti con classe alta richiedono interventi immediati, modelli strutturali dettagliati e sistemi di monitoraggio continuo per prevenire situazioni di rischio.
Le classi intermedie prevedono controlli periodici, ispezioni straordinarie in caso di degrado e, se necessario, approfondimenti.
Per le classi più basse, invece, sono sufficienti ispezioni regolari senza ulteriori analisi.

Dalla valutazione del rischio alla gestione

Le Linee Guida riportano anche le indicazioni, i criteri e i requisiti minimi delle procedure per pianificare ed effettuare le attività di gestione della sicurezza strutturale dei ponti esistenti

Le attività di gestione si articolano in 3 ambiti principali: sorveglianza, controllo, ispezione e monitoraggio.

Le ispezioni periodiche ed il monitoraggio strutturale hanno lo scopo di consentire la valutazione dello stato di condizione dell'opera in modo da poterne stimare: lo stato di danneggiamento istantaneo e l'evoluzione nel tempo dei fenomeni di danno effettuando delle analisi predittive. I sistemi operativi del sistema di sorveglianza e monitoraggio seguono una strategia "riskbased", cioè dipendente dalla Classe di Attenzione caratteristica del ponte.

Esse comprendono:

- Ispezioni periodiche ordinarie o straordinarie;
- Indagini non distruttive e semi distruttive;
- Prove di carico statiche e rilievi della risposta dinamica;
- Monitoraggio strumentale;
- Algoritmi di analisi e interpretazione dei dati;
- Modelli rappresentativi del comportamento reale;
- Indici dello stato di condizione e modelli di degrado;
- Basi dati informatiche.

Ispezioni periodiche ordinarie

effettuate con una frequenza minima in funzione della Classe di Attenzione del ponte e dello storico delle ispezioni. Diverse a seconda se si riferiscono a strutture già inserite in un sistema di sorveglianza oppure a ponti nuovi o in esercizio da tempo che non hanno mai ricevuto controlli regolari. Si svolgono principalmente in modo visivo, supportate da strumenti che permettono di individuare e documentare difetti, anche attraverso fotografie e piattaforme digitali. Quando si utilizzano droni o mezzi robotizzati, i dati devono essere geolocalizzati e riferiti con precisione all'elemento analizzato.

Ispezioni straordinarie

per approfondire i fenomeni di degrado già rilevati. Da eseguire entro 60 giorni dalla segnalazione di un danno in evoluzione, oppure entro intervalli massimi di 5 anni per le opere meno critiche e 2 anni per quelle più importanti. Devono essere documentate e caricate sulle piattaforme di gestione. In alcuni casi, durante le ispezioni straordinarie si possono effettuare prove di carico e analisi dinamiche, utili per confrontare i dati reali con i modelli teorici, aggiornare i parametri e interpretare eventuali anomalie. I risultati vengono raccolti in file dedicati.

Monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring)

ha lo scopo di individuare precocemente eventuali danni, grazie a reti di sensori e sistemi hardware/software che registrano parametri come deformazioni e accelerazioni, elaborandoli in modo automatico per garantire interventi tempestivi e migliorare la sicurezza delle infrastrutture.

Gestione e manutenzione delle gallerie

Nel 2022, il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ha emanato le Linee Guida per la classificazione e la gestione del rischio delle gallerie esistenti in analogia a quelle già predisposte per i ponti[20] una misura che si integra alle altre norme sulla sicurezza stradale e sulla sicurezza antincendio[21]. Le Linee Guida si applicano alle gallerie stradali con lunghezza pari o superiore a 200 metri, inclusi fornici, gallerie artificiali, paramassi e sottopassi. Per opere più corte, l'applicazione è valutata caso per caso, soprattutto in presenza di criticità idrauliche. Per i trafori internazionali, la gestione è affidata alle Commissioni intergovernative.

L'obiettivo principale è standardizzare le metodologie di intervento, la programmazione e la classificazione. Anche in questo caso, le Linee Guida introducono un approccio multicriterio e multilivello, che ha rivoluzionato la gestione delle infrastrutture: si parte dal censimento e dalle valutazioni preliminari per attribuire a ogni opera una classe di attenzione, da cui derivano analisi più approfondite, anche con tecnologie innovative come droni, sensori, fibre ottiche e sistemi di intelligenza artificiale (AI).

Il processo è simile a quanto già descritto per ponti e viadotti, con un sistema basato su sei livelli progressivi e quattro classi di attenzione (Bassa, medio-bassa, medio-alta e alta). Le differenze sono ovviamente legate alle caratteristiche specifiche di queste opere rispetto a ponti e viadotti. Ad esempio, per le gallerie assumono un'importanza superiore, già in fase di ispezione, aspetti come le caratteristiche geomorfologiche, idrogeologiche. Nella Classi di Attenzione si valutano fattori di rischio specifici come quelli legati allo stato degli impianti di illuminazione, di ventilazione ed ai sistemi antincendio nonché eventuali dissesti locali del rivestimento e le interazioni con le formazioni naturali.

Come si gestivano le gallerie prima del 2022

Un percorso tra le regole e le prime azioni di manutenzione preventiva

Prima del 2022, chi si occupava delle gallerie seguiva diverse regole, basate su leggi generali come le NTC 2018, il Nuovo Codice della Strada (D.Lgs 30.04.1992 n. 285) e altri regolamenti tecnici legati alla costruzione e manutenzione delle strade.

Queste leggi includevano anche norme sui contratti pubblici e aggiornamenti fino al 2021.

Il primo passo importante verso una manutenzione programmata risale al 19 luglio 1967, dopo il crollo del ponte di Ariccia. In quella data, il Ministero dei Lavori Pubblici ha emesso una circolare con le regole per controllare la stabilità delle strutture stradali, indicando quando e come fare le ispezioni e promuovendo così la manutenzione preventiva come una pratica fondamentale.

Il monitoraggio è spesso più articolato e richiede un'attenzione particolare per la rilevazione di fumi e della temperatura, oltre a ispezioni periodiche degli spazi interni.

La sicurezza deve essere affrontata a livello territoriale, definendo priorità in base al rischio della singola opera e alla resilienza della rete e le valutazioni su eventuali interventi tengono conto anche dell'impatto socioeconomico di eventuali interruzioni. Dopo eventi eccezionali (urti, incendi, sismi) sono previste ispezioni straordinarie. Il Responsabile della galleria, con il supporto di esperti e ispettori, gestisce il programma delle attività, dalla fase di censimento alla pianificazione delle indagini e monitoraggi, inserendo tutto nel Documento integrativo del piano di manutenzione.

Monitoraggio Infrastrutturale Intelligente: Origini, Evoluzione e Prospettive

Come abbiamo visto le infrastrutture civili – ponti, viadotti, gallerie – sono elementi strategici per la mobilità e la sicurezza di un Paese. Tuttavia, l'invecchiamento delle opere, l'aumento dei carichi di traffico e le mutate condizioni ambientali impongono un ripensamento delle strategie di manutenzione. Molte di queste opere hanno un'età prossima alla vita ultima stimata e sono progettate con delle normative oramai superate; un possibile collasso potrebbe portare a possibili perdite umane e conseguenze sociali ed economiche rilevanti essendo delle strutture strategiche. Questo comporta l'esigenza di controllare il comportamento strutturale attraverso strumentazioni digitali da poter interrogare continuamente, rispetto ad altri metodi che richiedono la presenza in situ. In questo contesto nasce il monitoraggio infrastrutturale intelligente, noto anche come Structural Health Monitoring (SHM), che rappresenta una rivoluzione nel modo di gestire e preservare le grandi opere. Esso è chiaramente richiamato e citato nelle linee guida le 2020 e del 2022.

***Svolta dopo la tragedia del ponte Morandi**. Italia accelera su monitoraggio e innovazione, istituendo ANSFISA e AINOP per tutelare le grandi opere pubbliche*

Il concetto di monitoraggio strutturale nasce negli anni '80 e '90 come risposta alla crescente necessità di valutare quantitativamente le condizioni delle infrastrutture. Inizialmente, lo SHM era considerato un tema di ricerca applicata, con sperimentazioni limitate a progetti pilota e strutture di particolare rilevanza scientifica[22].

Le prime applicazioni riguardavano ponti e dighe, con sistemi basati su sensori cablati e acquisizioni manuali. L'obiettivo era verificare ipotesi progettuali e ridurre il rischio di collassi improvvisi. Tuttavia, la complessità dei sistemi e i costi elevati ne limitavano la diffusione.

Negli anni 2000, grazie ai progressi nelle tecnologie di sensori e comunicazioni, lo SHM ha iniziato a evolversi verso soluzioni più pratiche e scalabili. L'introduzione di reti wireless, sensori in fibra ottica e sistemi distribuiti ha ridotto i costi di installazione e manutenzione, favorendo l'adozione su larga scala[23].

Il monitoraggio infrastrutturale intelligente è un sistema integrato che utilizza sensori permanenti, reti di trasmissione dati e algoritmi di analisi per valutare in tempo reale lo stato di salute delle strutture. A differenza delle ispezioni visive tradizionali, soggettive e dispendiose, lo SHM consente di acquisire dati oggettivi e continuativi su grandezze fisiche come vibrazioni, spostamenti, tensioni e variabili ambientali (temperatura, umidità, vento)[24].

Questi dati vengono elaborati con approcci data-driven e, in alcuni casi, con modelli predittivi, per individuare anomalie, stimare la vita residua e pianificare interventi mirati[25]. L'obiettivo è passare da una manutenzione reattiva a una manutenzione predittiva, riducendo costi e aumentando la sicurezza.

L'idea alla base del monitoraggio strutturale è quella di creare sistemi autonomi capaci di controllare in modo continuo le opere, consentendo ispezioni da remoto e la rilevazione immediata di eventuali danni con il minimo intervento umano. Non si tratta solo di individuare il danneggiamento quando si verifica, ma anche di comprenderne l'evoluzione, così da stimare la vita utile residua della struttura e pianificare interventi di manutenzione che ne prolunghino la durata.

I sistemi di Structural Health Monitoring (SHM) stanno conoscendo una rapida diffusione: sempre più spesso le nuove infrastrutture vengono progettate integrando sensori e tecnologie digitali, trasformando il ponte in un vero e proprio "organismo intelligente". Grazie alla combinazione di computer vision, sensori avanzati, telecamere intelligenti e algoritmi di intelligenza artificiale, è possibile analizzare in tempo reale ciò che accade alla struttura e prevenire fenomeni di degrado. Questi sistemi, elaborando continuamente i dati raccolti, possono inviare allarmi immediati ai gestori, permettendo interventi tempestivi e mirati.

Il monitoraggio strutturale non si limita alle opere nuove o esistenti, ma trova applicazione in diversi scenari: dal controllo di strutture interessate da lavori esterni o demolizioni, alla valutazione di spostamenti a lungo termine e fenomeni di fatica dei materiali. Può essere utilizzato per verificare l'integrità dopo eventi sismici, per analizzare il declino delle costruzioni e pianificare la manutenzione, fino a fornire un ciclo di feedback utile a migliorare la progettazione futura. In questo modo si favorisce un approccio basato sulla prestazione, orientato alla sicurezza e alla durabilità delle infrastrutture. Il monitoraggio strutturale può variare in funzione di una serie di parametri (tempi, estensione, modalità, tecnologie) e risulta quindi un approccio adattabile a diversi contesti.

Categoria	Sottotipo	Descrizione	Caratteristiche	Esempi
ORIZZONTE TEMPORALE In base alla tempistica del monitoraggio	BREVE TERMINE	Controllo temporaneo con sensori che restano in funzione per periodi brevi. Serve per ottenere informazioni puntuali o seguire interventi specifici.	Interventi mirati, durata breve, quantità di dati raccolti limitata	Demolizioni, lavori di risanamento
	LUNGO TERMINE	Sistemi permanenti per analisi prolungate. Indicato per degrado lento o studio del comportamento complessivo.	Grande quantità di dati raccolti, utilizzo di strumenti sofisticati di rilevazione.	Formazione di fessure, assestamento fondazioni
ESTENSIONE Definisce se il monitoraggio riguarda l'intera struttura o singoli elementi.	GLOBALE	Analisi dell'intera struttura.	Comportamento complessivo.	Vibrazioni
	LOCALE	Osservazione di danni su singoli elementi.	Dettaglio su elementi critici.	Propagazione di fessure, deformazione di campate
MODALITÀ Si riferisce alla frequenza e al tipo di fenomeni osservati.	STATICO	Parametri che cambiano lentamente (temperatura, umidità, spostamenti).	Misurazioni lente e regolari.	Rilevazioni ogni ora
	DINAMICO	Fenomeni rapidi (vibrazioni). Si possono utilizzare due strategie: misurazioni a intervalli regolari (12-24 ore) con frequenze elevate (circa 200 Hz) per definire un modello di comportamento oppure misurazioni attivate ad un superamento di soglia (trigger).	Analisi evoluzione dinamica, rilevamento anomalie.	Vibrazioni da traffico, passaggio veicoli pesanti
TECNOLOGIE DI MONITORAGGIO STRUTTURALE In funzione delle soluzioni tecnologiche	WIRED	Comunicazione via cavo (fili, coassiali, fibre ottiche). Vantaggi: alta banda, maggiore affidabilità. Svantaggi: costi elevati, complessità.	Metodi sofisticati (vibrazioni, fusione dati).	Williamsburg Bridge, Manhattan Bridge
	WIRELESS	Comunicazione senza fili. Vantaggi: installazione semplice, costi ridotti. Svantaggi: banda limitata, perdita segnale.	Facilità di manutenzione, integrazione IoT e 5G.	Accelerometri, inclinometri

In particolare, le tecnologie utilizzate per la rilevazione rappresentano un fattore chiave.

I sistemi di monitoraggio strutturale wired offrono diversi vantaggi: trasmissione dei dati su lunghe distanze senza perdita di segnale, operazioni rapide e ampia capacità di banda. Inoltre, possono integrare sensori avanzati, come quelli in fibra ottica e sensori intelligenti, per rilevare lo stato della struttura. Questo riduce il rischio di perdita di dati e supporta metodi sofisticati di analisi, come quelli basati sulle vibrazioni, sulla fusione dei dati e sull'impedenza. Negli ultimi anni, l'adozione di sensori avanzati in sistemi cablati è cresciuta significativamente. Tuttavia, questi sistemi sono più costosi rispetto a quelli wireless, poiché richiedono una rete complessa di cavi e connettori. Inoltre, durante la costruzione, i cavi possono subire danni, aumentando i costi di manutenzione e riparazione. Negli Stati Uniti, sistemi cablati sono stati installati su diversi ponti importanti, come il Williamsburg Bridge, il Saint Anthony Falls Bridge e il Manhattan Bridge.

I sistemi di monitoraggio strutturale wireless, utilizzano tecnologie senza fili per collegare i sensori e raccogliere dati in tempo reale. Questi sensori sono

autonomi e possono essere integrati con strumenti tradizionali come accelerometri e inclinometri. I sistemi wireless offrono vantaggi significativi: facilità di installazione, costi ridotti e maggiore flessibilità. Eliminando i cavi, si semplifica la manutenzione e diventa più semplice aggiungere o spostare sensori. Inoltre, sono altamente integrati e richiedono pochi componenti di supporto, riducendo la complessità complessiva. Le criticità dei sistemi wireless sono riferite alla limitata larghezza di banda, alla possibilità di perdita di segnale e problemi di alimentazione. Tuttavia, l'integrazione di tecnologie avanzate come IoT e 5G, insieme alla crescente attività di ricerca e sviluppo, sta contribuendo a superare queste difficoltà. L'evoluzione verso reti wireless più efficienti e affidabili è destinata a favorire una diffusione sempre maggiore di queste soluzioni nel monitoraggio strutturale.

Il cambiamento tecnologico nella gestione delle infrastrutture civili

Evoluzione tecnologica: i tre fattori chiave dello SHM

Negli ultimi anni, l'evoluzione dello SHM è stata guidata da tre fattori principali:

- lo sviluppo di sensoristica avanzata. Dai tradizionali estensimetri e accelerometri si è passati a sensori in fibra ottica, capaci di misurare deformazioni e temperatura lungo intere strutture. Questi sensori offrono elevata precisione e resistenza agli agenti ambientali, risultando ideali per ponti e gallerie[26].
- La pervasività di reti di comunicazione wireless. Le reti wireless hanno eliminato la complessità dei cablaggi, consentendo la creazione di sistemi auto-organizzanti, scalabili e resilienti. Questo ha permesso di integrare sensori per variabili ambientali e operative, riducendo falsi allarmi e migliorando l'accuratezza delle analisi[27]. Per comprendere meglio l'ambiente e analizzarlo in modo più sistematico, le reti di sensori su larga scala, composte da nodi a basso consumo energetico e con capacità di elaborazione e memoria limitate, stanno avendo notevoli applicazioni. Applicazioni potenzialmente valide delle reti di sensori wireless includono sicurezza militare, rilevamento fisico, monitoraggio del traffico, automazione industriale, controllo del traffico aereo,

Reti di sensori wireless auto-organizzanti

per monitoraggio ambientale e prevenzione danni

Le reti wireless eliminano la complessità dei cablaggi e consentono la creazione di sistemi auto-organizzanti, scalabili e resilienti. Inoltre permettono di integrare sensori per variabili ambientali (es. vento, temperatura, umidità) e variabili operative (es. carichi da traffico), riducendo falsi allarmi e migliorando l'accuratezza delle analisi

Un esempio concreto è dato dall'applicazione di reti di sensori wireless collegati con IoT nel monitoraggio e la gestione delle dighe.

Le grandi dighe sono infrastrutture fondamentali, soprattutto per la produzione di energia elettrica, ma comportano anche rischi significativi. Per gestirle in modo sicuro è essenziale avere informazioni aggiornate quotidianamente sul loro stato. Nel mondo ci sono migliaia di dighe, e la loro sicurezza è cruciale: un eventuale cedimento potrebbe avere conseguenze gravissime per milioni di persone. A questo scopo è stato sviluppato un sistema informativo che sfrutta tecnologie già esistenti, integrando reti di sensori wireless (WSN) e soluzioni basate sull'Internet delle Cose (IoT). L'obiettivo è creare un sistema capace di inviare allarmi in tempo reale quando i parametri di sicurezza si discostano dai valori normali. Quindi, oltre i parametri strutturali delle dighe, anche i parametri ambientali al contorno devono essere attentamente monitorati e integrati in un sistema capace di prevedere i problemi prima che si manifestino.

In uno studio mirato allo studio di come garantire il corretto funzionamento delle apparecchiature nei tunnel delle dighe, è stata esplorata l'adozione di reti di sensori wireless per migliorare le prestazioni dei sistemi DSM basati su cavi centralizzati. Il progetto presentava una valutazione del sistema di monitoraggio della sicurezza delle dighe basato su WSN per validarne l'efficienza. Grazie alla cooperazione di diversi agenti per le applicazioni DSM, la rete di sensori wireless distribuita può allocare automaticamente i compiti, auto-organizzarsi e combinare le informazioni provenienti dai vari sensori.

edifici intelligenti e monitoraggio dei confini naturali.

- La potenza di calcolo nell'analisi dati e le tecnologie di Intelligenza Artificiale. L'impossibilità di sviluppare modelli analitici predittivi completi ha portato all'adozione di approcci data-driven, basati su algoritmi statistici e di machine learning. Questi sistemi consentono di individuare trend, anomalie e correlazioni tra variabili, supportando decisioni informate[28].

Le tecnologie chiave: dalla raccolta alla manutenzione intelligente

Sistemi di acquisizione dati (DAS)

I sistemi di acquisizione dati sono fondamentali per raccogliere informazioni sullo stato di una struttura. Le principali tecnologie impiegate includono

- **Data logger**, che raccolgono dati grezzi dai sensori per un successivo recupero e possono essere programmati per intervalli o trigger specifici.
- Questi sistemi comprendono anche **moduli di comunicazione wireless** per la trasmissione sicura dei dati verso server centrali o piattaforme cloud.
- Dispositivi di **edge computing** possono eseguire elaborazioni di base direttamente sul sensore, abilitando decisioni in tempo reale.
- Le **schede di interfaccia** sono utilizzate nei sistemi cablati per collegare data logger o sensori ai computer per acquisizione ed elaborazione.
- Infine, i **Field Programmable Gate Arrays** (FPGA) sono chip versatili programmabili per compiti personalizzati di acquisizione ed elaborazione dati, adattati alle applicazioni SHM

Sensori statici

I sensori statici sono strumenti utilizzati per monitorare in modo continuo la risposta quasi-statica delle strutture alle sollecitazioni di esercizio e ai parametri ambientali. Questo tipo di risposta si riferisce a variazioni lente e graduali nel tempo, come fessurazioni o deformazioni, che non richiedono una raccolta dati ad alta frequenza. Infatti, un'eccessiva quantità di dati risulterebbe superflua e genererebbe file troppo pesanti da gestire.

La frequenza di campionamento viene generalmente impostata secondo due modalità: una acquisizione oraria per strutture considerate a bassa criticità, oppure una frequenza di 1 Hz per un monitoraggio continuo.

Per facilitare la comprensione e l'organizzazione dei dati, i sensori vengono classificati in base alle loro caratteristiche specifiche, rendendo più chiara la loro funzione e il loro impiego nel sistema di monitoraggio.

La maggior parte dei sensori utilizzati nel monitoraggio delle opere, rileva aspetti come deformazioni, spostamenti, rotazioni, tensioni.

Alcuni sensori, oltre a fornire informazioni sulla struttura, vengono impiegati anche per monitorare fenomeni esterni come l'erosione degli argini o il comportamento dei corsi d'acqua.

Vi sono poi sensori che rilevano i parametri ambientali che influiscono sul calcestruzzo delle opere, nonché sul suo stato

Il pendolo è un sensore che sfrutta il principio del filo a piombo per monitorare rotazioni e spostamenti in grandi strutture, come dighe, torri e ponti, rilevando variazioni rispetto alla verticale gravitazionale.

- Output atteso: rappresentazione grafica che mostra nel tempo gli spostamenti o le rotazioni rilevate.

- Qualità del dato acquisito: stabile e non influenzato da fattori ambientali come la temperatura, e non necessita di rielaborazione.
- Utilizzo del dato: all'interno dei sistemi di monitoraggio (BMS), il dato è utilizzato sia a livello di sensore che di elemento strutturale. Nel primo caso si trasmettono misure istantanee, limiti imposti dall'ispettore e documentazione storica. Nel secondo caso, si aggregano i dati di più sensori per ottenere una media rappresentativa, utile per una consultazione rapida. In caso di anomalie, si procede all'analisi dettagliata dei singoli sensori per valutare l'entità del problema. I dati relativi ai versanti non sono integrati nei modelli BIM, ma vengono gestiti separatamente tramite sistemi GIS.

L'estensimetro a corda vibrante misura le deformazioni strutturali rilevando variazioni di frequenza di una corda d'acciaio tesa, risultando ideale nei punti più sollecitati delle strutture. Trova applicazione in numerosi ambiti strutturali, tra cui dighe, ponti, viadotti, strutture in acciaio, fondazioni e diaframmi. Per migliorare la precisione della misura, il sensore può essere dotato di un termistore che consente di correggere l'influenza della temperatura. Grazie alla sua tenuta stagna, può essere installato sia all'esterno delle strutture che integrato direttamente nei getti di calcestruzzo.

- Output atteso: rappresentazione grafica in cui il tempo è riportato sull'asse delle ascisse e la deformazione sull'asse delle ordinate, permettendo un monitoraggio continuo e preciso del comportamento strutturale nel tempo.

I trasduttori di spostamento (LVDT) misurano movimenti lineari tra punti vicini e sono ideali per monitorare spostamenti relativi in elementi strutturali.

- Output atteso: curva che mostra lo spostamento nel tempo.
- Qualità del dato acquisito: per ottenere informazioni affidabili, è necessario filtrare il dato da interferenze ambientali e da fattori esterni come il traffico veicolare.
- Utilizzo del dato: nei BMS il dato è utilizzato per valutare lo spostamento istantaneo, i limiti imposti dall'ispettore e la documentazione storica del monitoraggio.

Le celle di carico misurano le tensioni negli elementi strutturali e vengono utilizzate per monitorare carichi e perdite di tensione in punti critici delle strutture.

- Output atteso: curva tensione-tempo
- Qualità del dato acquisito: è necessaria una pulizia del segnale per eliminare disturbi ambientali.
- Utilizzo del dato: nei BMS il dato è utilizzato per valutare la tensione istantanea, i limiti di sicurezza e la documentazione storica, sia a livello di sensore che di elemento strutturale.

Nel monitoraggio strutturale, diversi sensori sono impiegati per rilevare fenomeni di scalzamento e erosione del terreno, in particolare sotto pile e spalle di ponti. Galleggianti, collari magnetici e sonar sono tecnologie impiegate per monitorare l'erosione sotto i ponti: i primi emergono trasmettendo segnali wireless quando il sedimento viene rimosso, i secondi rilevano la profondità tramite grilletti magnetici, mentre il sonar misura le variazioni del letto fluviale con onde sonore, ciascuno con sensibilità e modalità di installazione diverse. L'asta mobile temporizzata rileva l'erosione misurando lo spostamento verticale tramite un motore elettrico e un contagiri.

- Output atteso: il dato rilevato è rappresentato in funzione del tempo e della profondità o del movimento.

- Qualità del dato acquisito: i dati non sono influenzati da fattori ambientali come la temperatura e non necessitano di rielaborazione, ad eccezione del sonar le cui rilevazioni possono essere influenzate da condizioni ambientali come ghiaccio o ostacoli sulla superficie dell'acqua. I dati raccolti dai collari magnetici sono sensibili a detriti e fenomeni biologici come il biofouling.
- Utilizzo del dato: il dato non è integrato nei sistemi BIM, ma è gestito tramite piattaforme GIS, in quanto riguardano il contesto geologico e idraulico esterno alla struttura.

I sensori per la corrosione nel calcestruzzo monitorano in modo non invasivo i parametri che favoriscono il degrado delle armature. Sono strumenti economici, non invasivi e adatti anche a zone difficili da raggiungere. Vengono usati soprattutto per verificare lo stato delle armature precompresse e per monitorare danni in aree dove il copriferro è danneggiato o assente.

- Output atteso: i dati raccolti mostrano come cambia nel tempo il segnale elettrico
- Utilizzo del dato: possono essere condivisi nei sistemi di monitoraggio, ma non è possibile fare una media tra più sensori, perché ogni misura è legata a un punto preciso della struttura.

I sensori che rilevano temperatura e umidità controllano le condizioni ambientali delle infrastrutture, sia all'interno che all'esterno del calcestruzzo. Vengono utilizzati per monitorare le condizioni ambientali delle infrastrutture, sia all'esterno che all'interno del calcestruzzo, soprattutto nelle opere nuove. I sensori di temperatura possono essere integrati in altri dispositivi o posizionati vicino alle unità di acquisizione, mentre quelli di umidità rilevano il livello di umidità esterna.

- Qualità del dato acquisito: i dati raccolti non vengono rielaborati, ma servono come supporto per correggere le misurazioni di altri sensori.
- Utilizzo del dato: le informazioni sono condivise nei sistemi di monitoraggio (BMS) a livello di sensore, elemento e struttura, fornendo un quadro utile per la gestione e la manutenzione.

Sensori statici

Sensori di corrosione, umidità e temperatura
I sensori di corrosione del calcestruzzo funzionano misurando piccole variazioni elettriche tra un punto interno al calcestruzzo e uno esterno tradotte in valori utili per capire se ci sono problemi come la presenza di cloruri o variazioni di pH

I sensori di temperatura e umidità vengono utilizzati per monitorare le condizioni ambientali delle infrastrutture, sia all'esterno che all'interno del calcestruzzo

Celle di carico
Misurano lo stato di tensione negli elementi strutturali. Possono essere di tipo meccanico, idraulico, elettrico a strain-gauge o a corda vibrante. Vengono installate con piastre di distribuzione per garantire un contatto uniforme e rilevano la deformazione causata dal carico applicato. Sono impiegate per monitorare la perdita di tensione in elementi precompressi, nei tiranti, nei punti di appoggio e per controllare la pressione esercitata dal terreno sulle strutture di contenimento.

Pendolo
Utilizzato per monitorare rotazioni e spostamenti in grandi strutture.
Il suo funzionamento si basa sul principio del filo a piombo: una massa sospesa a un filo flessibile si orienta secondo la verticale gravitazionale, permettendo di misurare lo spostamento di punti della struttura rispetto a questa direzione.
Installato per rilevare rotazioni nelle pile e spostamenti nei versanti rocciosi

Estensimetro a corda vibrante
Utilizzato per misurare le deformazioni in elementi strutturali, sia in trazione che in compressione. Si basa su una corda d'acciaio tesa tra due dischi, eccitata da una bobina elettromagnetica che ne induce la vibrazione. La frequenza di vibrazione, rilevata da un'unità di acquisizione, è proporzionale alla deformazione subita dalla struttura. Utilizzato nelle selle Gerber e nelle mezzerie degli impalcati

Asta mobile temporizzata
composta da un tubo verticale con un'asta interna che si muove grazie a un motore elettrico. Il numero di giri del motore, rilevato da un contagiri, consente di determinare lo spostamento verticale dell'asta e quindi il grado di erosione.

Trasduttori di spostamento o LVDT (Linear Variable Differential Transformer)
Utilizzati per misurare lo spostamento lineare tra due punti vicini. Funzionano rilevando il movimento di un nucleo all'interno di un cilindro metallico, lungo un unico asse. Questo tipo di sensore è particolarmente adatto per monitorare i movimenti relativi tra elementi strutturali come travi, pile, spalle, giunti e dispositivi di appoggio.

Sonar
Tecnologia più accessibile, montata direttamente su moli o sottostrutture. Utilizza onde sonore per misurare la profondità del letto fluviale, rilevando variazioni che indicano l'avanzamento dell'erosione. Tuttavia, la qualità del dato può essere influenzata da condizioni ambientali come ghiaccio o ostacoli sulla superficie dell'acqua

Galleggianti (Float-Out Devices)
Inseriti nel letto del fiume a diverse profondità. Quando il sedimento viene rimosso, il sensore riaffiora e trasmette un segnale wireless a un data logger. Questo sistema consente di monitorare l'evoluzione dell'erosione nel tempo, con installazione facilitata in letti asciutti e più complessa in ambienti sommersi, dove è necessario l'intervento di subacquei

Collari scorrevoli magnetici
Scorre lungo un'asta man mano che il sedimento si erode, attivando dei grilletti magnetici che permettono di rilevare la profondità raggiunta. Sono semplici da installare ma sensibili a detriti e fenomeni biologici come il biofouling.

Sensori dinamici

I sensori dinamici vengono utilizzati per registrare la risposta delle strutture a eventi rapidi e discontinui, come il passaggio dei veicoli. A differenza dei sensori statici, che monitorano variazioni lente, questi dispositivi devono acquisire dati ad alta frequenza (circa 100-200 campioni al secondo) per catturare fenomeni di breve durata.

Il monitoraggio può avvenire in due modi: con misurazioni periodiche, registrando brevi tracce ogni 12-24 ore, oppure tramite eventi di soglia, che attivano la registrazione quando si superano determinati valori di accelerazione. La grandezza principale rilevata è l'accelerazione, utile per valutare il comportamento dinamico della struttura e individuare eventuali anomalie.

Gli strain gauge sono sensori utilizzati per misurare le deformazioni di una struttura quando è sottoposta a sollecitazioni. Funzionano rilevando variazioni di resistenza elettrica causate da compressione o trazione. Il sensore è composto da una lamina metallica montata su un supporto flessibile, che si deforma insieme alla struttura e trasmette il segnale. Esistono diverse configurazioni, come le rosette biassiali e triassiali, che permettono di rilevare le deformazioni in più direzioni. Questi sensori sono molto utili per monitorare le sollecitazioni dinamiche, ad esempio quelle causate dal traffico su ponti e viadotti, e vengono spesso installati nei punti più critici delle travi.

- Output atteso: il dato raccolto mostra come la deformazione varia nel tempo
- Qualità del dato acquisito: per essere utile, deve essere filtrato da interferenze ambientali
- Utilizzo del dato: nei sistemi di monitoraggio, è possibile condividere le misure istantanee, i limiti di sicurezza e la cronologia dei dati, sia a livello di sensore che di elemento strutturale.

Gli accelerometri sono sensori che misurano le accelerazioni e le vibrazioni di una struttura, utili per capire il suo comportamento dinamico e individuare eventuali anomalie. Esistono diverse tipologie: i MEMS capacitivi, più economici e compatti, i piezoresistivi, adatti a vibrazioni di ampia frequenza, e i piezoelettrici, molto precisi e sensibili, ideali per monitoraggi dettagliati. Questi sensori vengono installati in punti strategici come travi, giunti e pulvini per rilevare vibrazioni causate dal traffico o da eventi impulsivi.

- Output atteso: il dato raccolto mostra l'accelerazione nel tempo e, dopo una fase di pulizia, permettono di identificare le frequenze naturali e i modi di vibrare della struttura, informazioni fondamentali per valutare la stabilità e prevenire danni.
- Qualità del dato acquisito: per essere utile, deve essere filtrato da interferenze ambientali
- Utilizzo del dato: nei sistemi di monitoraggio, gli accelerometri condividono dati come accelerazioni massime, conteggio degli eventi e analisi dinamiche (frequenze e coefficienti MAC), utili per verificare la sicurezza e programmare interventi.

Evoluzioni ed innovazioni: nuove frontiere del monitoraggio

Sensori a fibra ottica

Le nuove tecnologie stanno rivoluzionando il monitoraggio delle infrastrutture, offrendo soluzioni più rapide ed economiche rispetto ai sensori tradizionali, pur mantenendo una buona qualità dei dati. In particolare, nel caso dei ponti, viadotti, gallerie – strutture estese e complesse – il controllo richiede molte risorse e tempi lunghi. Per superare queste difficoltà, si stanno sperimentando strumenti innovativi come sensori a fibra ottica e le tecnologie satellitari, che permettono di raccogliere informazioni frequenti, precise e facilmente accessibili. Queste soluzioni, ancora in fase di sviluppo, sono state applicate solo parzialmente al settore e non dispongono ancora di studi consolidati nel settore infrastrutturale. Tuttavia, rappresentano un'opportunità promettente per migliorare l'efficienza e la sostenibilità della manutenzione.

I sensori a fibra ottica rappresentano una tecnologia avanzata per il monitoraggio strutturale. Sono costituiti da filamenti di vetro o polimeri che trasmettono luce all'interno di un nucleo (core) protetto da strati esterni. Quando la struttura si deforma, la fibra subisce variazioni che modificano il comportamento della luce, permettendo di rilevare parametri come deformazioni, spostamenti, tensioni e temperatura.

Esistono diverse configurazioni:

- Sensori singoli, per misure puntuali;
- Quasi distribuiti, che rilevano dati in punti specifici lungo la fibra;
- Distribuiti, che monitorano in modo continuo tutta la lunghezza della struttura.

- Tra le principali tecnologie troviamo:
- Reticoli di Bragg (FBG), ideali per misurare deformazioni e temperatura con alta precisione e resistenza a corrosione ed interferenze;
- Fabry-Pérot, sensori corti che rilevano tensioni tramite variazioni di cavità ottiche;
- Brillouin, per misure distribuite di tensione e temperatura;
- SOFO, che utilizza due fibre per compensare gli effetti termici e misurare deformazioni;
- Microbending, basato sulla variazione di intensità luminosa dovuta a curvature;
- Diffusione Raman, per il monitoraggio continuo della temperatura lungo la fibra.

Questi sensori offrono vantaggi come alta precisione, resistenza agli agenti esterni e possibilità di monitoraggio su lunghe distanze, ma richiedono protezioni aggiuntive per evitare danni meccanici.

La Tecnologia DFOS

COMTEL Innovation

Tecnologia DFOS: Cos'è e come funziona

La tecnologia Distributed Fiber Optic Sensing (DFOS) rappresenta una rivoluzione nel monitoraggio delle infrastrutture. Trasforma le reti in fibra ottica esistenti in sensori distribuiti intelligenti, capaci di rilevare vibrazioni, deformazioni e variazioni termiche lungo decine o centinaia di chilometri, senza modifiche strutturali. Ogni metro di fibra diventa un punto di osservazione, con risoluzione fino a 10 metri e sensibilità a variazioni nanometriche e millesimi di grado.
Il principio di funzionamento si basa sul fenomeno del backscattering ottico: impulsi laser inviati lungo la fibra interagiscono con micro-irregolarità del vetro e perturbazioni esterne (vibrazioni, temperatura, pressione). L'analisi delle riflessioni consente di ricostruire in tempo reale eventi fisici lungo tutta la lunghezza del cavo

I sistemi DFOS sfruttano tre tipi di scattering:

- *Rayleigh*: sensibile a vibrazioni (DAS – Distributed Acoustic Sensing).
- *Raman*: sensibile alla temperatura (DTS – Distributed Temperature Sensing).
- *Brillouin*: sensibile a deformazioni (DSS – Distributed Strain Sensing).

Vantaggi della tecnologia DFOS

Rispetto ai sensori tradizionali, DFOS offre:

- Copertura continua fino a 100 km con un solo interrogatore.
- Migliaia di punti virtuali lungo la fibra, contro pochi sensori puntuali.
- Installazione non invasiva: utilizza fibra esistente, senza alimentazione sul campo.
- Manutenzione centralizzata e riduzione dei costi operativi fino al 60%.
- Immunità elettromagnetica e robustezza in ambienti ostili (tunnel, cavi sottomarini).
- Alta sensibilità e bassa latenza per monitoraggio in tempo reale.

Questi vantaggi abilitano la transizione da una manutenzione reattiva a una manutenzione predittiva, migliorando sicurezza, continuità di servizio e sostenibilità.

Applicazioni e casi d'uso

DFOS è già impiegata in settori critici:

- Oil & Gas: monitoraggio di oleodotti e gasdotti per rilevare perdite e cedimenti strutturali.
  - *Caso Keystone Pipeline (4.300 km, Nord America): rilevamento perdite in tempo reale con precisione <10 m, riduzione tempi di intervento da ore a minuti.*
- Infrastrutture: ponti, dighe, gallerie, reti ferroviarie e stradali.
  - *Øresund Bridge (Danimarca-Svezia):* monitoraggio deformazioni e vibrazioni indotte da traffico e vento.
  - *Itaipu Dam (Brasile-Paraguay):* rilevamento precoce di cedimenti e infiltrazioni.
- Smart Road e Smart City
  - *la piattaforma NEC FOSS* integra DFOS con AI per classificare eventi e gestire traffico. Risultati: accuratezza del 95% nel rilevamento automatico, riduzione errori di previsione traffico dell'80%. Ad esempio, è possibile stimare i rischi alla guida causati dalla velocità, incidenti, congestioni di traffico e condizioni meteorologiche, quali pioggia e congelamento del manto stradale.
- Progetti europei:
  - *FORESIGHT (Horizon UE)*: monitoraggio sismico con cavi ottici interni agli edifici, riduzione tempi di allerta del 90%.
  - *ECSTATIC:* monitoraggio cavi sottomarini per rilevamento micro-terremoti e tsunami.

Benefici operativi e prospettive

- Prevenzione di guasti critici (es. oleodotti, reti idriche, ponti, reti telecomunicazione).
- Early warning per eventi ambientali (terremoti, frane, alluvioni).
- Sicurezza operativa: rilevamento intrusioni e anomalie.
- Riduzione costi: fino al 60% rispetto ai sistemi tradizionali.
- Sostenibilità: utilizzo di infrastrutture esistenti e riduzione impatto ambientale.

DFOS è una tecnologia chiave per le Smart Infrastructure, capace di trasformare le reti passive in sistemi sensoriali attivi, intelligenti e resilienti. Grazie all'integrazione con AI e IoT è in grado di alimentare Digital Twin dinamici di strade, ponti e reti urbane per una governance predittiva e resiliente delle infrastrutture critiche migliorando sicurezza, efficienza e sostenibilità.

Tecnologie di telerilevamento

Le tecnologie di telerilevamento si differenziano a seconda della soluzione tecnologica utilizzata.

- La tecnologia TInRAR è una tecnica di telerilevamento che consente di misurare contemporaneamente gli spostamenti di numerosi punti su strutture e infrastrutture, con alta frequenza di campionamento. Questo permette di effettuare analisi sia statiche che dinamiche senza installare sensori sulla struttura, sfruttando la naturale riflettività delle microonde. Il sistema utilizza un radar interferometrico posizionato in sito, che calcola gli spostamenti lungo la linea di vista confrontando le variazioni di fase delle onde elettromagnetiche emesse e riflesse nel tempo. È particolarmente adatto per strutture sviluppate in senso verticale o orizzontale, come ponti e torri, e richiede postazioni stabili per ottenere più prospettive. L'accuratezza varia da decimi a pochi millimetri e dipende dalle condizioni atmosferiche. Tra i principali vantaggi vi sono la possibilità di operare in qualsiasi condizione ambientale e di illuminazione, la rapidità di acquisizione e il monitoraggio continuo senza applicare target sulla struttura.

- La tecnologia A-DInSAR è un sistema avanzato di monitoraggio che utilizza immagini satellitari radar per rilevare nel tempo le deformazioni del terreno con grande precisione. Grazie all'analisi di archivi storici gestiti da agenzie spaziali, è possibile ricostruire l'evoluzione di fenomeni geologici e strutturali, come cedimenti o movimenti del suolo. Rispetto all'interferometria radar classica, A-DInSAR supera le limitazioni dovute all'atmosfera utilizzando molte immagini e punti di riferimento stabili nel tempo. Il vantaggio principale è la capacità di osservare vaste aree con costi e tempi ridotti, anche se il dato non è continuo, poiché dipende dal passaggio dei satelliti in orbita. Questa tecnologia, ancora in fase di sviluppo, è stata applicata in modo sperimentale al monitoraggio dei ponti, offrendo un potenziale interessante per il controllo delle infrastrutture su larga scala.

Monitoraggio satellitare

INTESA SANPAOLO INNOVATION CENTER

Per i settori dell'energia, dell'ambiente e delle infrastrutture, con specificità differenti, la disponibilità di informazioni su larga scala e a cadenza regolare che possano supportare sia le scelte decisionali correnti sia quelle a medio, lungo e lunghissimo termine di gestori ed enti pubblici è strategica, soprattutto in un contesto come quello attuale dove l'efficienza energetica e la necessità di garantire uno sviluppo socioeconomico sostenibile dal punto di vista ambientale sono fondamentali. Per una corretta gestione del patrimonio ambientale, il monitoraggio dell'uso della superficie terrestre è cruciale; ad esempio, il modo in cui i terreni vengono utilizzati condiziona fortemente la quantità di carbonio che il suolo può trattenere. L'infrastrutturazione del territorio e lo sviluppo urbano hanno portato ad una vera e propria sigillatura del suolo con uno strato impermeabile. In questo contesto, la tecnologia satellitare si pone come supporto a molte indagini ed analisi per la mitigazione di questi cambiamenti e per migliorare la pianificazione urbana.

Il programma europeo di osservazione della Terra Copernicus è una delle principali fonti di immagini ad alta risoluzione dell'area dell'Unione europea. Tra i prodotti strettamente legati all'espansione urbana, vanno annoverati il Copernicus Urban Atlas, composto da mappe armonizzate di copertura del suolo di centinaia di città e dei loro dintorni dei paesi dell'UE e dell'EFTA, e il Copernicus Imperviousness, ovvero un prodotto che analizza la distribuzione spaziale delle aree impermeabilizzate artificialmente derivate da una classificazione semi-automatica, basata su Normalized Difference Vegetation Index - NDVI.

Entrambi i servizi producono mappe di cambiamento - change maps, ovvero mappe utili a comprendere la crescita urbana e le sue trasformazioni confrontando diversi periodi temporali.

Le tecnologie spaziali per l'osservazione della Terra impiegano sia sensori ottici iperspettrali, detti passivi poiché sfruttano l'energia elettromagnetica emessa e riflessa dalla superficie terrestre, sia sensori attivi come i radar. L'uso di questi sensori permette di ottenere immagini e dati che racchiudono una grande quantità di informazioni sulle proprietà fisiche, chimiche e biologiche di un oggetto, un fenomeno o un territorio.

In ambito energia, infrastrutture e ambiente, le informazioni ottenute attraverso le tecnologie satellitari risultano strategiche per supportare:

- la selezione del sito in cui realizzare le strutture, effettuando indagini di tipo geotecnico, geofisico ed altimetrico;
- la gestione delle strutture esistenti, valutandone l'efficienza nel tempo, controllando l'invasione della vegetazione spontanea e tenendo sotto controllo i danni e il degrado cui gli asset sono soggetti;
- la gestione del rischio operativo, in particolare quello derivante da eventi naturali quali inondazioni, incendi e movimenti di masse terrose.

Monitoraggio del territorio

Attraverso l'impiego e l'analisi delle immagini satellitari si forniscono in modo tempestivo le informazioni necessarie a supportare la pianificazione e la gestione delle risorse naturali. Ad esempio, per un impianto idroelettrico i riscontri satellitari permettono di quantificare con precisione lo stato delle risorse idriche e la neve accumulata durante l'inverno. Integrando tali informazioni con le previsioni meteorologiche sulle precipitazioni future, è possibile attuare un'accurata pianificazione dello sfruttamento delle risorse disponibili ed eventualmente intraprendere tempestivamente azioni volte a garantire e integrare le forniture elettriche necessarie.

La missione italiana PRISMA - Precursore IperSpettrale della Missione Applicativa - ha visto il lancio in orbita nel 2019 di uno strumento iperspettrale in grado di lavorare in numerose bande disposte dal visibile al vicino infrarosso (Vnir-Visible and Near InfraRed) e fino all'infrarosso ad onde corte (Swir-Short Wave InfraRed).

A differenza dei sensori ottici passivi satellitari che registrano la radiazione solare riflessa dal nostro pianeta in un numero limitato di bande spettrali (circa una decina al massimo), PRISMA è in grado di acquisirne 240. Ciò permette di effettuare dallo Spazio un'analisi chimico-fisica delle aree sotto osservazione, fornendo preziose informazioni sulla disponibilità di risorse naturali, oltre che a supporto della prevenzione di rischi naturali (come quello idrogeologico) e antropici (tra cui l'inquinamento del suolo), del monitoraggio dei beni culturali, delle attività agricole e di sfruttamento delle risorse minerarie. Il sistema rende inoltre possibile ottenere ulteriori informazioni e dati relativi agli aspetti ambientali, in particolare:

- alle risorse idriche, misurando la torbidità dell'acqua in ogni punto di un bacino, rilevando le acque più limpide e le colonie di alghe;
- al grado di assorbimento dell'acqua da parte delle foreste, che può fornire un segnale precursore del rischio di incendi boschivi;

INTESA SANPAOLO INNOVATION CENTER

- alla presenza di incendi di gas connessi all'estrazione petrolifera, determinandone l'estensione e riconoscendo le sostanze chimiche generate dalla combustione grazie alla loro impronta spettrale.

Riducendo la necessità di ispezioni umane in aree critiche, l'acquisizione di dati da immagini satellitari consente disalvaguardare l'incolumità fisica degli operatori, che viceversa sarebbero esposti ai rischi di ambienti ostili anche per la semplice rilevazione delle informazioni. Inoltre, sono possibili notevoli riduzioni di costi rendendo più efficiente l'ispezione di reti e infrastrutture, riducendo la necessità di sopralluoghi onerosi in termini di costi e di tempo.

Monitoraggio delle infrastrutture e dei manufatti

Il monitoraggio delle infrastrutture su aree vaste richiede di norma notevoli risorse economiche e di tempo risultando spesso di complessa attuazione.

L'utilizzo delle tecnologie satellitari permette di superare tali limitazioni.

Oltre all'impiego delle immagini da satellite, i radar e gli altri sensori usati come payload a bordo di satelliti possono fornire dati e misurazioni estremamente precise attraverso cui è possibile monitorare in modo molto accurato le aree su cui sono distribuite le infrastrutture, permettendo la pianificazione delle ispezioni, la definizione di una scala di priorità delle indagini in situ e conseguentemente la pianificazione degli interventi di manutenzione, disponendo di informazioni frequenti, accurate e integrabili con altre fonti.

È il caso dei sistemi di interferometria RADAR, strumenti satellitari con tecnologia Synthetic Aperture Radar - SAR che permettono di ottenere immagini radar dell'area oggetto di indagine con elevate risoluzioni sia nella direzione range sia nella direzione azimut.

Questi sistemi consentono di creare serie storiche degli spostamenti del terreno e permettono quindi di comprendere l'evoluzione dei fenomeni deformativi che interessano le infrastrutture; a partire da queste ultime, attraverso l'elaborazione del segnale elettromagnetico RADAR, è possibile migliorare le performance della tecnica in termini di accuratezza, rendendola una metodologia applicabile in near-real time.

Nella fase di progettazione, attraverso l'analisi del territorio è possibile impiegare le tecnologie satellitari per l'individuazione del tracciato ottimale lungo cui disporre le infrastrutture che si sviluppano linearmente, oppure attraverso la creazione di cartografie tematiche relative alle caratteristiche geomorfologiche dell'area in oggetto per la progettazione preliminare delle opere.

In fase di gestione, sono disponibili applicazioni per il controllo della stabilità del territorio prima, durante e dopo la realizzazione dell'opera che prevedono il monitoraggio e l'analisi dell'impatto che l'infrastruttura in oggetto ha con l'ambiente circostante.

Attraverso le tecnologie SAR Multidimensionale 3D e 4D è possibile effettuare vere e proprie ricostruzioni 3D della scena osservata con un elevato grado di dettaglio (adatto a scenari urbani) monitorando accuratamente le eventuali deformazioni temporali dei target al suolo.

La disponibilità di dati ad alta risoluzione spaziale forniti dai sensori satellitari Cosmo-Skymed consente di stimare deformazioni millimetriche delle singole strutture al suolo, come quelle dovute a fenomeni di dilatazione termica (5D Imaging).

Gestione delle emergenze

Oltre alle attività di pianificazione e gestione ordinaria, ricopre un ruolo particolarmente importante anche la gestione delle emergenze, soprattutto quando si deve fare fronte ad eventi naturali calamitosi aventi frequenza e intensità sempre crescente, e ai quali il nostro territorio nazionale risulta essere particolarmente suscettibile.

Il Copernicus Emergency Management Service - EMS fornisce informazioni di early warning in previsione di eventi estremi come inondazioni, incendi o altri eventi naturali potenzialmente dannosi.

Il sistema è anche in grado di produrre mappe aggiornate con informazioni relative ad un evento che si è già verificato, che possono essere usate per la gestione dei soccorsi e per monitorare l'evoluzione dell'evento stesso.

Il Copernicus EMS è accessibile a tutti gli enti che rientrano nel meccanismo della European Civil Protection e alle altre organizzazioni regionali, nazionali e internazionali che si occupano di protezione civile, alla Commissione Europea e alle Agenzie dell'UE.

Nel contesto della gestione delle emergenze, ITHACA si occupa di raccogliere, processare e organizzare in modo strutturato dati in-situ, dati da aerei/droni, dati da sensori IoT, e dati da database geospaziali e da fonti satellitari per creare mappe ad alto valore aggiunto.

INTESA SANPAOLO INNOVATION CENTER

Il servizio è pensato per rendere i dati più fruibili agli utenti, e quindi per velocizzare le azioni sul campo. L'azienda usa il sistema Copernicus dedicato al Rapid Mapping per produrre mappe tematiche e dati vettoriali. Ithaca supporta i clienti finali in vari domini applicativi come agricoltura, gestione delle foreste e silvicoltura, monitoraggio dell'ambiente, informazioni per la mobilità.

URBan ANthrpogenic heat FLUX from Earth observation Satellites – URBANFLUXES è un progetto H2020 finanziato dall'UE che studia, attraverso l'utilizzo combinato delle immagini satellitari e delle misurazioni meteorologiche convenzionali, il riscaldamento urbano dividendo il bilancio energetico urbano dal flusso di calore antropico.

Obiettivi del progetto:

fornire dati relativi al calore antropogenico a diverse applicazioni, compresi i modelli climatici, per valutare l'effetto del calore antropogenico sul sistema Terra;

costruire modelli energetici per caratterizzare i percorsi di scambio termico tra edifici e atmosfera/suolo/acqua;

supportare le decisioni legate alla pianificazione urbana sostenibile e alla mappatura delle emissioni collegate ai consumi energetici.

Monitoraggio tramite segnali Global Navigation Satellite Systems

Sistemi innovativi in grado di generare in modo economico informazioni e mappe 2.5D (altrimenti note come 3D level-of-detail) possono essere realizzati attraverso l'impiego dei segnali Global Navigation Satellite Systems - GNSS (vedi Cap 2.5), disponibili a livello globale.

L'uso di sensori GNSS permette di monitorare con grande precisione le variazioni di posizione. Questo uso trova applicazione nella gestione dei territori o delle infrastrutture, poiché permette di monitorare, ad esempio, la deformazione del suolo, i movimenti delle frane o gli spostamenti di edifici, ponti e costruzioni di vario genere.

La tipologia di sensori GNSS è variegata. Per applicazioni che richiedono un monitoraggio molto preciso è possibile usare sensori e ricevitori professionali ad alte prestazioni ed in grado di monitorare variazioni di pochi centimetri (o in alcuni casi di pochi millimetri). In altri casi, possono essere impiegati sensori con minore precisione in modo da garantire il monitoraggio di infrastrutture o territori a basso costo. Inoltre, attraverso tecniche avanzate di elaborazione dei segnali GNSS e la loro integrazione con altri dati forniti dai sistemi di osservazione della Terra, è possibile creare mappe 3D del territorio. Con queste tecniche possono essere costruiti dei gemelli digitali, o Digital Twins, del territorio o dell'infrastruttura monitorata in modo da calibrare in modo ancora più puntuale le attività di controllo e manutenzione.

Tecnologie complementari

Prove non distruttive (NDT)

Le tecniche di prova non distruttiva (NDT) sono essenziali nello SHM, poiché consentono di valutare lo stato, l'integrità e la salute delle strutture senza causare danni. Principali metodi per rilevare difetti, monitorare la salute strutturale e analizzare materiali come calcestruzzo, acciaio e compositi: radar a penetrazione del suolo, termografia a infrarossi, fibre ottiche, emissione acustica test ultrasonici. I progressi nell'NDT, come la connettività wireless, il monitoraggio continuo e i sensori avanzati, migliorano la precisione e l'efficienza delle valutazioni strutturali, favorendo la manutenzione proattiva, la sicurezza e la durabilità delle infrastrutture critiche.

Le tecnologie non distruttive (NDT)

INTESA SANPAOLO INNOVATION CENTER

I controlli non distruttivi (NDT) rappresentano un insieme di tecniche di analisi progettate per ispezionare le proprietà di un materiale, componente o struttura senza comprometterne l'integrità e l'utilizzo. Questo approccio consente di effettuare verifiche accurate e approfondite senza causare danni, garantendo la continuità operativa e la sicurezza delle infrastrutture. L'obiettivo principale è ottenere un controllo di qualità (QC) su materiali e sistemi in modo economicamente vantaggioso, riducendo i rischi e i costi associati alle ispezioni invasive.

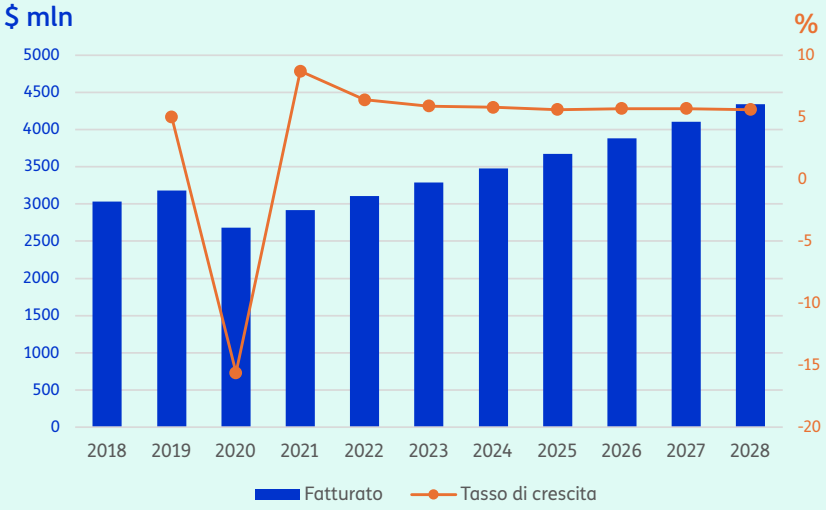
Il mercato globale delle apparecchiature NDT consolidate ha raggiunto un valore di 2,9 miliardi di dollari, con una crescita stimata a un CAGR del 5,8%, destinata a superare i 4,3 miliardi di dollari entro il 2028.

Questa espansione è trainata dalla necessità di monitorare infrastrutture in fase di invecchiamento, soprattutto nelle economie avanzate, e dalla crescente attenzione alla sicurezza nel settore edile e industriale.

Le procedure di ispezione e manutenzione ricorrono sempre più spesso ad apparecchiature di prova non distruttive collaudate per rilevare i difetti, ispezionare lo spessore delle pareti e identificare le crepe.

Apparecchiature NDT consolidate
previsione di fatturato, a livello globale, 2018-2028

CAGR 2018-2028
5,8%



INTESA SANPAOLO INNOVATION CENTER

PRINCIPALI TECNOLOGIE NDT CONSOLIDATE

Le tecnologie di controllo non distruttivo più consolidate comprendono principalmente le
apparecchiature radiografiche (RT) e a ultrasuoni (UT), entrambe utilizzate da decenni per rilevare difetti, misurare spessori e verificare la qualità delle saldature.

Radiografia (RT)

La radiografia utilizza raggi X o gamma per individuare difetti nascosti all'interno dei materiali. È impiegata sia in laboratorio sia sul campo, con soluzioni digitali che stanno progressivamente sostituendo la radiologia convenzionale grazie a tempi di esposizione ridotti e maggiore efficienza. Le applicazioni principali includono:

- Ispezione di saldature e fusioni.
- Misurazione dello spessore delle pareti.
- Mappatura della corrosione.
- Verifica di materiali di rinforzo nel calcestruzzo.

Il mercato globale dell'RT ha un valore di 1,4 miliardi di dollari e cresce a un CAGR del 4,6%

Tuttavia, la radiografia presenta alcuni limiti: richiede accesso diretto all'oggetto e comporta rischi legati alle radiazioni, oltre a necessitare di personale altamente qualificato per interpretare le immagini.

Ultrasuoni (UT)

La tecnologia a ultrasuoni è utilizzata da oltre sessant'anni e si basa sull'impiego di onde ultrasoniche piezoelettriche o generate da laser per rilevare crepe, difetti e variazioni di spessore. È disponibile in versioni automatizzate e portatili, molto diffuse negli impianti energetici. I vantaggi principali rispetto alla radiografia sono:

- Maggiore sicurezza (non emette radiazioni).
- Capacità di rilevare difetti paralleli alla superficie.
- Flessibilità grazie alle sonde angolate.
- Il mercato globale dell'UT ha un valore di 774 milioni di dollari, con una crescita stimata del 6% annuo.

Il mercato delle apparecchiature portatili è stato valutato 491 milioni di dollari e rappresenta il 63% del comparto UT totale (2022), grazie alla loro praticità e alla possibilità di raccogliere e analizzare dati direttamente in loco.

NUOVE TECNOLOGIE EMERGENTI NEL NDT

Oltre alle soluzioni consolidate, il settore sta evolvendo verso tecnologie più sofisticate, integrate con robotica e intelligenza artificiale. Tra le più promettenti troviamo:

Metodo di Focalizzazione Totale (TFM)

Il TFM è una tecnica avanzata basata su algoritmi che ricostruiscono immagini ad alta risoluzione sfruttando i dati acquisiti da matrici di trasduttori. Integrato con sistemi robotici e droni, consente ispezioni in aree difficili da raggiungere,

riducendo tempi e costi. I vantaggi includono:

- Maggiore accuratezza nella localizzazione dei difetti.
- Automazione del processo di raccolta dati.
- Riduzione dell'errore umano e aumento della produttività.

Un esempio significativo è l'impiego di robot da parte di Gecko Robotics per ispezioni NDT nel settore energetico. L'integrazione del TFM con scanner e sonde ha permesso di eliminare la necessità di impalcature e accessi complessi, accelerando le attività e migliorando la qualità dei dati.

Shearografia Laser (LS)

Tecnica ottica che illumina l'oggetto con luce laser e analizza le variazioni del pattern di interferenza (speckle) prima e dopo una sollecitazione. È ideale per rilevare difetti superficiali e sub-superficiali in materiali complessi come i compositi. I vantaggi:

- Rapidità di ispezione (fino a 1 m^2 al minuto).
- Capacità di individuare difetti invisibili ad altre tecniche.
- Applicazioni in aerospazio, automotive e turbine.

Termografia a Infrarossi (IRT)

Basata sull'acquisizione di radiazioni termiche, la termografia genera immagini (termogrammi) che evidenziano anomalie nella distribuzione della temperatura. È utilizzata per:

- Monitoraggio di impianti elettrici e meccanici.
- Analisi di materiali compositi.
- Identificazione di punti caldi e difetti strutturali.

L'IRT è una tecnologia matura, ma l'integrazione con AI e machine learning ne aumenta la precisione e riduce la complessità operativa.

Tecnologia Terahertz (THz NDT)

Utilizza onde elettromagnetiche nella banda dei terahertz per misurare spessori e rilevare difetti in materiali non conduttivi. Consente imaging 2D e 3D con elevata accuratezza, trovando applicazione in settori come aerospazio e elettronica.

VANTAGGI COMPLESSIVI DELLE TECNOLOGIE NDT

Le tecniche NDT offrono benefici strategici per il monitoraggio delle infrastrutture:

- Ispezione non invasiva: preservano l'integrità delle strutture.
- Manutenzione predittiva: consentono di anticipare i guasti e pianificare interventi mirati.
- Riduzione dei costi operativi: meno fermi impianto e maggiore efficienza.
- Sicurezza e affidabilità: individuano difetti nascosti prima che diventino critici.
- Automazione e digitalizzazione: integrazione con robot, droni e software per analisi avanzate e condivisione dati in tempo reale.

APPLICAZIONI NEL MONITORAGGIO DELLE INFRASTRUTTURE

Le tecnologie NDT sono oggi indispensabili per garantire la sicurezza di:

- Ponti e viadotti: rilevamento di crepe, corrosione e deformazioni.
- Dighe e condotte: controllo spessori e integrità strutturale.
- Impianti energetici: verifica di saldature e componenti critici.
- Settore aerospaziale e automotive: controllo di materiali compositi e giunzioni.

Il ruolo del software e dell'Industria 4.0

Nonostante il successo delle apparecchiature NDT e l'impatto tangibile che le soluzioni consolidate ed emergenti hanno avuto in tutti i settori industriali, la crescita complessiva del mercato è limitata dalla continua presenza di interfacce utente complesse, flussi di lavoro
inefficienti, complicazioni nell'interpretazione dei dati, mancanza di tracciabilità e ostacoli nella condivisione dei dati.
Il futuro del NDT è strettamente legato alla digitalizzazione. L'adozione di software avanzati e algoritmi AI/ML consente:

- Interfacce intuitive per semplificare le operazioni.
- Analisi predittive per ridurre errori e rielaborazioni.
- Condivisione dei dati in tempo reale tra team distribuiti.
- Tracciabilità e coerenza dei processi di ispezione.

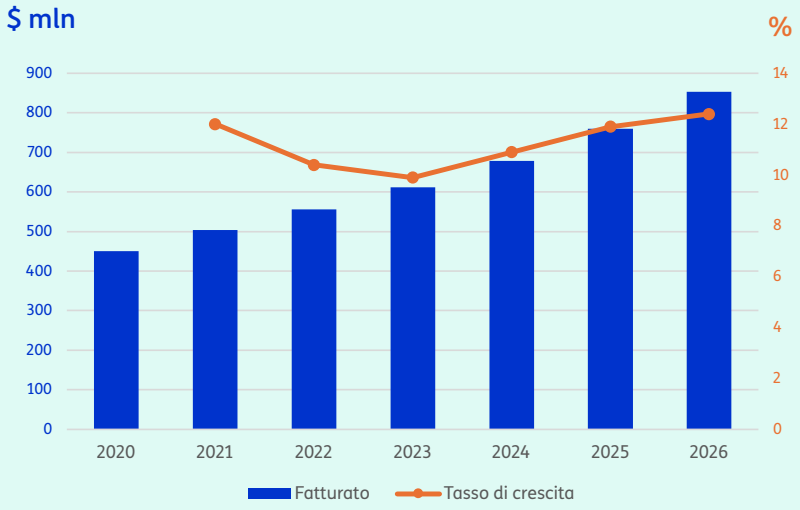
In passato, l'hardware ha rappresentato quasi il 95% delle vendite del settore, ma la situazione sta cambiando in quanto i produttori si sono resi conto che la generazione di fatturato basata sulle apparecchiature è sempre più satura e stanno puntando a soluzioni software per aggiungere valore per la clientela e aumentare il rapporto prezzo/prestazioni dei loro prodotti.

INTESA SANPAOLO INNOVATION CENTER

Lo sviluppo di nuovi modelli di business incentrati sui software è quindi diventato fondamentale per ottenere una crescita più elevata, consentire la sostenibilità e creare una differenziazione competitiva.

Software NDT
previsione di fatturato, a livello globale, 2020-2026

CAGR 2021-2026
11,1%



Molte aziende produttrici di apparecchiature NDT con vendite significative hanno già investito nel software e sviluppato un modello di business incentrato su di esso o sono attualmente in procinto di farlo.
Tuttavia, molte aziende più piccole sono state più lente o incapaci di intraprendere tali iniziative. L'analisi di Frost & Sullivan suggerisce che fornire valore alla clientela e ampliare le capacità dell'hardware è possibile con il software. Le aziende di tutte le fasce di fatturato dovrebbero quindi concentrarsi sullo sviluppo di strategie adeguate.

Complessivamente, il mercato globale del software NDT ha un valore di 504 milioni di dollari e si sta espandendo a un CAGR dell'11,1%, con un valore atteso di oltre 854 milioni di dollari nel 2026

Il comparto dei software integrati è il più ampio e poiché, per definizione, le soluzioni sono vendute insieme all'hardware, la crescita seguirà quella delle apparecchiature
Con il 59% del mercato totale, il software integrato è il comparto dominante, ma il software standalone è quello in più rapida crescita, con i fornitori che offrono interfacce facili da usare e molteplici caratteristiche e funzionalità. Nel 2022, il mercato globale del software standalone ammontava a 208 milioni di dollari. Si prevede che questa cifra raggiungerà circa 406 milioni di dollari entro il 2026, con un CAGR che sfiora il 18%.

Nonostante la comparsa di nuove apparecchiature e l'avvento di soluzioni software, i servizi NDT di terzi rimangono il caposaldo dell'intero settore dei controlli.
Complessivamente, nel 2020 hanno generato ricavi pari a 8,9 miliardi di dollari a livello globale, che si prevede supereranno i 10,4 miliardi di dollari nel 2025, con un CAGR del 3,2%

Le tecnologie NDT stanno ridefinendo il concetto di manutenzione e sicurezza delle infrastrutture.
Da metodi consolidati come radiografia e ultrasuoni, fino alle soluzioni più innovative come TFM, shearografia laser e termografia IR, il settore si muove verso un approccio predittivo, automatizzato e digitale. L'integrazione con robotica, droni e piattaforme software accelera le ispezioni, migliora la qualità dei dati e riduce i costi, rendendo queste tecniche indispensabili per affrontare le sfide di resilienza e sostenibilità delle infrastrutture moderne.

Modellazione delle Informazioni Edilizie (BIM)

Il BIM (Building Information Modeling) indica un processo che utilizza un modello digitale intelligente e tridimensionale per gestire le informazioni di un edificio o di un'opera civile durante tutto il suo ciclo di vita, dalla progettazione alla costruzione fino alla manutenzione e dismissione. È quindi una piattaforma potente che offre strumenti di visualizzazione, interoperabilità e collaborazione e permette di tenere sotto controllo tutte le fasi del ciclo di vita di un'opera, dalla progettazione, alla costruzione, alla gestione. L'integrazione del BIM con le tecniche di monitoraggio tradizionali consente di organizzare e visualizzare grandi quantità di dati provenienti dai sensori, facilitando l'identificazione dei danni e la valutazione dello stato delle strutture nel tempo.

L'integrazione tra BIM e SHM semplifica l'elaborazione dei dati e favorisce l'interazione in tempo reale tra le informazioni di monitoraggio e i modelli digitali, promuovendo un nuovo livello di collaborazione e efficienza nel controllo strutturale. In questo modo, i sistemi SHM possono diagnosticare difetti progettuali, ottimizzare il posizionamento dei sensori e migliorare la gestione delle apparecchiature, aumentando la precisione e l'affidabilità del monitoraggio.

Digital Twin

I digital twin rappresentano un approccio innovativo che sfrutta tecnologie avanzate per migliorare il monitoraggio e la manutenzione delle infrastrutture critiche. Questa tecnologia crea repliche virtuali di asset fisici, aggiornate in tempo reale grazie ai dati provenienti dai sensori. Ciò consente di simulare condizioni, prevedere scenari e prendere decisioni informate sulle strategie di manutenzione.

Integrando dati di misura e modelli computazionali, i digital twin offrono una visione completa dello stato strutturale, permettendo analisi dettagliate e in tempo reale del comportamento delle strutture. Superano le ispezioni manuali in accuratezza e tempestività, rendendo la manutenzione più proattiva ed efficace. Applicati a ponti, edifici e turbine eoliche, i digital twin, combinati con dati IoT, migliorano la comprensione del comportamento strutturale, aumentano la sicurezza, riducono i rischi e ottimizzano la gestione degli asset, prevenendo guasti costosi. In sintesi, offrono una soluzione trasformativa per aumentare affidabilità, efficienza e durata delle infrastrutture.

Robotica e droni

Le tecnologie di robotica e droni sono fondamentali per l'evoluzione delle pratiche SHM, offrendo soluzioni innovative per l'ispezione dei difetti, la valutazione strutturale e il monitoraggio delle infrastrutture critiche. I droni, dotati di sensori visivi come telecamere e LiDAR, sono ampiamente utilizzati per ispezioni aeree di strutture complesse come ponti, torri e turbine eoliche. Offrono agilità, accesso a zone difficili e maggiore sicurezza nelle operazioni.

I sensori visivi permettono il rilevamento automatico delle fessurazioni tramite algoritmi di machine learning e tecniche di elaborazione delle immagini. I sensori LiDAR, invece, generano modelli 3D precisi delle superfici, facilitando la ricostruzione e l'individuazione di anomalie non visibili con metodi tradizionali.

Droni e robot, potenziati da telecamere ad alta risoluzione, termo-camere e sensori multispettrali offrono un'incredibile quantità di dati che, una volta "interpretati" dall'Intelligenza Artificiale, possono trasformarsi in informazioni di elevata utilità per i responsabili dei controlli.

L'applicazione di tecnologie come la Computer Vision facilita il riconoscimento in automatico di

immagini e oggetti. Immaginiamo un drone in volo che possa identificare un masso pericolante nel perimetro di una struttura, o ancora un cavo staccato dell'alta tensione pericolosamente vicino a un deposito con sostanze infiammabili o pannelli fotovoltaici danneggiati da un violento fenomeno atmosferico. L'AI è in grado, grazie ad algoritmi di autoapprendimento, di comparare e collegare tra loro le immagini rilevate dalle telecamere dei droni con modelli predefiniti, attivando eventuali alert per gli operatori.

L'integrazione di robotica e droni nel monitoraggio strutturale migliora la precisione e l'efficienza, consente la rilevazione tempestiva dei problemi, supporta strategie di manutenzione preventiva e contribuisce alla sicurezza e alla durabilità delle infrastrutture.

Il ruolo delle smart grid nella nuova era energetica

Nel quadro della transizione ecologica e digitale, le smart grid, ovvero reti elettriche intelligenti e adattive, rappresentano una risposta indispensabile alle nuove esigenze di consumo, alla crescente diffusione delle energie rinnovabili e all'elettrificazione degli usi finali. Si tratta di reti capaci di gestire e distribuire energia in modo dinamico e bidirezionale, grazie all'integrazione di tecnologie digitali, sensori, sistemi di controllo e comunicazione. Lo sviluppo delle smart grid è sostenuto da un quadro normativo in evoluzione.

A livello europeo, la Direttiva 2019/944 favorisce l'integrazione delle rinnovabili e la partecipazione attiva dei consumatori. In Italia, il PNIEC e il D.Lgs. 199/2021 promuovono le comunità energetiche e i sistemi intelligenti di gestione. Autorità come ARERA, Terna, ENEA e RSE, insieme al mondo accademico, stanno portando avanti progetti pilota e sperimentazioni per accelerare questa trasformazione.

Dalle reti tradizionali alle smart grid, *in cui ogni nodo può essere sia produttore sia consumatore di energia*

A differenza delle reti tradizionali, progettate per un flusso unidirezionale dall'impianto al consumatore, le smart grid sono sistemi distribuiti in cui ogni nodo può essere sia produttore sia consumatore di energia, diventando un prosumer. Queste reti sono intelligenti perché monitorano in tempo reale la domanda, ottimizzano la distribuzione, riducono le perdite e garantiscono maggiore affidabilità anche in caso di eventi critici.

Il funzionamento delle smart grid si basa su un insieme di componenti che operano in sinergia. Tra questi, i contatori intelligenti (smart meter) costituiscono il punto di contatto tra utente e rete, consentendo la lettura automatica e da remoto dei consumi e l'applicazione di tariffe dinamiche. In Italia è già in corso il piano di sostituzione con contatori di seconda generazione, promosso da e-Distribuzione sotto la supervisione di ARERA.

Un ruolo chiave è svolto dalle infrastrutture ICT e dall'Internet of Things (IoT), che permettono la raccolta e trasmissione dei dati tra produttori, distributori, edifici intelligenti e utenti.

A completare il sistema, gli Energy Management Systems (EMS) bilanciano l'energia su scala locale, mentre l'uso dell'intelligenza artificiale consente di prevedere i picchi di carico e ottimizzare la risposta della rete.

Gli Energy Management System (EMS)

Un Energy Management System (EMS) è un software che monitora, ottimizza e registra i consumi energetici di un'azienda o di un impianto. Utilizza i dati provenienti da sensori e dispositivi di misura per analizzare i trend e prevedere i consumi annuali. Grazie alle informazioni in tempo reale, l'EMS può intervenire sul sistema modificando parametri come frequenza, flussi di carico e stato dei controllori, con l'obiettivo di ridurre i consumi, individuare sprechi, prevedere le prestazioni e ottimizzare l'uso dell'energia per contenere i costi.

Il sistema consente il monitoraggio centralizzato di apparecchiature come impianti HVAC e illuminazione, anche su più sedi, tramite server remoti o piattaforme cloud IoT. Questo riduce i costi operativi, migliora la produttività e automatizza la gestione, limitando l'intervento umano. L'EMS determina le configurazioni più efficienti per produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia, garantendo stabilità, sicurezza e affidabilità. Per farlo, utilizza funzioni avanzate come stima dello stato statico, analisi dei flussi ottimali e valutazione delle contingenze, integrate con sistemi SCADA[29] per il controllo e l'acquisizione dei dati in tempo reale.

Oltre a ottimizzare l'uso dell'energia, l'EMS contribuisce a ridurre le emissioni e a migliorare l'equilibrio energetico. Fornisce una visione globale del sistema, identifica l'impatto dei guasti e permette interventi rapidi per evitare che i problemi si estendano, ripristinando la normale operatività.

Il rapporto tra smart grid e Energy Management System (EMS) è strettissimo: si tratta di due elementi complementari che insieme rendono possibile una gestione intelligente dell'energia.

Smart Grid e EMS: un ruolo complementare. *Insieme rendono possibile una gestione intelligente dell'energia*

- Smart grid è l'infrastruttura fisica e digitale che collega produttori, consumatori e dispositivi attraverso sensori, contatori intelligenti e sistemi di comunicazione. La sua funzione è garantire una rete elettrica flessibile, bidirezionale e capace di reagire in tempo reale alle variazioni di domanda e offerta.
- EMS è il cervello operativo: una soluzione che raccoglie i dati provenienti dalla smart grid, li analizza e li utilizza per ottimizzare i flussi energetici. L'EMS monitora consumi, prevede picchi di carico, riduce sprechi e gestisce la produzione e distribuzione in modo efficiente. Può anche controllare dispositivi come HVAC, illuminazione e sistemi di accumulo, integrandosi con tecnologie IoT e cloud.

Questa sinergia è fondamentale fra l'altro per integrare fonti rinnovabili, supportare la mobilità elettrica e sviluppare comunità energetiche.

Evoluzione del quadro normativo e regolatorio

Il quadro normativo italiano ed europeo converge su obiettivi comuni: digitalizzazione, interoperabilità, integrazione delle rinnovabili e cybersicurezza. Le norme nazionali (ARERA, CEI, PNRR) e le direttive europee (UE 2019/944, Regolamento 2022/869) spingono verso l'adozione di sistemi di smart monitoring per garantire efficienza, resilienza e sostenibilità del sistema elettrico.

In Italia, il quadro regolatorio per le smart grid è in continua evoluzione e si fonda su tre pilastri principali: delibere ARERA, norme tecniche CEI e misure PNRR

ARERA ha promosso lo sviluppo delle smart grid attraverso progetti pilota (Delibera ARG/elt 39/10) e, più recentemente, con obblighi di comunicazione e controllo per impianti di generazione distribuita. Dal 2025, è previsto l'obbligo di installare il Controllore Centrale di Impianto (CCI) per impianti superiori a 100 kW, con comunicazione sicura basata sul protocollo IEC 61850, per garantire stabilità e interoperabilità[30]. Questo strumento consente lo scambio dati tra produttori, distributori e aggregatori, favorendo la gestione attiva della rete[31].

Sul piano tecnico, le norme CEI 0-16 e CEI 0-21 regolano la connessione degli utenti attivi e passivi alle reti di media e bassa tensione, introducendo requisiti per lo scambio informativo e la sicurezza dei dati. Le ultime varianti hanno rafforzato l'adozione di standard internazionali come IEC 61850 per la comunicazione tra dispositivi e sistemi di controllo[32].

Il PNRR e il programma "Italia Digitale 2026" sostengono la digitalizzazione delle infrastrutture elettriche, con investimenti per reti intelligenti, sistemi di accumulo e cybersecurity. Queste misure mirano a favorire l'integrazione delle fonti rinnovabili e la resilienza della rete, in linea con gli obiettivi di decarbonizzazione[33].

Il PNRR e il programma "Italia Digitale 2026" *sostengono la digitalizzazione delle infrastrutture elettriche*

A livello europeo, il quadro normativo è guidato da direttive e piani strategici che puntano alla digitalizzazione delle reti e alla loro evoluzione verso modelli smart. La Direttiva sul mercato interno dell'energia elettrica (UE 2019/944) e il Regolamento (UE) 2022/869 sugli orientamenti per le infrastrutture energetiche transeuropee stabiliscono regole per l'integrazione delle rinnovabili e la flessibilità della rete.

Nel 2023, la Commissione Europea ha presentato il Piano d'Azione per le Reti ("Grids, the Missing Link")[34], che prevede investimenti per 584 miliardi di euro entro il 2030 per modernizzare e digitalizzare le reti elettriche, migliorare la pianificazione a lungo termine e accelerare le autorizzazioni[35].

Inoltre, il pacchetto European Grids Package (2025) mira a semplificare le procedure e a rafforzare la cooperazione transfrontaliera, promuovendo l'uso di tecnologie smart per la gestione delle reti e la sicurezza dell'approvvigionamento[36].

Componenti e tecnologie delle smart grid

Il monitoraggio intelligente si basa su un ecosistema di dispositivi e piattaforme che raccolgono e analizzano dati per ottimizzare le operazioni della rete. Le principali tecnologie includono[37]:

- **Advanced Metering Infrastructure (AMI):** contatori intelligenti che misurano i consumi in tempo reale, supportano tariffe dinamiche e rilevano anomalie. Consentono la comunicazione bidirezionale tra utenti e utility.
- **IoT e Sensoristica Distribuita:** sensori installati su trasformatori, linee e impianti monitorano parametri elettrici e ambientali. Questi dispositivi abilitano automazione, manutenzione predittiva e gestione decentralizzata.
- **SCADA Evoluti:** sistemi di supervisione aggiornati con tecnologie ICT per gestire grandi volumi di dati, identificare guasti e coordinare il ripristino automatico.
- **Intelligenza Artificiale e Machine Learning:** algoritmi che analizzano big data per prevedere guasti, ottimizzare i flussi energetici e migliorare la risposta della rete. Consentono decisioni autonome e predittive.
- **Energy Storage Systems (ESS):** sistemi di accumulo integrati con sensori e algoritmi per gestire la carica/scarica in base a previsioni di domanda e produzione rinnovabile.

Le tecnologie di monitoraggio permettono di rilevare in tempo reale parametri come tensione, corrente, temperatura e carichi, migliorando la resilienza e riducendo le interruzioni. Componenti come sensori, controller, contatori e dispositivi intelligenti sono indispensabili per il monitoraggio in tempo reale, il controllo e l'automazione dei consumi energetici in ambito industriale e commerciale.

La crescente domanda di infrastrutture di misura avanzate, smart grid e sistemi energetici efficienti negli edifici ha accelerato l'adozione di queste

tecnologie. La modernizzazione delle reti richiede investimenti significativi in hardware per garantire una gestione efficace dell'energia. Robustezza, affidabilità e scalabilità rendono questi componenti essenziali per il successo degli EMS.

L'integrazione con IoT e smart grid ha reso queste soluzioni ancora più evolute, grazie alla raccolta di dati da sensori e contatori intelligenti. Inoltre, le piattaforme cloud stanno guadagnando terreno per la loro flessibilità, scalabilità e accesso remoto, ideali per operazioni decentralizzate.

L'uso di intelligenza artificiale e machine learning introduce funzionalità predittive, come la previsione della domanda e l'ottimizzazione degli acquisti energetici, riducendo l'intervento manuale e aumentando l'efficienza.

Tuttavia, la crescente interconnessione tramite IoT e cloud richiede sistemi di cybersicurezza robusti per proteggere i dati e garantire l'integrità delle operazioni.

Focus sulle tecnologie abilitanti

Di seguito, passiamo in rassegna alcune delle principali tecnologie su cui si basano le smart grid e il monitoraggio intelligente.

Sensori elettrici

Il monitoraggio di una rete elettrica richiede dispositivi in grado di rilevare parametri fondamentali per garantire stabilità, efficienza e sicurezza. I sensori elettrici svolgono questo ruolo, trasformando grandezze fisiche in dati digitali che vengono elaborati dai sistemi di controllo e gestione. Questi sensori, collegati a sistemi SCADA o EMS, permettono il monitoraggio continuo, la manutenzione predittiva e la gestione intelligente dei carichi. Possiamo distinguere 5 famiglie principali di sensori elettrici:

- Sensori di corrente: misurano il flusso di energia elettrica nelle linee
- Sensori di tensione: misurano il livello di tensione in diversi punti della rete
- Sensori di potenza e energia: misurano la potenza attiva, reattiva e apparente oltre all'energia consumata
- Sensori di frequenza: rilevano la frequenza della corrente alternata
- Sensori di qualità dell'energia: controllano la qualità dell'energia

SENSORI DI CORRENTE

Monitorano il flusso di energia elettrica nelle linee.

Nelle smart grid, questi dispositivi consentono di rilevare sovraccarichi, squilibri e guasti, fornendo dati in tempo reale ai sistemi di controllo. Grazie alla loro precisione, permettono di ottimizzare la distribuzione dei carichi e prevenire interruzioni del servizio.

SENSORI DI TENSIONE

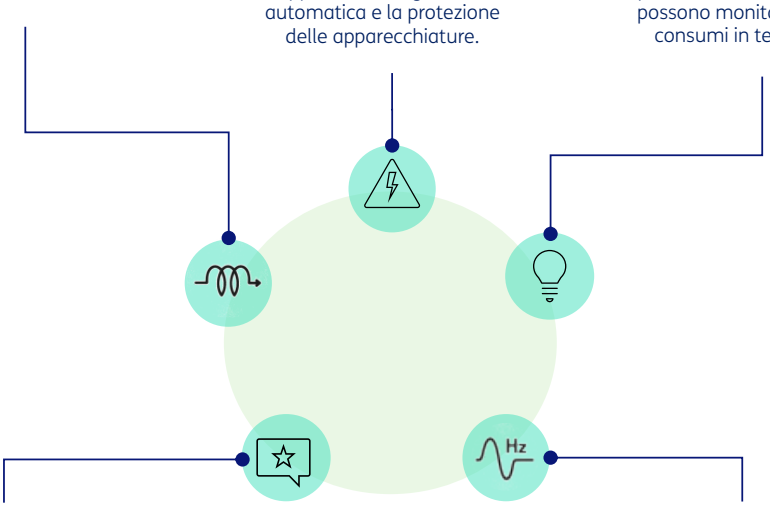
Misurano il livello di tensione in diversi punti della rete.

Nelle smart grid, il loro ruolo è cruciale per garantire la qualità dell'energia e la stabilità del sistema, soprattutto in presenza di fonti rinnovabili che possono causare variazioni di tensione. Questi sensori supportano la regolazione automatica e la protezione delle apparecchiature.

SENSORI DI POTENZA/ENERGIA

Misurano la potenza attiva, reattiva e apparente, oltre all'energia consumata.

Nelle smart grid, questi sensori sono indispensabili per il bilanciamento dei flussi energetici, la fatturazione dinamica e la gestione della domanda. Consentono alle utility di ottimizzare la produzione e ridurre le perdite, mentre i consumatori possono monitorare i propri consumi in tempo reale



SENSORI DI QUALITÀ DELL'ENERGIA

Controllano la qualità dell'energia, rilevando disturbi, armoniche e variazioni di tensione.

Nelle smart grid, questi sensori garantiscono che l'energia distribuita sia stabile e sicura, proteggendo apparecchiature sensibili e migliorando l'efficienza complessiva del sistema

SENSORI DI FREQUENZA

Rilevano la frequenza della corrente alternata, parametro essenziale per la stabilità del sistema.

Nelle smart grid, il monitoraggio della frequenza permette di bilanciare produzione e consumo, prevenire blackout e gestire l'integrazione delle rinnovabili, che possono causare oscillazioni significative.

SENSORI DI CORRENTE	SENSORI DI TENSIONE	SENSORI DI POTENZA ED ENERGIA	SENSORI DI FREQUENZA	SENSORI DI QUALITÀ DELL'ENERGIA
•Trasformatori di corrente (CT) •Sensori ad effetto Hall •Bobine di Rogowsky	•Trasduttori di tensione •Divisori di tensione •Sensori ottici	•Analizzatori di rete •Trasduttori di potenza •Contatori intelligenti	•PMU (Phasor Measurement •Unit) •Analizzatori di rete	•Analizzatori di armoniche •Sensori di sfasamento •Filtri attivi

Sensori ambientali

I sensori ambientali sono dispositivi che rilevano parametri fisici e climatici che possono influenzare il funzionamento della rete elettrica e delle apparecchiature. Nelle smart grid e nei sistemi di monitoraggio intelligente, questi sensori hanno un ruolo strategico perché permettono di prevenire guasti e ottimizzare la manutenzione. I più comuni sono:

- Sensori di temperatura: monitorano il calore generato da trasformatori, quadri elettrici e linee. Un aumento anomalo può indicare sovraccarichi o problemi di isolamento.
- Sensori di umidità: rilevano la presenza di umidità che può compromettere l'isolamento elettrico e causare cortocircuiti.
- Sensori di vibrazione: utilizzati per controllare lo stato di macchinari e trasformatori; vibrazioni eccessive possono segnalare usura o guasti imminenti.
- Sensori di pressione: impiegati in apparecchiature come interruttori o sistemi di raffreddamento.
- Sensori di qualità dell'aria: in ambienti chiusi, monitorano polveri e gas che possono danneggiare componenti elettronici.

Internet of Things (IoT) nell'energy management

L'integrazione dell'Internet of Things (IoT) è un elemento chiave nei sistemi di gestione dell'energia (EMS), perché migliora l'efficienza, il controllo e l'ottimizzazione dei consumi in tutti i settori.

Tutti i sensori di cui abbiamo parlato, sia elettrici sia ambientali, sono sensori IoT distribuiti, che comunicano via protocolli wireless (ZigBee, LoRaWAN, LTE, 5G). Possono essere uniti a dispositivi quali Gateway e Edge Devices, che raccolgono dati dai sensori e li elaborano localmente prima di inviarli al cloud. In tal modo riducono la latenza, consentendo decisioni rapide per funzioni critiche come il bilanciamento dei carichi e la protezione della rete.

Grazie ai dispositivi IoT collegati al software EMS, dunque, è possibile monitorare in tempo reale, analizzare i dati e attivare manutenzione predittiva. I sensori e i contatori intelligenti raccolgono informazioni su consumi, prestazioni degli impianti e condizioni ambientali, che vengono elaborate dal sistema per ottimizzare la gestione dell'energia e ridurre i costi.

L'IoT non solo potenzia l'hardware, ma trasforma anche i servizi: il monitoraggio remoto, la manutenzione predittiva e le verifiche energetiche diventano più rapide ed efficaci, consentendo interventi proattivi e personalizzati. In ambito domestico, l'IoT permette di controllare da remoto termostati, illuminazione e elettrodomestici, favorendo risparmi e comfort. Negli edifici commerciali, sensori IoT monitorano occupazione, temperatura e umidità, regolando dinamicamente i consumi. In ambito industriale, il monitoraggio in tempo reale delle macchine riduce sprechi e fermi impianto, migliorando l'efficienza complessiva.

L'integrazione IoT è utile sia per sistemi locali (on-premise), che garantiscono sicurezza e controllo immediato, sia per soluzioni cloud, che consentono il monitoraggio di più siti contemporaneamente e offrono scalabilità e flessibilità.

Uso dell'Intelligenza artificiale nelle infrastrutture energetiche

L'intelligenza artificiale (AI) sta assumendo un ruolo sempre più centrale nei sistemi di gestione dell'energia (EMS), rivoluzionandone funzionalità ed efficienza. Grazie agli algoritmi di machine learning, i software EMS possono analizzare grandi quantità di dati in tempo reale, individuare schemi e anomalie nei consumi e prevedere i fabbisogni futuri. Questo consente di ottimizzare la distribuzione delle risorse, ridurre sprechi e prendere decisioni autonome.

L'AI si integra anche nell'hardware: sensori, contatori e controller intelligenti sono in grado di adattarsi alle condizioni senza intervento umano, migliorando le prestazioni nel tempo. I contatori smart dotati di AI gestiscono i flussi energetici con maggiore precisione, mentre i controller regolano dinamicamente i consumi in base alle condizioni reali.

In ambito domestico, l'AI permette di personalizzare la gestione dell'energia: apprende le abitudini degli utenti e regola automaticamente riscaldamento, raffrescamento e illuminazione, creando ambienti più confortevoli ed efficienti. Nei grandi edifici e negli impianti industriali, l'AI analizza dati provenienti da sensori IoT, previsioni meteo e orari di occupazione per ottimizzare HVAC, illuminazione e processi produttivi. Nel settore energetico, l'AI è cruciale per prevedere la domanda, bilanciare i carichi e integrare le fonti rinnovabili, migliorando la stabilità delle smart grid.

Machine Learning e reti energetiche

Il machine learning (ML) sta rivoluzionando i sistemi di gestione dell'energia (EMS), offrendo strumenti avanzati per ottimizzare i consumi, migliorare l'efficienza e favorire l'innovazione. Grazie all'analisi dei dati e alla capacità predittiva, il ML consente di trasformare il modo in cui l'energia viene gestita in ambito residenziale, commerciale e industriale.

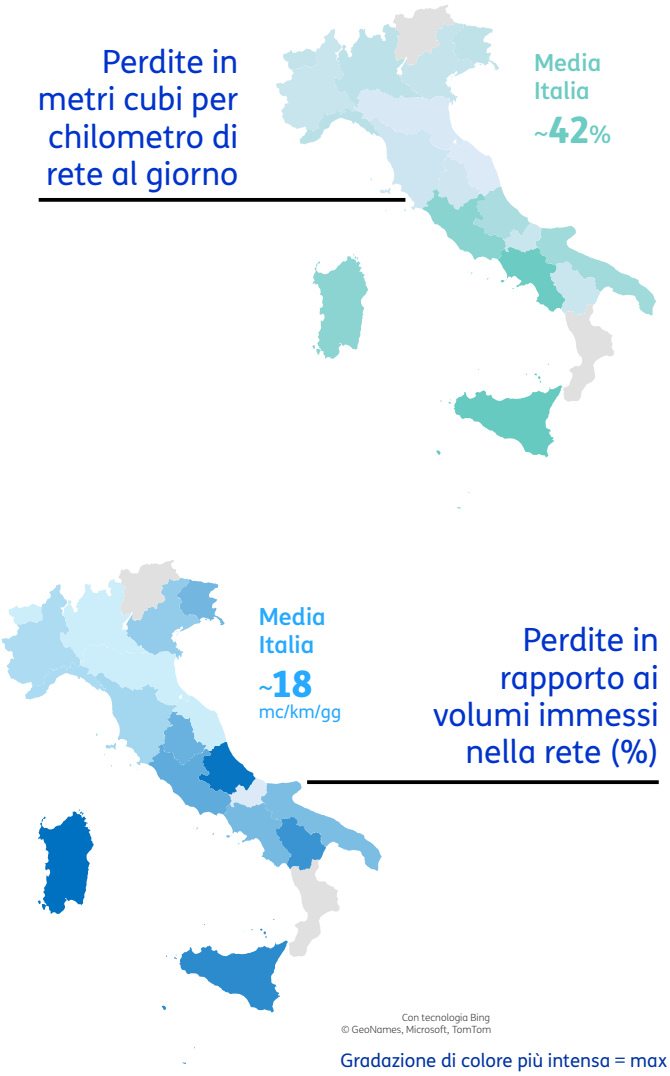
Una delle applicazioni più importanti è la previsione della domanda energetica: analizzando dati storici e fattori esterni come meteo, indicatori economici e trend di mercato, gli algoritmi di ML possono stimare con precisione i fabbisogni futuri. Questo aiuta le utility e i gestori di rete a bilanciare domanda e offerta, ridurre sprechi e integrare meglio le fonti rinnovabili.

In ambito industriale, il ML permette di anticipare i guasti delle apparecchiature, programmando interventi di manutenzione preventiva e riducendo i fermi impianto. Nei grandi edifici, il ML ottimizza la gestione integrata di HVAC, illuminazione e sicurezza, adattando i consumi in base all'occupazione, alle condizioni climatiche e ai prezzi dell'energia. Inoltre, il ML è fondamentale per la gestione dei sistemi di accumulo, prevedendo quando caricare o scaricare le batterie in funzione della domanda e delle condizioni di rete, massimizzando il valore dell'energia immagazzinata.

Monitoraggio intelligente delle reti idriche: la rivoluzione della digitalizzazione

L'acqua è una risorsa vitale e limitata, essenziale per la vita, la salute e lo sviluppo economico. Tuttavia, la crescente pressione dovuta all'aumento della popolazione, ai cambiamenti climatici e all'inquinamento ha reso la gestione delle risorse idriche una sfida globale. Secondo il Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche, la scarsità idrica è destinata ad aumentare, con una carenza globale stimata del 40% entro il 2030 se non verranno adottate misure efficaci di gestione e monitoraggio[38]. Secondo l'OCSE, la domanda di acqua crescerà del 55% entro il 2050[39], rendendo indispensabile prevenire sprechi e perdite attraverso tecniche avanzate di rilevamento e monitoraggio.

Il monitoraggio delle reti idriche è cruciale per garantire una distribuzione efficiente e ridurre le perdite. In Italia, la situazione è particolarmente critica: circa il 42% dell'acqua immessa nelle reti di distribuzione viene dispersa, con punte superiori al 50% nel Mezzogiorno[40].



Gradazione di colore più intensa = max
Fonte: ARERA

Queste perdite derivano da rotture delle condotte, giunti difettosi e allacci abusivi, con gravi ripercussioni economiche, sociali e ambientali. La digitalizzazione e l'uso di tecnologie smart, come sensori IoT e sistemi di telecontrollo, sono strumenti fondamentali per affrontare questa sfida, consentendo il rilevamento tempestivo delle anomalie e la manutenzione predittiva[41].

Il monitoraggio delle reti idriche è cruciale per garantire una distribuzione efficiente e ridurre le perdite. Le principali criticità che affliggono il sistema nazionale di gestione delle risorse idriche sono[42]:

1. la carenza e/o l'inefficienza delle infrastrutture;
2. la siccità (che negli ultimi anni si manifesta con crescente rilevanza e ricorrenza);
3. la carenza di investimenti;
4. la frammentazione delle gestioni;
5. i prelievi di acqua per usi civili (che sono tra i più alti in Europa).

La situazione delle perdite (l'acqua immessa nelle reti di distribuzione che viene dispersa), che costituiscono uno degli indicatori più immediati dello stato di efficienza della rete, in Italia è particolarmente critica: secondo i dati sullo stato del servizio idrico integrato (SII) nell'anno 2023[43]:

- l'indicatore M1a "Perdite idriche lineari" fa segnare a livello nazionale un valore di 17,9 m3/km/gg, con punte di oltre 30 m3/km/gg nelle regioni del Centro-Sud;
- per l'indicatore M1b "Perdite idriche percentuali" si registra un valore di 41,8% sull'intero territorio nazionale, e punte di oltre il 55% in alcune regioni del Mezzogiorno[44]. Queste perdite derivano da rotture delle condotte, giunti difettosi e allacci abusivi, con gravi ripercussioni economiche, sociali e ambientali. La digitalizzazione e l'uso di tecnologie smart, come sensori IoT e sistemi di telecontrollo, sono strumenti fondamentali per affrontare questa sfida, consentendo il rilevamento tempestivo delle anomalie e la manutenzione predittiva[45].

A livello globale, oltre due miliardi di persone vivono in aree sottoposte a stress idrico, e il 45% della popolazione mondiale non ha accesso a strutture igienico-sanitarie sicure. In questo contesto, il monitoraggio intelligente delle reti idriche non è solo una questione tecnica, ma una priorità strategica per la sicurezza idrica e il raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG)[46].

Per ridurre sprechi e perdite, le utility stanno implementando soluzioni di Smart Water Management (SWM) basate su tecnologie digitali come cloud, IoT, 5G, smart metering e Advanced Metering Infrastructure (AMI). Questi strumenti consentono:

- Misurazioni quasi in tempo reale dei consumi.
- Monitoraggio della qualità dell'acqua.
- Riduzione delle perdite non contabilizzate (NRW) dovute a errori di lettura, consumi non autorizzati o guasti alle reti.

L'IoT e le comunicazioni cellulari (es. 5G) migliorano l'efficienza operativa e la resilienza delle infrastrutture, permettendo il controllo remoto di impianti e sensori. Il 5G, in particolare, consente il monitoraggio accurato della qualità delle acque reflue industriali in tempo reale. Inoltre, le soluzioni cloud stanno guadagnando terreno per la loro scalabilità e costi ridotti, favorendo l'adozione anche in contesti con budget limitati.

Normativa e strategie europee

In Italia, l'adozione di sistemi di smart water monitoring è fortemente sostenuta dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), che prevede l'installazione di smart meters, sistemi di telecontrollo e piattaforme digitali per trasformare le reti tradizionali in reti intelligenti, migliorando la resilienza e l'efficienza del servizio[47].

Un altro riferimento normativo chiave è rappresentato dalle delibere ARERA e dal Regolamento sulla Qualità Tecnica del Servizio Idrico (RQTI), che stabiliscono indicatori di performance e sistemi di incentivazione per le utility, favorendo investimenti in soluzioni digitali e monitoraggio continuo[48]. Inoltre, le norme UNI e ISO forniscono linee guida tecniche per garantire interoperabilità, sicurezza dei dati e conformità alle best practice internazionali.

A livello europeo, il quadro normativo è guidato dalla Direttiva Quadro sulle Acque (2000/60/CE), che impone agli Stati membri di adottare misure per la gestione sostenibile delle risorse idriche, e dalla Direttiva Acque Potabili (UE 2020/2184), recepita in Italia con il D.Lgs. 23 febbraio 2023, n. 18. Quest'ultima introduce un approccio basato sulla gestione del rischio lungo tutta la filiera, dal prelievo fino al punto di utilizzo, e richiede sistemi di monitoraggio continuo per garantire la qualità dell'acqua[49].

La Strategia Europea per la Resilienza Idrica (2023) promuove la digitalizzazione delle reti come leva per ridurre le perdite e migliorare l'efficienza idrica del 10% entro il 2030. Tra le azioni previste figurano l'adozione di soluzioni smart, infrastrutture verdi e pratiche di gestione intelligente delle risorse idriche[50]. Inoltre, programmi come ICT4Water e Horizon Europe finanziano progetti innovativi basati su IoT, cloud computing, gemelli digitali e analisi predittiva per ottimizzare la gestione delle reti idriche[51].

Tecnologie per il water monitoring

Smart Meter

Si distinguono due principali tipologie, AMR (Automatic Meter Reading) e AMI (Advanced Metering Infrastructure)

I contatori AMR sono tecnologie di smart metering progettate per aiutare le aziende idriche a risolvere problemi come l'accesso ai dati dei contatori, la fatturazione imprecisa e la scarsa qualità del servizio clienti. L'obiettivo dell'AMR è consentire alle utility di ridurre i consumi idrici attraverso la gestione remota.

Nei sistemi tradizionali, la lettura dei contatori avviene manualmente, mentre l'AMR permette la lettura remota, riducendo i costi e aumentando l'accuratezza. I sistemi AMR possono essere walk-by, drive-by o fixed-base, evitando la necessità di visitare fisicamente ogni contatore.

Limite principale: la trasmissione dei dati è unidirezionale: le utility possono solo leggere i dati da remoto tramite reti mobili o linee fisse, senza possibilità di inviare comandi al contatore. Alcuni AMR avanzati (AMR+) includono moduli aggiuntivi per interrogare o riprogrammare i contatori, ma restano meno evoluti rispetto agli AMI.

L'AMI è una tecnologia basata su rete che utilizza una comunicazione bidirezionale tra i contatori e il sistema centrale. Oltre ai vantaggi dell'AMR, l'AMI consente:

- Raccolta dei dati più frequente e dettagliata.
- Analisi avanzata per fatturazione, monitoraggio dei consumi e gestione della domanda.
- Funzioni di controllo remoto, come attivazione/disattivazione del servizio da un'unica postazione.
- Integrazione con sistemi di gestione dati (MDM) e pianificazione (MCI).
- Miglioramento del servizio clienti grazie a strumenti digitali e automazione.

L'AMI è considerato un sistema più evoluto e intelligente, con capacità di analisi, archiviazione e utilizzo di grandi volumi di dati. Nei prossimi anni, sostituirà i sistemi tradizionali in ambito residenziale, commerciale e industriale per rispondere alla crescente domanda di funzionalità avanzate.

Internet of Things (IoT) nel water management

Nel contesto della **gestione intelligente dell'acqua (Smart Water Management)**, l'IoT è determinante per ottimizzare e controllare l'uso delle risorse idriche a diversi livelli: domestico, comunitario e nazionale. Uno dei principali vantaggi è la **trasparenza dei processi** lungo tutta la catena di distribuzione dell'acqua, migliorando il monitoraggio, la rilevazione delle perdite e la pianificazione delle risorse. Integrato con algoritmi di **Machine Learning**, l'IoT fornisce dati e insight utili per analisi e reportistica.

Vediamo quali sono i sensori utili alla raccolta delle informazioni in questo campo, tenendo presente che, integrati con tecnologie IoT, trasmettono dati in tempo reale a piattaforme, consentendo analisi avanzate e automazione dei processi:

I **sensori di portata** sono dispositivi fondamentali nei sistemi di **smart water metering**, poiché misurano la quantità di acqua che attraversa una tubazione in un determinato intervallo di tempo. Grazie a questa

funzione, consentono di monitorare i consumi in modo preciso e in tempo reale, riducendo sprechi e migliorando la gestione delle risorse idriche[52].

Esistono diverse tecnologie per la misura della portata:

- **Sensori a ultrasuoni**, che utilizzano onde sonore per calcolare la velocità del flusso e, di conseguenza, la portata. Sono non invasivi e molto precisi, ideali per applicazioni smart.
- **Sensori elettromagnetici**, basati sul principio di induzione elettromagnetica, adatti a liquidi conduttivi e molto affidabili per reti idriche complesse.
- **Sensori meccanici**, che sfruttano giranti o turbine per rilevare il flusso. Sono più tradizionali, ma ancora utilizzati in contesti domestici.

Questi sensori permettono:

- **Monitoraggio dei consumi** per fatturazione e analisi.
- **Individuazione di perdite,** grazie alla rilevazione di variazioni anomale di portata.
- **Ottimizzazione della distribuzione,** bilanciando pressione e flusso nella rete.
- **Supporto alla sostenibilità**, riducendo sprechi e migliorando la gestione delle risorse idriche[53].

Integrati con tecnologie IoT, i sensori di portata trasmettono i dati a piattaforme cloud, dove vengono analizzati per attivare allarmi, gestire tariffe dinamiche e pianificare interventi di manutenzione predittiva.

Sensori di pressione. Sono dispositivi che misurano la forza esercitata dall'acqua su una superficie, convertendo questa grandezza fisica in un segnale digitale utile per il monitoraggio e la gestione delle reti idriche. Il principio di funzionamento si basa sulla relazione tra pressione e altezza del fluido: maggiore è il livello dell'acqua, maggiore sarà la pressione rilevata. Questo consente di determinare parametri fondamentali come **pressione nelle tubazioni, livello dell'acqua in serbatoi** e **portata**, garantendo un controllo accurato delle infrastrutture idriche[54] (SenTec, 2022). Ad esempio, il monitoraggio della pressione nelle condotte consente di rilevare anomalie, guasti o perdite, in supporto alla manutenzione predittiva, prevenendo rotture e riducendo i costi operativi.

Sensori di livello. Sono dispositivi progettati per misurare l'altezza o il volume di un liquido in serbatoi, vasche o condotte, convertendo questa informazione in un segnale digitale. Sono fondamentali nei sistemi di **smart water metering** e nella gestione intelligente delle reti idriche[55], poiché consentono di monitorare in tempo reale la disponibilità di acqua e di ottimizzare i processi di distribuzione e stoccaggio[56].

Tecnologie più comuni

- **Sensori a ultrasuoni:** misurano la distanza tra il sensore e la superficie del liquido tramite onde sonore.
- **Sensori capacitivi:** rilevano variazioni di capacità elettrica dovute alla presenza del liquido.
- **Sensori a pressione idrostatica:** calcolano il livello in base alla pressione esercitata dal liquido.
- **Sensori radar**: utilizzano onde elettromagnetiche per misurazioni precise anche in condizioni difficili.

Sensori di qualità dell'acqua. Monitorano parametri chimici e fisici che determinano la potabilità e la sicurezza dell'acqua. Questi sensori rilevano

valori come **pH, torbidità, conducibilità elettrica, temperatura, cloro residuo** e, in alcuni casi, la presenza di contaminanti. Sono fondamentali nei sistemi di **smart water management,** perché consentono di garantire standard di qualità e di intervenire tempestivamente in caso di anomalie[57]. Sono utilizzati in acquedotti, impianti di trattamento, reti di distribuzione e applicazioni industriali.

Tecnologie più comuni

- **Sensori elettrochimici**: per pH, cloro e conducibilità.
- **Sensori ottici**: per torbidità e colore.
- **Sensori termici**: per temperatura.
- **Sensori avanzati IoT**: integrati con piattaforme cloud per analisi predittive e automazione.

Sensori di temperatura. Sono progettati per rilevare e monitorare la temperatura dell'acqua e dell'ambiente circostante, convertendo questa informazione in dati digitali. Sono fondamentali nei sistemi di smart water metering e nella gestione intelligente delle reti idriche, poiché la temperatura influisce sulla qualità dell'acqua, sulla formazione di batteri e sull'efficienza dei processi di trattamento[58]. Sono utilizzati in acquedotti, impianti di trattamento, reti di distribuzione e applicazioni domestiche.

Tecnologie più comuni

- **Sensori termistori**: rilevano variazioni di resistenza elettrica in funzione della temperatura.
- **Sensori a infrarossi:** misurano la temperatura senza contatto diretto.
- **Sensori integrati IoT**: trasmettono dati in tempo reale a piattaforme cloud per analisi predittive e automazione.

Tipologia di sensore	Funzione principale	Applicazioni
Sensori di pressione	Misurano la pressione dell'acqua nelle tubazioni e serbatoi	Rilevamento perdite, controllo pompe, sicurezza rete
Sensori di livello	Monitorano il livello dell'acqua in serbatoi e vasche	Gestione riserve idriche, automazione riempimento
Sensori di portata	Misurano il volume di acqua che attraversa una tubazione	Fatturazione, monitoraggio consumi, rilevamento perdite
Sensori di qualità dell'acqua	Analizzano parametri chimici e fisici (pH, torbidità, cloro)	Controllo potabilità, trattamento acque, allarmi
Sensori di temperatura	Rilevano la temperatura dell'acqua e dell'ambiente	Prevenzione proliferazioni batteriche, processi industriali

Big Data Analytics

L'analisi dei Big Data è fondamentale per dare valore alla grande quantità di dati raccolti ogni giorno dai dispositivi IoT. Questa tecnologia consente di trasformare i dati grezzi in informazioni utili per supportare decisioni più accurate, ridurre i costi operativi e migliorare la gestione delle risorse. Nel settore idrico, il big data analytics permette di analizzare dati provenienti da diverse fonti, come registri di manutenzione, sensori visivi e acustici, tablet di campo e sistemi GPS. Grazie a queste analisi, è possibile ottimizzare la gestione delle reti, individuare perdite e migliorare l'affidabilità del servizio. Inoltre, tecniche come analisi predittiva e data mining aiutano a prevenire problemi e a pianificare interventi mirati, rendendo la rete più sostenibile e resiliente.

5G Network

Il 5G è la quinta generazione delle reti cellulari e introduce capacità avanzate che rivoluzionano la connettività. Una delle principali innovazioni del 5G è l'accelerazione dell'**Internet of Things (IoT)**: consente di connettere un numero molto maggiore di dispositivi in modo affidabile e sicuro, senza interruzioni. Questo è cruciale per settori data-driven come la gestione intelligente dell'acqua e delle infrastrutture, dove la comunicazione rapida e stabile è indispensabile. Il 5G si aggiunge alle tecnologie di comunicazione tradizionalmente utilizzate per il water metering, basate su protocolli IoT e reti a basso consumo energetico, progettate per trasmettere dati in modo sicuro ed efficiente, quali:

NB-IoT (Narrowband Internet of Things): Standard 3GPP su banda cellulare, ideale per trasmissioni a lungo raggio e basso consumo. Vantaggi: Copertura estesa, alta penetrazione indoor, sicurezza elevata.

LoRaWAN: Protocollo LPWAN proprietario su frequenze non licenziate, ottimizzato per comunicazioni a lungo raggio e basso consumo. Vantaggi: Costi ridotti, autonomia elevata, ideale per zone remote.

Sigfox: Rete LPWAN globale con protocollo proprietario, progettata per trasmissioni di piccoli pacchetti dati. Vantaggi: Consumo energetico minimo, semplicità di implementazione.

Wireless M-Bus (wM-Bus): Standard aperto per lettura remota dei contatori, opera su bande non licenziate. Vantaggi: Compatibilità con sistemi esistenti, possibilità di reti private.

GSM/GPRS: Tecnologie cellulari tradizionali standard per trasmissione dati. Vantaggi: Affidabilità, copertura globale, integrazione con infrastrutture esistenti.

Edge Computing e Digital Twin

Edge computing è una tecnologia chiave per la gestione intelligente dell'acqua. Consiste nell'elaborare e analizzare i dati direttamente vicino alla loro fonte, senza inviarli a server remoti. Questo approccio permette di:

- Analizzare i dati in tempo reale, rilevando immediatamente perdite, problemi di qualità dell'acqua o regolando le pompe.
- Ridurre la latenza, evitando ritardi che potrebbero compromettere applicazioni sensibili.
- Aumentare la sicurezza e la privacy, mantenendo i dati all'interno della rete locale e riducendo il rischio di violazioni durante la trasmissione.

Grazie a queste caratteristiche, l'edge computing

consente ai sistemi di gestione idrica di reagire rapidamente alle variazioni delle condizioni operative, migliorando efficienza e affidabilità.

I digital twin sono modelli virtuali che replicano sistemi fisici, consentendo il monitoraggio e l'analisi in tempo reale. Questa tecnologia permette di simulare scenari per prevedere il comportamento del sistema e supportare decisioni più informate nella gestione delle risorse idriche. Grazie ai digital twin, è possibile:

- Monitorare costantemente lo stato delle reti idriche, individuando problemi in fase iniziale e applicando soluzioni mirate.
- Prevedere criticità sulla qualità dell'acqua attraverso analisi predittive, adottando misure preventive prima che diventino emergenze.

Intelligenza artificiale (AI)

Nella gestione delle risorse idriche, l'AI può combinare proiezioni di crescita con analisi delle condizioni delle infrastrutture per ottimizzare gli investimenti. Inoltre, permette di automatizzare ispezioni di reti di approvvigionamento idrico e fognarie, verificare l'accuratezza dei contatori e offrire piattaforme online personalizzate per monitorare i consumi, pagare bollette e accedere a informazioni aggiornate sulle risorse idriche.

Seconda parte

Lo scenario **europeo**

Dalla "connettività fisica" alle «piattaforme abilitanti»

Nella visione europea, infrastrutture e reti hanno sempre giocato un ruolo centrale per promuovere uno sviluppo economico e sociale dell'Unione, ma nel corso degli ultimi trent'anni si è trasformata profondamente la loro funzione strategica per riflettere le priorità politiche di ciascuna fase storica.

Anni '90 – Le fondamenta del mercato unico

Dalla metà degli anni 80, prima del Trattato di Maastricht che darà vita all'UE (1992), si inizia a porre il tema dei differenti livelli di sviluppo delle aree che costituiscono quella che – allora – era solamente una Comunità Economica Europea. Se l'obiettivo è quello di realizzare un'Europa unita, occorre superare le disparità, aumentare la coesione tra i Paesi ed integrare i diversi contesti economici nazionali in un unico grande mercato. Per realizzare "un mercato interno unico integrato, senza restrizioni al movimento delle merci; l'eliminazione degli ostacoli alla libera circolazione delle persone, dei servizi e dei capitali" sono necessarie infrastrutture adeguate per rafforzare le connessioni "fisiche" tra i mercati nazionali. Il tema non è soltanto economico, ma anche politico: nella maggior parte dei casi i grandi settori infrastrutturali – trasporto, energia, telecomunicazioni, acqua – sono quasi ovunque dei monopoli pubblici, a parte alcune eccezioni, come il Regno Unito. Occorre quindi adeguare gli assetti e convergere verso modelli più omogenei[59]. Questo processo apre la strada alla liberalizzazione delle utilities e alla privatizzazione degli operatori – che all'epoca operavano in regime di monopolio – attuata in modo differente nei vari Paesi Membri. Inoltre, si pone la necessità di progettare uno sviluppo infrastrutturale condiviso. Nel Trattato di Maastricht viene inserito un apposito punto (il Titolo XII) che pone il tema della realizzazione di reti comuni: "la Comunità concorre alla costituzione e allo sviluppo di reti transeuropee nei settori delle infrastrutture dei trasporti, delle telecomunicazioni e dell'energia", nonché quello di garantire l'interconnessione e l'interoperabilità delle reti nazionali[60]. A tale scopo viene anche istituito il Fondo di Coesione (1994), uno strumento finanziario specifico per agevolare la realizzazione di opere ambientali, in particolare le reti transeuropee.

Con il progetto TEN-T Reti Transeuropee dei trasporti, si avvia una pianificazione comune delle infrastrutture viarie e ferroviarie, identificando gli assi portanti di collegamento. Le TEN-T rispondono a due esigenze fondamentali:

- Coesione territoriale: ridurre il divario tra regioni centrali e periferiche, favorendo l'accessibilità e l'inclusione economica.
- Competitività globale: dotare l'Europa di infrastrutture moderne per competere con Stati Uniti e Giappone, in un'epoca di crescente globalizzazione.
- A questo progetto si aggiungono successivamente analoghe iniziative per l'integrazione delle infrastrutture nazionali dell'energia (TEN-E) e delle telecomunicazioni (eTEN), come previsto dal Trattato.

Primi anni 2000 – Allargamento e digitalizzazione

Il nuovo millennio porta con sé due fenomeni dirompenti: l'allargamento dell'UE ai Paesi dell'Est e la rivoluzione digitale. L'ingresso di 10 nuovi Paesi Membri con reti meno sviluppate e disomogenee, impone una strategia di armonizzazione. La Strategia di Lisbona (2000) individua il nuovo fronte di sfida: trasformare l'Unione Europea in un'economia della conoscenza capace di competere in un mercato globale. In questo contesto, le reti non sono più solo connessioni fisiche, ma assumono una dimensione immateriale, diventando **infrastrutture abilitanti dell'innovazione** essenziali a sostenere la competitività e la crescita economica.

Seguendo questo impulso, nel primo decennio degli anni 2000, si investe nello sviluppo della banda larga e nei servizi digitali. Si lancia il 3G che permette la connessione ad Internet in mobilità. Si iniziano a porre le basi per lo sviluppo di un mercato unico digitale, che diventerà l'obiettivo della Digital Agenda for Europe (2010), il programma che deve portare l'Unione Europea a competere con USA e paesi asiatici nello sviluppo delle tecnologie digitali. Allo stesso tempo, si amplia la portata delle reti di trasporto TEN-T, includendo anche i nuovi territori dell'Est al fine di garantire continuità territoriale e promuovere lo sviluppo economico rafforzando la competitività del mercato unico. Giungono progressivamente a compimento i processi di liberalizzazione nel settore dell'energia – dopo quello delle telecomunicazioni – e si aprono spazi per investimenti privati e partenariati pubblico-privati.

Il tema della sostenibilità ambientale inizia ad affermarsi nelle agende politiche europee all'inizio del 2000, trovando una prima espressione normativa nella Direttiva Quadro sulle Acque (2000/60/CE) che rappresenta una svolta nella gestione delle risorse idriche: l'acqua viene riconosciuta come patrimonio da proteggere e si introduce l'obbligo per gli Stati membri di redigere Piani di Gestione dei Bacini Idrografici. Pochi anni più tardi, il settore idrico viene escluso dalla Direttiva Servizi del 2006 (nota come Direttiva Bolkestein) impedendo la liberalizzazione del mercato che si stava iniziando a progettare in alcuni Paesi. Questa scelta rafforza l'idea dell'acqua come bene comune e contribuisce a consolidare un approccio più prudente alla gestione dei servizi idrici.

Anni 2020 – Crisi, transizione e autonomia strategica

Il terzo decennio è segnato da shock sistemici: pandemia, conflitti, crisi energetica e tensioni geopolitiche. Questi eventi accelerano il ripensamento delle politiche infrastrutturali, orientandole verso resilienza, sostenibilità e autonomia strategica.

Il Green Deal europeo (2019), il Next Generation EU (2020) e il Digital Compass (2021) ridefiniscono le priorità: reti intelligenti, decarbonizzate e digitali. L'Europa ambisce a diventare un punto di riferimento nella transizione ecologica e nella trasformazione digitale delle società, ma le tensioni ed i conflitti mettono in luce l'eccessiva dipendenza delle filiere strategiche europee dalle scelte di fornitori extra-UE. Per questo è necessario promuovere un sistema più autonomo e sovrano. In questo contesto, l'infrastruttura diventa una **piattaforma abilitante** per la sovranità tecnologica ed energetica, con obiettivi di sicurezza e indipendenza dalle catene di approvvigionamento globali.

Per sostenere questa trasformazione, vengono attivati una serie di strumenti finanziari, in particolare:

- il Recovery & Resilience Facility (2021), un dispositivo temporaneo di supporto previsto dal programma NextGenerationEU per risollevare

le economie europee dopo la pandemia di Covid-19. Tra gli obiettivi principali vi è l'attivazione di investimenti per infrastrutture moderne e sostenibili, nell'ambito della transizione verde e digitale;

- il Digital Europe Programme (2021) finalizzato allo sviluppo di infrastrutture cloud, AI e cybersecurity "Made in Europe" per ridurre la dipendenza tecnologica da altri sistemi concorrenti;
- il RePowerEU (2022) in risposta alla crisi energetica seguita all'avvio del conflitto russo-ucraino, che si concentra sullo sviluppo di fonti rinnovabili e sul miglioramento delle interconnessioni tra sistemi energetici europei.

Questi nuovi dispositivi si affiancano ai programmi consolidati come il CEF (Connecting Europe Facility), lanciato nel 2014 per promuovere lo sviluppo di reti transeuropee nei settori trasporti, energia e digitale. Inoltre, per sostenere progetti con un maggiore margine di rischio, si riprogetta il Programma Juncker – che prende il nome di InvestEU – dedicando una parte del Bilancio dell'Unione a garanzia delle iniziative sostenute dalla Banca Europea degli Investimenti. Vengono infine rafforzati gli IPCEI (Important Project of Common European Interest) per promuovere la collaborazione tra Stati membri, imprese e centri di ricerca, al fine di sostenere l'innovazione e lo sviluppo tecnologico in settori ritenuti strategici superando possibili limiti e fallimenti di mercato e generando benefici diffusi per l'Unione. Un articolato sistema di programmi strategici, fondi, iniziative con il comune obiettivo di spingere l'Europa a potenziare la propria dotazione infrastrutturale e rafforzare le proprie ambizioni tecnologiche aumentando la resilienza, la competitività e la coesione economica dell'Unione.

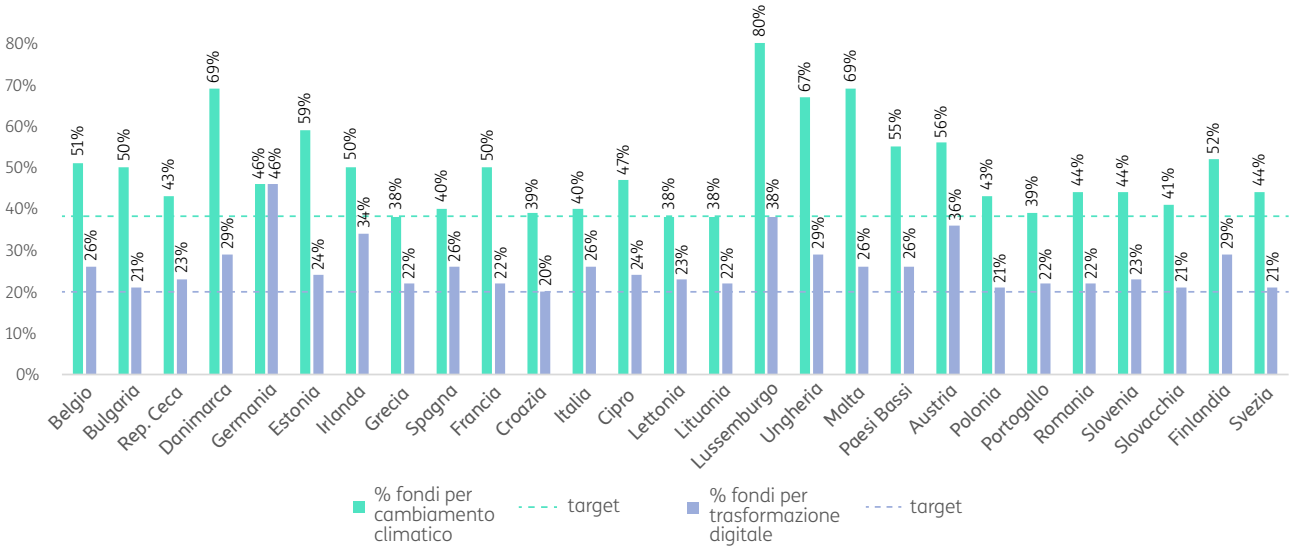
Analogamente al Green Deal, il Blue Deal – proposto nel 2023 dal Comitato Economico e Sociale Europeo (EESC) – riconosce l'acqua come priorità strategica e invita l'UE ad adottare una politica idrica integrata e resiliente. La proposta include la creazione di un Blue Transition Fund per finanziare infrastrutture idriche sostenibili e promuovere la resilienza idrica in Europa. Nel 2025, con la risoluzione del Parlamento europeo sulla strategia per la resilienza idrica, viene proposto un target di efficienza idrica del 10% entro il 2030. Sebbene non vincolante, questo obiettivo orienta il settore a intervenire per rendere più efficienti le infrastrutture.

Le iniziative previste in Next Generation EU

In risposta alla diffusione della pandemia di Covid-19 quasi tutti i Governi nazionali hanno attuato delle iniziative di confinamento della popolazione che hanno portato al blocco prolungato dell'attività economica. Per contrastare gli effetti della crisi e rilanciare l'economia, la Commissione von der Leyen, con il supporto del Consiglio Europeo, ha varato un ambizioso programma di investimenti sotto l'egida Next Generation EU, per trasformare la difficoltà in opportunità e costruire l'Europa di domani[61]. Secondo le analisi della Corte dei Conti Europea (ECA), la dotazione complessiva prevista dal Next Generation EU era superiore ad 800 miliardi di euro a prezzi correnti. Di questi, circa 723,8 miliardi di euro erano mobilitati dal Recovery and Resilience Facility (338 miliardi di euro in sovvenzioni e 385 miliardi di euro in prestiti). Poiché alcuni Paesi Membri hanno deciso di non avvalersi dei prestiti, il totale impegnato dal RRF è stato di circa 650 miliardi di euro[62]. Questo ingente volume di investimenti doveva essere indirizzato a sostenere la ripresa economica post-pandemica nel breve termine (recovery) e guidare la trasformazione strutturale dell'economia europea nel medio-lungo periodo (resilience), attraverso la doppia transizione verde e digitale.

A tale scopo, ciascun Paese doveva presentare dei Piani nazionali di investimento individuando dei progetti finanziabili allocando almeno il 20% dei fondi in iniziative di trasformazione digitale e il 37% alla transizione verde. Come è riportato nell'ultimo rapporto di implementazione, questi due vincoli sono stati rispettati da tutti i Paesi.

% di fondi RRF destinati agli obiettivi climatici e digitali (stima su revisioni RRF)



Fonte: Recovery and Resilience Facility Annual Report 2025

Allocazione fondi RRF tra energia, trasporti e acqua

Il Recovery and Resilience Fund rappresenta uno strumento innovativo, sia per le dimensioni finanziarie, sia per la trasversalità delle iniziative e dei progetti che include, sia per i tempi in cui è stato progettato, in risposta alla situazione d'emergenza e richiede pertanto che ne sia monitorata attentamente l'attuazione. L'ultimo rapporto di implementazione della Commissione Europea sul RRF (ottobre 2025) fornisce il quadro più aggiornato sullo stato d'avanzamento del programma[63]. Da questo si rileva che il tasso di completamento dei traguardi e degli obiettivi previsti da raggiungere entro il primo trimestre del 2026 è all'incirca pari al 60%, con delle differenze tra i diversi assi di osservazione. Nello specifico, i progetti che rientrano nella transizione green presentano un tasso di completamento del 48%, quelli per la trasformazione digitale sono al 50%. Secondo l'ECA, invece l'attuazione procede con ritardi e rimangono a rischio il completamento di diversi misure ed interventi.

La posizione dell'ECA, che parla di occasione mancata per quanto riguarda i progetti di trasformazione digitale attivati dall'Unione[64] si rivela critica anche per altri ambiti, come per gli investimenti previsti per innovare la rete elettrica, ritenuti insufficienti per soddisfare il fabbisogno crescente di energia[65], per il sistema di controllo messo in atto dalla Commissione Europea[66] e più in generale sul modo in cui è stato utilizzato questo lo RRF che "ha finora contribuito in misura limitata a raggiungere gli obiettivi dell'UE di livello più elevato o a rispondere alle sfide strutturali individuate nelle raccomandazioni specifiche per paese", riflessioni utili in vista della discussione per definire il nuovo quadro finanziario pluriennale dell'Unione per il settennato 2028-2035.

Sul modo in cui i fondi vengono impiegati per trasformare le infrastrutture energetiche, idriche e dei trasporti, un utile punto di riferimento è rappresentato dai rapporti di approfondimento del Think Tank del Parlamento Europeo.

Trasporti

Con circa 83 miliardi di euro destinati, pari al 12,8% del totale RRF, gli investimenti diretti a realizzare un sistema di trasporti smart e sostenibile è al centro delle politiche europee di decarbonizzazione e integrazione territoriale. L'Italia è il Paese che ha ricevuto il maggiore contributo in valore (circa 34 miliardi di euro, pari al 41% del totale dei fondi assegnati alla mobilità smart e sostenibile). Italia, Spagna (9,9 miliardi di euro) e Germania (7,6 miliardi di euro) assorbono il 60% dei fondi complessivamente allocati su questo ambito[67].

La rete ferroviaria, responsabile di circa un quarto delle emissioni totali di CO_2 nell'Unione, assorbe circa il 59% dei fondi, in particolare diretti verso la realizzazione dello ERTMS (European Rail Traffic Management System) che definisce uno standard comune per il controllo e la segnalazione dei treni in tutta l'UE. L'adozione di questo sistema rende più concreta la realizzazione della rete transeuropea TEN-T e permette di adottare un sistema di gestione del traffico più efficiente. La Commissione stima che il completamento dell'ERTMS richiederà un investimento totale di circa 29 miliardi di euro e per questo mette a disposizione anche 26 miliardi del dispositivo CEF (Connecting Europe Facility) per il periodo 2021-27.

Oltre agli investimenti ferroviari, i finanziamenti del RRF si indirizzano anche su mobilità urbana sostenibile (trasporto pubblico locale, elettrificazione delle flotte, infrastrutture ciclabili) e intermodalità e logistica integrata, con particolare attenzione ai nodi portuali e alle connessioni tra modalità di trasporto.

Energia

Il settore energetico è il principale beneficiario del RRF, con oltre 250 miliardi di euro allocati alla transizione green - pari a oltre il 40% del totale - di cui rappresenta una componente essenziale. Tali fondi sono stati successivamente potenziati dal programma REPower EU (che mobilita circa 210 miliardi di euro fino al 2027). Paesi come Italia, Spagna, Germania e Francia figurano tra i maggiori destinatari di fondi energetici, riflettendo sia le loro dimensioni economiche sia l'urgenza di accelerare la transizione verso sistemi energetici a basse emissioni. L'Italia è il primo beneficiario in valore assoluto.

Gli investimenti si concentrano su fonti rinnovabili (solare fotovoltaico, eolico onshore e offshore, idrogeno verde), per circa il 30-35% del totale. Seguono interventi di efficienza energetica (riqualificazione degli edifici pubblici e privati, reti di teleriscaldamento), interconnessioni elettriche transfrontaliere e decarbonizzazione industriale.

Entro il 2026, i Piani Nazionali di Ripresa e Resilienza mirano a:

- aggiungere 60 GW di capacità rinnovabile, inclusi oltre 15 GW di eolico offshore;

- promuovere un risparmio annuo di 28 milioni di MWh di energia primaria attraverso interventi di efficienza energetica;
- modernizzare 14.000 km di linee elettriche di trasmissione e distribuzione per abilitare l'integrazione delle rinnovabili;
- dispiegare oltre 2,5 GW di capacità di elettrolizzatori per idrogeno verde.

Settore idrico

Il comparto idrico riceve circa 12,92 miliardi di euro dai Piani Nazionali di Ripresa e Resilienza di 15 Stati membri, cui si aggiungono circa 13 miliardi di euro dai Fondi di Coesione. Sebbene strategico per la resilienza climatica, il settore rimane marginale in termini relativi, rappresentando meno del 2% del totale RRF, nonostante il crescente divario tra gli investimenti necessari per una gestione sostenibile delle risorse idriche dell'Unione (stimata in circa 25,6 miliardi di euro annui).

In valore assoluto, Spagna e Italia destinano le maggiori allocazioni RRF alla gestione idrica sostenibile (circa 12 miliardi complessivamente, ossia il 79,5% del totale dei fondi allocati)[68].

Gli investimenti si concentrano su:

- gestione e conservazione delle risorse idriche (72,3% dei fondi): riabilitazione di dighe, ottimizzazione dell'uso delle risorse esistenti, creazione o espansione di riserve strategiche;
- fornitura di acqua potabile conforme a criteri di efficienza (19,6%): riduzione delle perdite di rete, ammodernamento degli impianti di distribuzione;
- trattamento e raccolta delle acque reflue (8,1%): depurazione conforme a criteri di efficienza energetica.

Gli investimenti in digitalizzazione delle reti idriche, smart metering, telecontrollo e modellizzazione predittiva rimangono limitati, nonostante il potenziale di ridurre le perdite di rete. la frammentazione istituzionale del settore idrico (competenze distribuite tra livello nazionale, regionale, locale e operatori pubblici/privati) complica il coordinamento, la pianificazione e l'attuazione di politiche coerenti.

Settore digitale

Il programma Next Generation EU, attraverso il dispositivo RRF (Recovery and Resilience Facility), ha destinato una quota significativa delle risorse europee al processo di digitalizzazione, con il 26% dei fondi assegnati a obiettivi digitali: una cifra che si attesta intorno ai 160 miliardi di euro considerando tutti i Paesi UE. L'Italia si conferma il principale beneficiario di tali risorse, seguita da Spagna e Francia.

I servizi pubblici digitali costituiscono il principale capitolo di investimento, assorbendo il 37% delle risorse dedicate, pari a circa 53 miliardi di euro. L'obiettivo dichiarato è la completa accessibilità online dei servizi pubblici chiave, in linea con le direttive europee sulla digitalizzazione della pubblica amministrazione e sul miglioramento della fruibilità per cittadini e imprese.

Le altre misure previste dal piano comprendono il rafforzamento delle infrastrutture digitali, la promozione delle competenze digitali nella popolazione, la digitalizzazione delle imprese e lo sviluppo di sistemi avanzati di cybersecurity.

Secondo quanto rilevato dalla Corte dei Conti europea (ECA), a dicembre 2024 circa la metà dei progetti analizzati risultava in ritardo rispetto alle tempistiche previste, un aspetto di grande rilievo data l'importanza delle tecnologie digitali nel guidare il cambiamento delle altre infrastrutture strategiche:

- nel settore energetico, la digitalizzazione

trasforma il disegno infrastrutturale, abilitando smart grids, sistemi di accumulo distribuito, sistemi demand response, monitoraggio in tempo reale della produzione e del consumo, facilitando l'integrazione delle rinnovabili e migliorando l'efficienza complessiva del sistema.

- nel settore idrico, le tecnologie digitali portano una profonda innovazione: sensori IoT, telelettura, modelli predittivi basati su intelligenza artificiale, piattaforme di gestione integrata permettono di rilevare perdite, ottimizzare la distribuzione, prevedere eventi estremi e migliorare la governance.
- nel settore dei trasporti, le piattaforme digitali consentono una maggiore integrazione dei diversi sistemi modali, rendono più efficienti gli scambi e promuovono modelli di mobilità alternativa. Questo rendo più sostenibile l'impatto del settore, riducendo le emissioni.

Un ambito di interesse crescente: la resilienza delle reti

La resilienza dell'Unione Europea: verso un nuovo paradigma

La resilienza è un concetto trasversale ed utilizzato in più contesti, dalla psicologia alla meccanica, dalla sociologia alla sicurezza. In tutte le definizioni viene messa in evidenza la capacità del soggetto, sia esso un individuo, un materiale o un sistema di affrontare e superare un evento traumatico, un periodo di difficoltà, una crisi.

Ma quando gli eventi si presentano con una certa continuità, quando non si tratta di affrontare un'emergenza ma di fare fronte a delle complessità diffuse e crescenti – instabilità economico finanziaria, cambiamenti climatici, shock causati da un quadro geopolitico in trasformazione – la resilienza diventa una condizione strutturale che implica la capacità di prevedere, assorbire, adattarsi e trasformarsi ai nuovi contesti che si vengono a creare. Anche nella progettazione delle infrastrutture, che rappresentano delle risorse sempre più centrali e vitali delle nostre società, deve essere valutata questa capacità trasformativa, in modo da realizzare delle reti e delle installazioni che non siano solo utili, innovative ed efficienti, ma siano fatte per resistere ed adattarsi alle possibili evoluzioni del contesto. Anche questa caratteristica che fino a qualche tempo fa sarebbe sembrata poco adatta a delle opere strutturali che richiedono invece solidità, robustezza, stabilità è ottenuta attraverso l'utilizzo delle tecnologie digitali, che cambiano – in un certo senso – la natura delle infrastrutture moderne.

Seguendo questo principio, la Commissione Europea ha pubblicato il rapporto "Resilience 2.0: Empowering the EU to Thrive Amid Turbulence and Uncertainty", che delinea la transizione fondamentale nel concetto di resilienza dell'Unione. Gli eventi globali recenti hanno spinto l'UE a passare da un approccio reattivo a uno proattivo e trasformativo, definito come "Resilienza 2.0". Questo nuovo modello mira non solo a resistere alle crisi, ma a prevederle, adattarsi e trasformarsi per affrontare sfide complesse e persistenti come crisi geopolitiche e conflitti, minacce alla sicurezza, cambiamenti climatici e perdita di biodiversità, evoluzioni tecnologiche e demografiche e attacchi ai valori democratici.

La guerra in Ucraina e le minacce ibride, che si muovono tra guerra e pace, hanno cambiato radicalmente la percezione della sicurezza, rendendo evidente la necessità di autonomia strategica dell'Unione.

Il cambiamento climatico rientra invece tra i rischi sistemici che impattano infrastrutture, mercati finanziari e salute pubblica. Le conseguenze di questo fenomeno stanno raggiungendo livelli critici: le temperature globali hanno superato la soglia di +1,5°C rispetto all'era preindustriale ed eventi estremi come incendi, siccità e perdita di biodiversità hanno generato nell'UE Tra il 1980 e il 2023 perdite economiche per 738 miliardi di euro.

Preparazione e sicurezza: pilastri strategici

La preparazione dell'UE si basa sulla capacità di anticipare e prevenire le minacce, anche attraverso infrastrutture e sistemi di intelligence. Elementi chiave sono la previsione strategica, la conoscenza situazionale e l'allarme rapido.

La tecnologia è un fattore chiave per abilitare tali pilastri strategici: si pensi ai sensori installati lungo le reti stradali e ferroviarie o trasportati da oggetti e attori che transitano su di esse, ai gemelli digitali di ponti e dighe, alle control room per la gestione di reti elettriche ed idriche, dei modelli di elaborazione dei dati per formulare previsioni. Sulla tecnologia si fonda la competitività e la resilienza dell'UE, ma questa comporta anche rischi da gestire. Le nuove tecnologie (quantistica, biotecnologie, neurotecnologie, robotica) offrono grandi potenzialità, ma richiedono garanzie per tutelare diritti, privacy, ambiente e democrazia.

Il modello europeo di innovazione si fonda su valori etici e accesso controllato ai dati, ma incontra ostacoli come la difficoltà di accesso al capitale di rischio, fondamentale per lo sviluppo tecnologico. Per competere con modelli come quello statunitense (orientato al mercato) o cinese (statale), l'UE deve rafforzare il proprio approccio basato su valori e sostenibilità.

Tra le aree di azione prioritarie individuate dal rapporto, quelle più interessanti ai fini della gestione delle infrastrutture critiche sono:

l'ampliamento della sicurezza interna ed esterna attraverso un approccio tecnologico e lungimirante che sfrutti le sinergie civili-militari. È essenziale sviluppare infrastrutture strategiche europee sicure (digitali, energetiche, spaziali) e razionalizzare gli acquisti comuni per ottenere economie di scala. La preparazione deve essere rafforzata a tutti i livelli, dai cittadini all'industria, integrando la sicurezza in tutte le politiche con una prospettiva territoriale coordinata.

il potenziamento della tecnologia e della ricerca per consentire all'UE di assumere una leadership globale nella governance delle tecnologie ad alto impatto, in particolare l'IA, promuovendo uno sviluppo sicuro e allineato ai valori europei. È essenziale costruire autonomia strategica nella ricerca e nelle infrastrutture critiche, semplificando la regolamentazione per progetti strategici e stabilendo standard etici e di sicurezza. L'obiettivo è fare dell'UE un punto di riferimento mondiale per un'innovazione tecnologica responsabile, rafforzando al contempo la sovranità tecnologica e la cooperazione internazionale.

In questo contesto, negli ultimi anni l'Unione Europea ha sviluppato un insieme di direttive e regolamenti per proteggere le infrastrutture strategiche e rafforzare la resilienza, intervenendo su vari aspetti di questi ambiti:

Sicurezza fisica e operativa (es. CER, DORA)

Sicurezza informatica (es. NIS2, CRA – Cyber Resilience Act)

Sicurezza delle catene di approvvigionamento (es. Preparedness Union, Regolamento UE 2025/1733 in materia di sicurezza dell'approvvigionamento di gas, IMERA - Internal Market Emergency and Resilience Act)

Di seguito vediamo brevemente quali indicazioni e prescrizioni vengono fornite dalle principali normative in ottica di un'evoluzione "smart" delle infrastrutture: la Direttiva CER, il regolamento DORA e la Direttiva NIS2.

Le principali normative UE che riguardano la resilienza delle infrastrutture

La preparazione dell'UE si basa sulla capacità di anticipare e prevenire le minacce, anche attraverso infrastrutture e sistemi di intelligence. Elementi chiave sono la previsione strategica, la conoscenza situazionale e l'allarme rapido.

Direttiva CER (Critical Entities Resilience)

Promulgata il 14 dicembre 2022 e recepita in Italia nel 2024, la Direttiva Europea 2022/2557 ha l'obiettivo di garantire la sicurezza e la resilienza delle infrastrutture critiche europee contro le minacce fisiche e cibernetiche.

Rispetto alla precedente Direttiva 2008/114/CE del Consiglio europeo, la CER amplia i settori coinvolti, il campo d'azione - non più limitato alla sola protezione- e determina i criteri per designare a livello nazionale le entità critiche, con un coordinamento a livello europeo.

Viene definito un perimetro minimo entro cui individuare le entità critiche ed è costituito da 11 settori:

Energia

Trasporti

Banche

Mercati finanziari

Sanità

Acqua potabile

Acque reflue

Infrastrutture digitali

Amministrazione pubblica

Spazio

Alimentare

I criteri da tenere in considerazione sono l'impatto potenziale dell'attività o della natura delle entità individuate sull'economia e sulla sicurezza, la natura essenziale dei servizi erogati, l'interconnessione con altri settori e la rilevanza transnazionale.

Le entità categorizzate come critiche sono sottoposte a obblighi come la valutazione periodica del rischio, la redazione di piani di resilienza e il relativo aggiornamento, la notifica degli incidenti rilevati, la condivisione delle informazioni; sono stabilite inoltre le misure di sicurezza fisica e cibernetica da adottare e le procedure di monitoraggio e conformità, nonché le sanzioni in caso di mancato rispetto delle prescrizioni della Direttiva.

Regolamento DORA (Digital Operational Resilience Act)

Il Regolamento (UE) 2022/2554 del Parlamento europeo e del Consiglio del 14 dicembre 2022 mira a garantire la resilienza operativa digitale delle entità finanziarie dell'UE, rafforzando la capacità di resistere, rispondere e riprendersi da incidenti informatici e interruzioni dei sistemi ICT.

Il principale ambito di intervento del DORA consiste nella definizione di standard tecnici che le entità finanziarie e i loro fornitori critici di servizi tecnologici devono implementare nei propri sistemi, introducendo un framework armonizzato tra gli Stati membri per la governance del rischio ICT.

Viene definito l'obbligo per le entità soggette al regolamento di classificare e registrare gli incidenti ICT nonché di segnalare quelli gravi; viene anche incoraggiata la possibilità di notificare volontariamente minacce significative e lo sviluppo di meccanismi volontari per lo scambio di dati e informazioni sulle minacce informatiche tra entità finanziarie.

Altri obblighi definiti dalla normativa sono quello di effettuare test avanzati sui sistemi ICT per verificarne la robustezza e controlli sui fornitori di terze parti di servizi ICT critici.

Il Regolamento è entrato in vigore il 17 gennaio 2023, ma è vincolante dal 17 gennaio 2025.

Direttiva NIS2 (Network and Information Security)

La Direttiva NIS2 sulla sicurezza delle reti e dei sistemi informativi stabilisce gli obblighi in materia di cybersicurezza per le organizzazioni che operano all'interno dell'Unione Europea (UE), con l'obiettivo di assicurare un livello elevato e uniforme di protezione tra i vari Stati membri.

Questa nuova direttiva del 2023, recepita a ottobre 2024, supera le carenze della precedente normativa del 2016, introducendo regole più stringenti, ampliando il numero di entità e settori coinvolti e prevedendo sanzioni più severe in caso di mancato rispetto delle prescrizioni in essa contenute. La NIS2 si applica a imprese di medie e grandi dimensioni che operano in ambiti strategici come energia, trasporti, produzione industriale, gestione delle risorse idriche e sanità, oltre che a istituti bancari, finanziari e fornitori di servizi digitali. Anche le piccole imprese possono rientrare nel campo di applicazione della direttiva, qualora siano fornitori di aziende soggette alla normativa o operino in settori considerati critici.

In base alla loro dimensione e al settore di attività, le organizzazioni vengono classificate come "Essenziali" o "Importanti". Entrambe devono adottare le stesse misure di sicurezza, ma le entità essenziali sono soggette a controlli più rigorosi e a sanzioni più pesanti in caso di violazioni.

Dalla normativa europea alle realtà nazionali

Le linee guida strategiche della Commissione Europea, i diversi piani di finanziamento e di supporto all'innovazione, le direttive e i regolamenti europei in materia di resilienza delle infrastrutture critiche delineano un quadro comune di obiettivi e strumenti, volti a garantire lo sviluppo del sistema infrastrutturale dell'UE in chiave di efficienza, sostenibilità, sicurezza e resilienza, ossia in grado di assicurare la continuità dei servizi essenziali. Tuttavia, l'attuazione concreta di queste linee guida varia da Paese a Paese, in funzione delle priorità strategiche, dello stato delle infrastrutture esistenti e della capacità di assorbimento dei fondi europei.

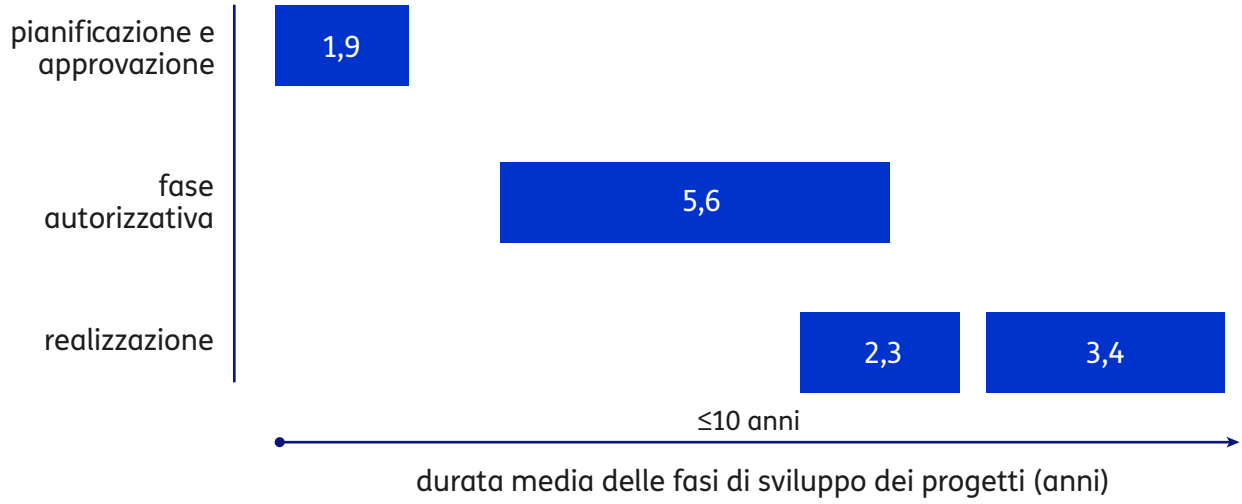
Una delle principali fonti di finanziamento provenienti dall'Unione è costituita attualmente dal Recovery and Resilience Facility (RRF). I principali Stati membri hanno adottato approcci differenti per rafforzare i settori chiave dell'energia, dell'acqua e dei trasporti: alcuni hanno privilegiato la digitalizzazione e la transizione ecologica, altri hanno concentrato gli sforzi sulla modernizzazione delle reti o sulla gestione delle risorse idriche.

Il confronto che segue sintetizza le principali iniziative infrastrutturali di Spagna, Francia, Germania, Italia a cui si aggiunge anche un approfondimento sul Regno Unito. Da questa panoramica emerge il modo in cui ciascun Paese stia interpretando e traducendo in azione il quadro normativo europeo, evidenziando le diverse priorità di investimento e gli orientamenti strategici dei vari percorsi, che dipendono anche dalla disomogenea situazione di partenza, dalle criticità e dai punti di forza del sistema infrastrutturale nazionale.

Un tratto comune emerge in tutte le situazioni esaminate: risorse ingenti e piani ambiziosi si scontrano spesso con tempi lunghi di realizzazione delle opere, per lo più dovuti a ritardi burocratici e complessità amministrative per verificare la corretta allocazione delle risorse pubbliche. Proprio per questo, in alcuni Paesi, sono state attivate delle iniziative per snellire il processo, affidandosi a Commissariamenti (come in Italia) oppure individuando dei progetti prioritari di interesse pubblico prevalente (come in Germania). Nel Regno Unito, dopo un'attenta valutazione realizzata dall'Office Value for Money, si è deciso di creare un'agenzia dedicata a monitorare l'andamento dei progetti infrastrutturali – la Infrastructure and Projects Authority (IPA) – in modo da ridurre i ritardi con cui sono state completate le grandi opere del passato.

L'analisi dei tempi di realizzazione delle opere mostra che una parte significativa del tempo viene perso nella fase iniziale, addirittura in fase autorizzativa, un aspetto questo che incide sulla qualità del progetto: se un'infrastruttura viene realizzata dopo aver passato anni di attesa è più alta la probabilità che accumuli un'obsolescenza progettuale, che si accentua in un contesto – come quello attuale – in cui l'evoluzione tecnologica viaggia ad una grande velocità (smart grid, digital twin, sistemi di accumulo, sensori IoT). Nascono inoltre nuove sensibilità ed esigenze che possono modificare il quadro normativo: le infrastrutture di oggi devono essere quanto meno sostenibili, resilienti e sovrane, aspetti che non erano centrali nelle scelte di pianificazione avviate 10-15 anni fa.

Tempi medi di implementazione dei progetti



Fonte: ACER su dati PCI

Il rischio che si corre è che un'opera, concepita con tecnologie e standard di oggi, risulti superata al momento della realizzazione, richiedendo non soltanto aggiornamenti immediati, ma addirittura ripensamenti strutturali che ne minano l'utilità.

Questo è un punto chiave che va affrontato riprogettando la governance di questi progetti:

Sono necessari processi più flessibili e adattabili, valutazioni iterative e aggiornamenti progettuali durante lo svolgimento delle attività. L'utilizzo di strumenti come il digital twin e il BIM (Building Information Modeling) consente di effettuare monitoraggi e modifiche in tempo reale, riducendo la possibilità che il progetto venga bloccato per periodi prolungati.

Occorre incentivare l'uso di piattaforme digitali e semplificazioni amministrative, per comprimere e tagliare i tempi morti delle autorizzazioni.

La governance coordinata con un unico soggetto attuatore individua chiaramente le responsabilità e riduce le possibilità di contenzioso.

Con l'esperienza del PNRR, l'Italia ha già compiuto un passaggio importante nella modernizzazione della governance dei progetti di grandi opere, si tratta di fare in modo che questo approccio diventi la norma.

Il rischio che si corre è che un'opera, concepita con tecnologie e standard di oggi, risulti superata al momento della realizzazione, richiedendo non soltanto aggiornamenti immediati, ma addirittura ripensamenti strutturali che ne minano l'utilità.

La Spagna

Negli ultimi venti anni, la Spagna ha compiuto significativi progressi nel potenziamento delle proprie dotazioni infrastrutturali, con interventi mirati nei settori dell'energia, dei trasporti e delle reti digitali, estendendone la copertura a molte zone del Paese che partivano da situazioni profondamente svantaggiate rispetto alle principali aree metropolitane ed alle regioni più sviluppate del Paese.

Rispetto ad altri Paesi, emerge una maggiore attenzione al settore idrico, che presenta diverse fragilità. Il tema appare di grande rilievo soprattutto perché il 33% della popolazione vive in aree a rischio idrico. Negli ultimi anni si è registrata una riduzione della portata dei fiumi del -12%, le dighe hanno un'età media di 56 anni mentre le reti idriche hanno un tasso di perdita stimato intorno al 25% evidenziando una necessità di ammodernamento, come evidenzia un lavoro di .... Citare ..... Un indice dell'uso delle tecnologie digitali in questo settore è rappresentato dalla diffusione di contatori intelligenti che è ancora limitata, nonostante i programmi iniziali prevedessero il completamento della copertura entro il 2020. Secondo gli ultimi dati, a livello nazionale si contano circa 1 milione di contatori e l'area in cui la diffusione è maggiore è quella di Madrid.

I programmi infrastrutturali attuali traguardano una trasformazione strutturale facendo ampio uso dei fondi europei e integrandoli con le risorse nazionali. Si tratta insieme all'Italia del principale beneficiario dei fondi RFF per progetti legati alla gestione dell'acqua. Nel 2023 sono stati approvati i Piani Idrologici del Terzo Ciclo in 6.500 misure per 22,8 miliardi fino al 2027; nonostante ciò, le risorse stanziate non sono sufficienti a uguagliare le stime per il periodo 2025-35, che ammontano a 85 miliardi di euro.

Nel settore energetico e dei trasporti la Spagna ha investito molto negli anni passati, con una rete elettrica estesa e moderna (circa 0,9 mln km con una diffusione degli smart meters del 99%) e una quota di rete ad alta velocità (AV) pari al 20%, tra le più alte in Europa. Nell'ambito del Recovery and Resilience Facility (RRF), la Spagna ha destinato circa 12 miliardi di euro alla transizione energetica verde, confermando l'impegno verso un modello sostenibile e circa 10 miliardi di euro per progetti di trasporto sostenibile e intelligente, un volume di fondi inferiore solo all'Italia.

La Francia

La Francia si distingue per un approccio fortemente centralizzato alla progettazione e pianificazione delle infrastrutture. Questo modello consente una maggiore efficienza nei processi autorizzativi e una riduzione dei costi accessori, grazie a iter amministrativi più snelli rispetto ad altri Paesi europei. Tuttavia, esistono delle aree di criticità: il settore dei trasporti presenta ritardi significativi, in particolare per quanto riguarda la rete ferroviaria, verso cui è stata convogliata la maggior parte dei fondi del RRF tra progetti di adeguamento delle infrastrutture ferroviarie (TEN-T) e di sviluppo del sistema ERTMS (European Rail Traffic Management System).

Complessivamente, la spesa in trasporti è pari all'1,7% del PIL e la rete AV rappresenta il 16%.

Rispetto alle infrastrutture idriche, il "Plan Eau" lanciato nel 2023 mira a rafforzarne la resilienza, ma le perdite idriche restano al 20% e il 12% della popolazione è in aree a rischio.

Altri fattori di attenzione sono l'età elevata delle dighe, che ha raggiunto una media di 60 anni di vetustà nel 2020, e la diffusione di smart meters idrici del 20%, inferiore alla media europea (30%) con una proiezione del 40% entro il 2030. Un grande investimento è stato dedicato alla raccolta e riuso delle acque reeflue: circa 80 euro pro-capite contro una media UE di 45 euro pro-capite.

La rete elettrica si estende per 1,5 milioni di km ed è gestita da 138 operatori di distribuzione (DSO) e 1 operatore di trasmissione (TSO). Risulta ben digitalizzata, con il 94% di smart meters e un piano energetico che punta alla neutralità climatica entro il 2050, basato su un mix di nucleare e fonti rinnovabili. Il piano individua un fabbisogno di €100 miliardi nel decennio 2025-35. Ad oggi, ammontano a circa 9 miliardi i fondi allocati in Transizione Green nel RRF.

La Germania

La Germania ha avviato un ambizioso programma di modernizzazione delle proprie infrastrutture, promosso dal nuovo governo. Il piano prevede un aumento della spesa pubblica, la mobilitazione di capitali privati e una revisione del ruolo dello Stato in settori strategici, con l'obiettivo di accelerare i tempi di realizzazione attraverso l'identificazione dei cosiddetti **"progetti di interesse pubblico prevalente"**.

Gli sforzi principali sono orientati ai settori energetico e ferroviario, mentre il settore idrico, al centro della prima strategia nazionale dell'acqua fin dal 2023, è meno critico rispetto ad altri Paesi: le perdite corrispondono a circa il 5-6% e solo il 4,5% della popolazione in aree a rischio, anche se la digitalizzazione è ancora limitata (solo 2,8% di smart meters). Nel 2023 è stata adottata la prima Strategia Nazionale per l'Acqua, con un piano di investimenti di circa 10 miliardi di euro all'anno. Tuttavia, nessun progetto idrico è stato presentato nell'ambito del RRF. Per quanto riguarda il riuso delle acque reflue, l'investimento medio è di 50 euro pro capite, leggermente superiore alla media UE di 45 euro. Il fabbisogno stimato per il settore idrico è di circa 40 miliardi di euro all'anno.

La rete elettrica è la più estesa tra i Paesi esaminati (2,2 milioni di km), è gestita da 866 operatori di distribuzione (DSO) e 4 operatori di trasmissione (TSO). L'età media delle reti di trasmissione è di 13 anni ed è quindi relativamente più recente rispetto ad altri Paesi, ma l'espansione è in ritardo di circa 7 anni e 6.000 km. La digitalizzazione del sistema è ancora limitata: la quota di smart metering è pari a solo l'1%. Tuttavia, il budget tedesco per la transizione green all'interno del RRF è stato significativamente aumentato grazie al programma REPowerEU, raggiungendo circa il 50% del totale. In questo modo, la Germania punta al net-zero entro il 2035, anticipando notevolmente l'obiettivo del 2050, con investimenti significativi in sistemi di accumulo energetico anche per ovviare alle criticità che ha dovuto affrontare a causa degli effetti del conflitto russo-ucraino.

Per quanto riguarda il trasporto, la spesa rappresenta il 2,1% del PIL. La rete AV non appare particolarmente sviluppata (rappresenta l'8% del totale) e questo rappresenta un aspetto molto critico . Per lo sviluppo delle infrastrutture di mobilità è stata allocata una quota del 20% circa del piano RRF tedesco (circa €8 miliardi). Inoltre, è stato stanziato un fondo nazionale da 100 miliardi di euro, l'**Eisenbahn-Infrastrukturfonds**, per il potenziamento della rete ferroviaria entro il 2029. Per incentivare modelli di mobilità sostenibile alternativi, sono previsti investimenti per l'espansione delle reti di ricarica elettrica e a idrogeno, con particolare attenzione ai veicoli commerciali.

L'Italia

L'Italia si colloca in una posizione peculiare nel panorama europeo: è il Paese che ha beneficiato maggiormente dei fondi del Recovery and Resilience Facility con €34 miliardi destinati ai trasporti e circa 28 miliardi allocati in Transizione Green, oltre ad essere con la Spagna principale beneficiario dei fondi RFF per la gestione dell'acqua. Tuttavia, il Paese soffre di ritardi burocratici e tempi di realizzazione lunghi per la realizzazione di opere infrastrutturali.

Le infrastrutture idriche versano in condizioni particolarmente critiche: le perdite sono pari al 40%, l'età media delle dighe arriva addirittura a 67 anni e la diffusione di smart meters raggiunge appena il 17%. L'investimento pro capite per il riuso delle acque reflue è nettamente inferiore alla media europea, con 20 euro a fronte dei 45 euro che si spendono in media in UE. A ciò si aggiungono tempi di realizzazione lunghissimi – 6 anni per le reti idriche – che aggravano il rischio idrico per il 31% della popolazione

In compenso, la rete elettrica presenta una situazione più avanzata con una forte attenzione alla digitalizzazione delle infrastrutture: la diffusione degli smart meters si stima abbia raggiunto il 100%, la quota più alta in Europa. Terna ha presentato un piano di sviluppo per il decennio 2025–2034 che prevede €23 miliardi di investimenti in linea con gli obiettivi previsti dal Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC). Le principali iniziative si orientano vero il potenziamento della rete di trasmissione nazionale, al fine di integrare le produzioni provenienti da fonti rinnovabili, aumentare le interconnessioni con l'estero in otica di rafforzare la sicurezza energetica, creare le condizioni per una maggiore resilienza, attraverso lo sviluppo di sistemi di accumulo. Una delle sfide più importanti è rappresentate dal rafforzamento del collegamento tra il Sud del paese, che presenta la maggiore potenzialità in tema di produzione di energia rinnovabile, con il Nord più industrializzato che esprime anche la maggiore domanda di energia.

Sul fronte dei trasporti, la spesa in infrastrutture è pari all'1,5% del PIL. L'Italia ha ottenuto la quota più alta di fondi RRF in valore assoluto che sono stati destinati in gran parte allo sviluppo dell'infrastruttura ferroviaria nella quale la rete AV è ancora piuttosto limitata (4,4%). Tuttavia, la realizzazione delle opere è lenta: 13 anni per le infrastrutture ferroviarie, 6 anni per strade e autostrade, 5 anni per i porti.

Il Regno Unito

In un contesto globale caratterizzato da transizione energetica, competizione tecnologica e rischi geopolitici, il Regno Unito ha avviato nel 2025 la strategia "UK Infrastructure: A 10 Year Strategy", un piano di lungo periodo che segna una discontinuità rispetto agli approcci frammentati del passato, con l'obiettivo di trasformare le infrastrutture economiche e sociali in asset strategici al fine di sostenere la crescita economica, garantendo resilienza e sostenibilità.

La strategia si basa su un piano da oltre £725 miliardi che include trasporti, energia, acqua, digitale, ma anche infrastrutture sociali come scuole e sanità. Attraverso questa iniziativa, il Regno Unito punta a diventare una "clean energy superpower" e a raggiungere il net-zero, con investimenti mirati in tecnologie digitali come fibra ottica e 5G per colmare il divario digitale, in settori emergenti come quello delle tecnologie verdi, dell'AI e del biotech, oltre al potenziamento delle reti ferroviarie e digitali.

La Governance del progetto è uno degli elementi più innovativi della strategia. Dopo un'attenta valutazione delle criticità che hanno riguardato le grandi opere del passato, è stata creata un'agenzia dedicata, la Infrastructure and Projects Authority (IPA), con l'obiettivo di monitorare oltre 780 progetti e accelerare i processi autorizzativi ed i tempi di realizzazione, in modo da evitare i ritardi eccessivi di completamento dei progetti precedenti.

A 10 Year Strategy

trasformare infrastrutture economiche e sociali per **crescita, resilienza e sostenibilità**

>£ **725 miliardi**
trasporti, acqua, energia, digitale, scuole e sanità

clean energy superpower e **net zero**

migliori collegamenti
stradali e ferroviari tra regioni

5G e fibra ottica
per colmare il **divario digitale**

sostegno a **settori emergenti**
(tecnologie verdi, AI, biotech)

semplificazione del processo

oltre **780 progetti**
monitorati dalla **Infrastructure and Projects Authority** (IPA)
gestione dei costi e riduzione di ostacoli burocratici

Terza parte

Il mercato e **i benefici**

CAPITOLO 6: Il mercato del monitoraggio

Il monitoraggio delle infrastrutture

Il mercato delle infrastrutture sta attraversando una fase di trasformazione caratterizzata da una crescente integrazione di capitali privati a supporto del tradizionale finanziamento pubblico. Tale combinazione – che si concretizza in modelli di partenariato pubblico-privato (PPP) – consente di condividere rischi tra tutte le parti coinvolte, ottimizzare l'allocazione delle risorse ed introdurre competenze gestionali del settore privato, mantenendo allo stesso tempo le garanzie e le tutele del pubblico.

Tra gli attori principali di questo processo si annoverano, tra gli altri Terna e i DSO in Italia per le reti elettriche. Questa evoluzione è stata sottolineata anche da:

- Blackrock che, rifacendosi a un'analisi del Global Infrastructure Hub[69], ha identificato le infrastrutture come asset strategico per i prossimi 15 anni, con una domanda globale stimata di 68.000 miliardi di dollari entro il 2040[70].
- EY, che nel suo Infrastructure Barometer 2025 evidenzia una crescente fiducia degli investitori, con il 36% che ha destinato oltre il 30% del portafoglio a progetti greenfield.

Ciò permette di accelerare la realizzazione delle opere, ma la crescente complessità e la necessità di garantire resilienza e sostenibilità impongono un salto di qualità nello sviluppo di strumenti di gestione e di controllo. In altri termini, cresce l'importanza di strumenti di monitoraggio intelligente, sia dal versante dell'infrastruttura (impianti, opere, edifici, reti di distribuzione), sia da quello della domanda (consumi, comportamenti di utilizzo) che permettano di chiudere il ciclo informativo, analizzare i flussi energetici, individuare inefficienze e abilitare strategie di demand response, favorendo comportamenti virtuosi e riducendo sprechi.

In effetti, tanto più aumenta la capacità di raccogliere e analizzare i dati in tempo reale, integrando tecnologie di rilevazione, potenza computazionale, algoritmi predittivi, tanto più le infrastrutture diventano piattaforme dinamiche e flessibili, con strumenti che rilevano in anticipo possibili guasti, capaci di adattarsi ad eventuali shock nonché di attivare o di indurre modelli di comportamento più "green".

In tale contesto, il monitoraggio intelligente non è più solo uno strumento tecnologico, ma diventa un vero e proprio fattore strategico per rendere le infrastrutture efficienti, resilienti e sostenibili contribuendo ad estenderne il ciclo di vita.

Tra il 2025 e il 2029, il settore del monitoraggio di reti elettriche, idriche e infrastrutture civili dovrebbe crescere mediamente tra il 10% e il 15% annuo, raggiungendo oltre 100 miliardi di euro a livello mondiale e oltre 26 miliardi in Europa entro il 2029. In Italia, il tasso di crescita medio annuo del monitoraggio del settore elettrico e infrastrutture civili si attestano tra i più alti in Europa (rispettivamente: +15% e +9%).

Mercato del monitoraggio delle infrastrutture civili

Il comparto delle infrastrutture civili, che include strade, ponti, scuole, ospedali e reti di trasporto urbano, è trainato da piani governativi - come il PNRR in Italia e il Build Back Better negli Stati Uniti, - che destinano fondi significativi per la modernizzazione, la resilienza e la sostenibilità delle opere. Questa dinamica trova riscontro nei dati di mercato: nel 2025, il settore delle opere pubbliche in Italia ha registrato una crescita del 16%, mentre l'edilizia residenziale ha subito una contrazione a causa della fine degli incentivi fiscali.

L'accelerazione degli investimenti rende ancora più cruciale la fase di gestione e manutenzione delle infrastrutture e aumentano l'importanza degli strumenti di monitoraggio in questo settore come lo Structural Health Monitoring. Questi sistemi si basano su tecnologie avanzate di sensori, integrate con algoritmi intelligenti, per valutare lo stato di salute delle strutture. Ciò permette di rilevare precocemente danni o deterioramenti, riducendo il rischio di cedimenti gravi e ottimizzando i costi di manutenzione, con effetti diretti sull'estensione del ciclo di vita delle infrastrutture e sulla protezione degli investimenti pubblici e privati.

L'importanza dei sistemi di SHM sta aumentando molto rapidamente:

- Questi sistemi rivestono un ruolo strategico per il successo dei progetti infrastrutturali, adattando le proprie applicazioni alla complessità della struttura. Per questo motivo si rende necessaria la loro applicazione in tutte le fasi di vita di un'opera: prima, durante e dopo la costruzione, nonché per monitorare lo stato di conservazione delle strutture.
- I sistemi SHM, nati in ambito aerospaziale e aeronautico, si sono poi diffusi in altri settori, come quello delle infrastrutture civili (dighe, tunnel, ponti, edifici, stadi, ecc.) e trovano impiego anche nei settori dell'energia, dell'industria mineraria, dei macchinari industriali, dei trasporti (automotive e ferroviario) e del settore marittimo.

L'analisi del mercato dei sistemi di monitoraggio strutturale può essere fatta seguendo due diverse prospettive di osservazione:

- Guardando al mercato del lato dell'offerta occorre distinguere due segmenti principali: le tecnologie disponibili (hardware) e i servizi erogati anche attraverso soluzioni software.

- Guardando al mercato dal lato della domanda, si possono riconoscere i diversi settori di applicazione – come infrastrutture civili, energia, trasporti e industria – e/o le aree geografiche. Questa segmentazione permette di evidenziare le differenze di adozione tra le industry e tra mercati regionali.

Secondo MarketsandMarkets, il mercato globale del monitoraggio infrastrutture ha raggiunto un valore di 2,3 miliardi di euro nel 2024 e si prevede una crescita significativa: da circa 2,5 miliardi nel 2025 fino a 3,7 miliardi nel 2029, con un tasso medio annuo del +10,1%. Questa dinamica riflette una crescente consapevolezza dell'importanza della manutenzione predittiva e della sicurezza strutturale, soprattutto in contesti – come quello europeo – dove molte infrastrutture hanno superato la loro vita utile.

Oltre alla crescita, i dati mostrano anche un'altra dinamica: la trasformazione del mercato che si sposta progressivamente dalla vendita di soluzioni

hardware a quella di software e servizi. Si prevede che la quota dell'hardware – sensori e dispositivi fisici – possa scendere dal 58,6% dei ricavi totali del 2020 al 52,7% nel 2028. Parallelamente, software e servizi – piattaforme di analisi, soluzioni cloud e applicazioni basate su AI – cresceranno fino a rappresentare il 47,3% del mercato. Questo spostamento segna il passaggio verso soluzioni digitali e integrate, capaci di abilitare analisi predittive e gestione remota, elementi chiave per infrastrutture più sicure ed efficienti.

In Europa, la Germania rappresenta il principale mercato con il 26% dei ricavi nel 2025 e una crescita prevista del +10%. L'Italia rappresenta il 12% del mercato, con una crescita stimata del +9,2%. IN termini assoluti, si prevede che il mercato italiano possa crescere dai 91 milioni di euro del 2025 ai 129 milioni nel 2029.

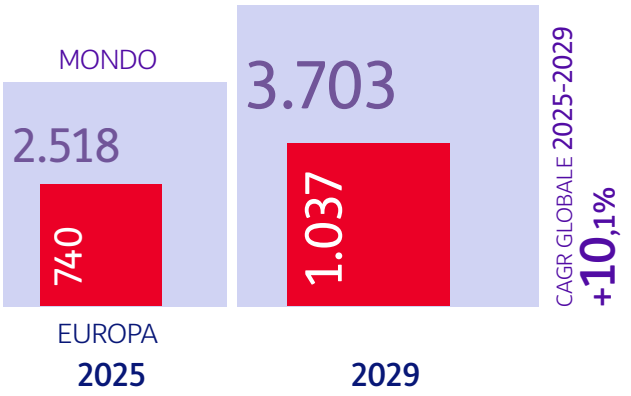
Un'altra direttrice di osservazione utile è quella tra sistemi cablati (wired) e wireless.

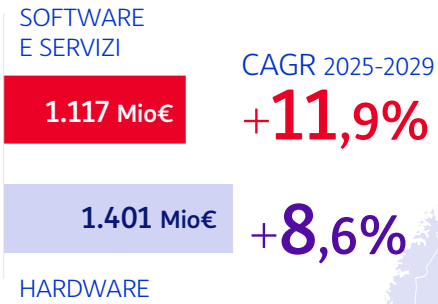
I sistemi di monitoraggio cablati vengono utilizzati per valutare numerose strutture, come edifici, tunnel, ponti e dighe. I vantaggi offerti dalle tecnologie cablate, come la connessione affidabile e il trasferimento illimitato dei dati, stanno contribuendo alla crescita del mercato. Tuttavia, si prevede che il mercato delle tecnologie wireless registrerà un tasso di crescita medio annuo più elevato nel periodo di previsione, grazie alla riduzione dei costi derivante dall'assenza di cavi, che elimina le spese di installazione e manutenzione.

I sistemi wireless offrono anche una maggiore flessibilità, poiché i vari sensori utilizzati nel monitoraggio strutturale wireless comunicano tramite trasmissione senza fili, rendendo più semplice l'aggiornamento, l'aggiunta, lo spostamento o la sostituzione dei sensori dopo l'installazione iniziale. SI evidenzia una una progressiva transizione dai sistemi cablati (wired) a quelli wireless, che passano dal 26,3% al 31,9% nello stesso periodo.

Infrastrutture **civili**

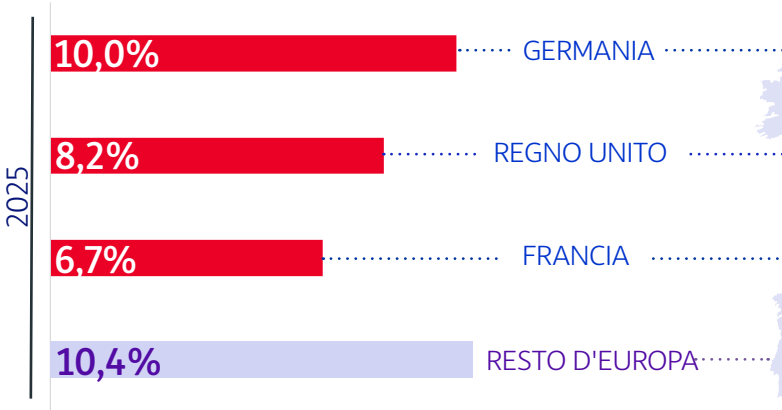
Mercato del monitoraggio infrastrutture connesse (Mio€)

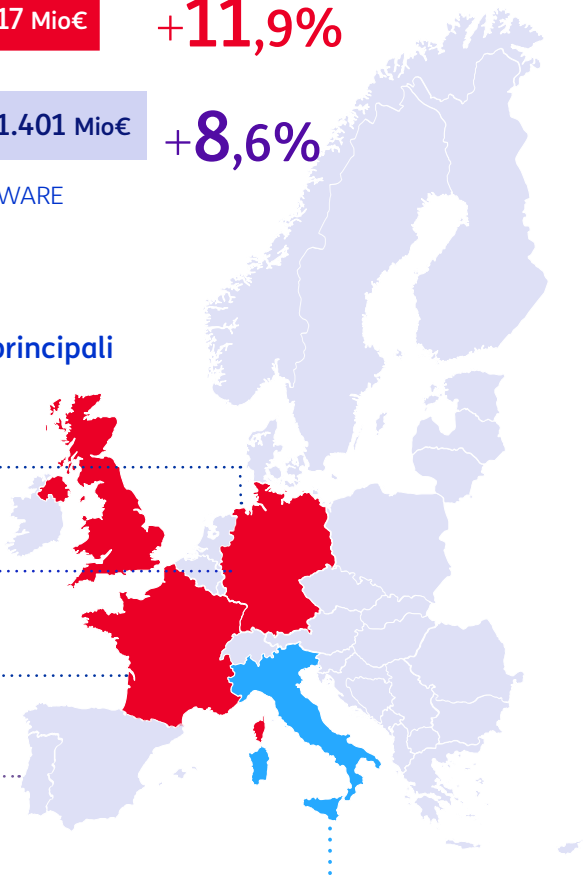




CAGR 2025-2029
+11,9%
+8,6%

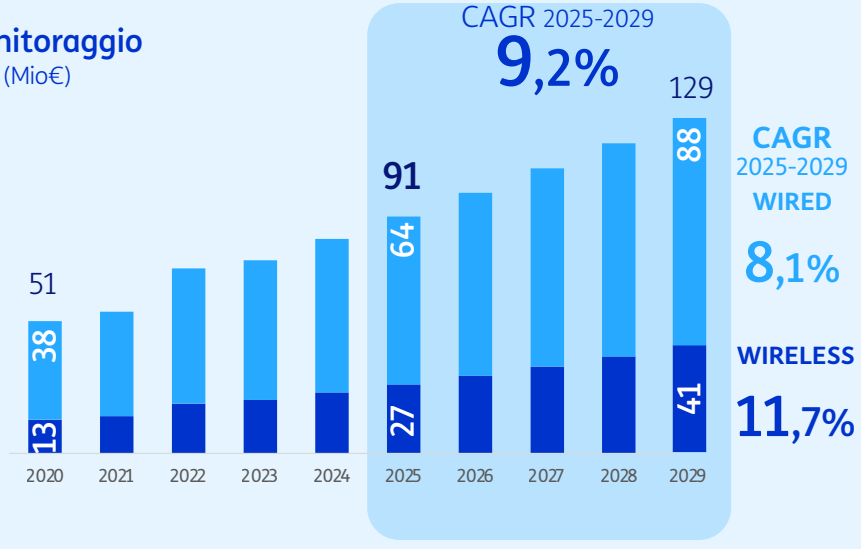
Mercato del monitoraggio infrastrutture connesse nei principali Paesi europei (Mio€)





Mercato italiano del monitoraggio infrastrutture connesse (Mio€)

Il mercato italiano del monitoraggio infrastrutturale crescerà da 91 a 129 milioni di euro entro il 2029. il segmento Wired manterrà una quota del 68% ma il wireless, spinto da IoT e cloud, crescerà più rapidamente (CAGR 11,7%). La tendenza privilegia efficienza, scalabilità e sostenibilità per infrastrutture smart e resilienti.



Fonte: "Structural Health Monitoring Market" - MarketsandMarkets 2024

Mercato del monitoraggio delle infrastrutture elettriche

In un contesto sempre più orientato a rendere il sistema energetico sempre più sostenibile e resiliente, le reti elettriche diventano il centro nevralgico di questa trasformazione epocale. La Commissione Europea ha stimato che saranno necessari oltre 1.200 miliardi di euro di investimenti entro il 2040, di cui 730 miliardi per la distribuzione e 472 miliardi per la trasmissione. In Italia, Terna ha pianificato 23 miliardi di euro di investimenti nel decennio 2025-2034, mentre i principali DSO (operatori di distribuzione) hanno già superato i 4,8 miliardi di euro di spesa nel 2024, con previsioni di oltre 4 miliardi di euro annui anche per il biennio 2025-2026.

Questi investimenti sono fondamentali per trasformare le reti elettriche in smart grid, capaci di integrare nel sistema il contributo delle energie rinnovabili, per loro natura "intermittenti" e "non programmabili" poiché legate alle condizioni naturali. Il processo di trasformazione è guidato dalla progressiva digitalizzazione delle reti e dallo sviluppo di sistemi di Energy Management System (EMS) o sistemi di gestione dell'energia. Anche in questo caso, come per gli SHM per le infrastrutture civili, gli EMS, rappresentano la leva strategica per ottimizzare, controllare e gestire il processo di distribuzione dell'energia, migliorando l'efficienza e la capacità di hosting per nuovi impianti rinnovabili, consentendo risparmi significativi e riduzione dell'impatto ambientale.

Gli EMS integrano hardware, software e servizi e l'analisi del mercato

Il mercato globale degli EMS comprende tecnologie (hardware e software) e soluzioni pensate per offrire servizi (ottimizzazione del consumo, distribuzione e stoccaggio di energia in ambito residenziale, commerciale e industriale, ecc.).

Il mercato globale dei sistemi di monitoraggio delle reti elettriche connesse sta vivendo una fase di espansione straordinaria. Secondo le ultime stime i ricavi a livello globale aumentano da 44 miliardi di euro nel 2025 a 76 miliardi nel 2029, con un tasso di crescita medio annuo del +14,5%.

Il mercato si articola in tre categorie principali: software, hardware e servizi, ciascuna con un ruolo chiave nell'ottimizzazione dei consumi, nella riduzione dei costi operativi e nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità.

- L'hardware comprende dispositivi essenziali come contatori intelligenti, sensori e sistemi di accumulo, indispensabili per raccogliere e trasmettere informazioni sulla rete.

- Il software è dedicato all'analisi avanzata dei dati, all'automazione e al monitoraggio in tempo reale, consentendo decisioni rapide e intelligenti.

- Infine, i servizi offrono consulenza, implementazione e supporto continuo, garantendo che le soluzioni siano integrate e funzionanti nel tempo.

L'integrazione di queste tre componenti costituisce l'ossatura delle strategie moderne di gestione energetica, rispondendo alla crescente domanda di efficienza, conformità normativa e sostenibilità in tutti i settori.

I ricavi generati dal segmento hardware rappresentano all'incirca il 60% del mercato globale. I principali driver di crescita sono rappresentati dall'innovazione delle reti sempre più spinte verso l'adozione di tecnologie

smart anche per rispondere alle normative sempre più stringenti per ridurre le emissioni e favorire la sostenibilità. La crescita dei ricavi del segmento hardware, che incontra diversi ostacoli (alti costi iniziali, complessità di integrazione con sistemi esistenti, necessità di competenze specialistiche e differenze normative tra regioni) è prevista aumentare in media del 14,2% l'anno nel periodo 2025-2029.

Secondo le stime, il segmento software del mercato globale degli EMS cresce ad un ritmo ancora più rapido (+15,3% in media l'anno nel periodo 2025-29). Questo segmento, fondamentale per consentire alle organizzazioni di monitorare, analizzare e ottimizzare i consumi energetici, rappresenta all'incirca il 25-26% del mercato. I ricavi sono generati da soluzioni come, ad esempio, piattaforme di analisi, strumenti di demand response, sistemi di fatturazione, software di modellazione energetica, applicazioni per il reporting delle emissioni e strumenti di previsione.

IL segmento dei servizi rappresenta il segmento più ridotto (circa il 14-15% del mercato), ma con una crescita stimata attorno al 14,7%.

A livello europeo la Germania rappresenta il mercato più importante (32%) mentre l'Italia, pur con una quota del 6%, è il paese con le previsioni di crescita più significative (+15%), un segnale che attesta l'importante trasformazione in corso nel nostro Paese. In termini assoluti, il mercato italiano, esso passa da 733 milioni di euro nel 2025 a 1,29 miliardi nel 2029, con i principali settori coinvolti:

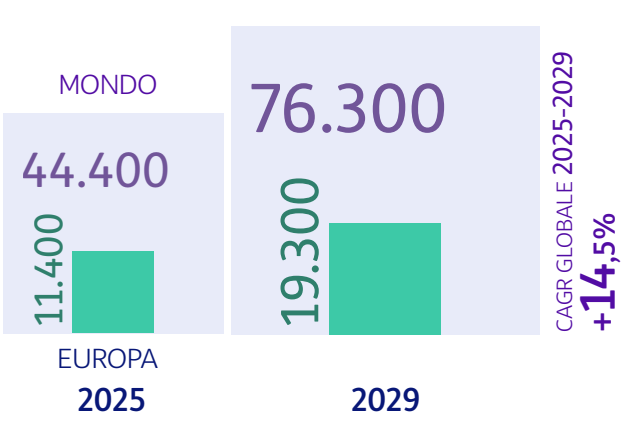
- Power & Energy: 36,1%
- Telecom & IT: 23%
- Manufacturing: 14,8%
- Residential & Commercial: 9,8%

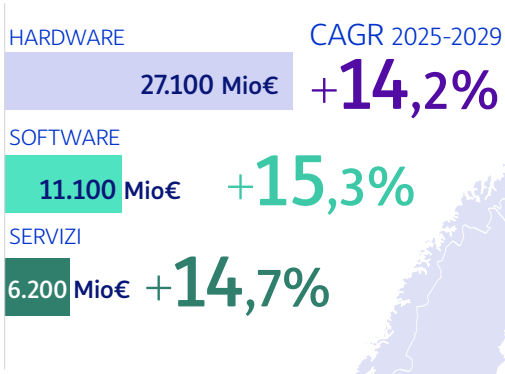
Questi dati mostrano come il monitoraggio sia cruciale non solo per la distribuzione elettrica, ma anche per settori industriali e digitali ad alta intensità energetica.

Le prospettive future sono molto positive: l'integrazione con tecnologie Industry 4.0, smart grid, IoT, intelligenza artificiale e analisi dei big data renderà gli EMS sempre più sofisticati e capaci di gestire l'energia in tempo reale. La transizione verso sistemi energetici decentralizzati e la crescente domanda di soluzioni sostenibili, soprattutto nei mercati emergenti, spingeranno ulteriormente il settore.

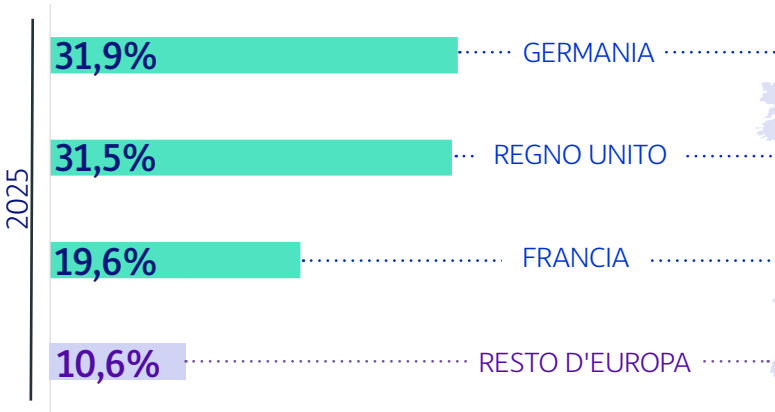
Settore **elettrico**

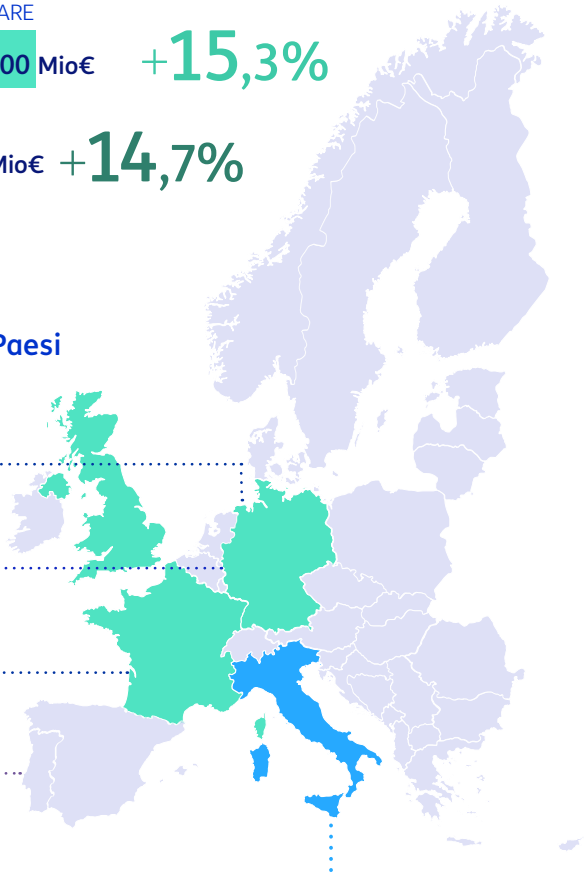
Mercato del monitoraggio reti elettriche (Mio€)





Mercato del monitoraggio reti elettriche nei principali Paesi europei (Mio€)





Mercato italiano del monitoraggio reti elettriche (Mio€)

Il mercato italiano del monitoraggio delle reti elettriche cresce rapidamente. Power & Energy domina (35-37%), seguito da Telecom & IT e Manufacturing (~15%). Digitalizzazione, IoT, cybersecurity e analisi predittiva guidano la transizione energetica verso la sostenibilità e la riduzione di CO_2, coinvolgendo anche settori minori.

Fonte: "Structural Health Monitoring Market" - MarketsandMarkets 2024

Mercato del monitoraggio delle infrastrutture idriche

Il settore idrico, pur meno visibile rispetto a quello energetico, è altrettanto cruciale se non più rilevante per la tenuta economica e sociale. In un contesto di transizione ecologica e di stress climatico, la scarsità idrica rappresenta un rischio sempre più concreto per le nostre società e le reti di approvvigionamento e distribuzione devono affrontare sfide legate alla vetustà degli impianti, alla dispersione, alla gestione sostenibile delle risorse. Investimenti in digitalizzazione e monitoraggio intelligente non sono più opzioni, ma leve strategiche per ammodernare le reti e si concentrano su tecnologie di controllo, automazione e gestione intelligente, con l'obiettivo di ridurre le perdite, migliorare la qualità dell'acqua e garantire la sicurezza idrica.

Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) ha stanziato oltre 4 miliardi di euro per interventi nel settore idrico, con un focus specifico sulla digitalizzazione delle reti e sull'implementazione di sistemi di monitoraggio avanzati. Tra gli obiettivi strategici figurano la riduzione delle perdite idriche, la tutela delle risorse e l'efficienza nella gestione degli impianti[71].

Il PNRR prevede l'introduzione di tecnologie innovative per il controllo dei nodi critici e delle aree vulnerabili della rete, con l'obiettivo di trasformare le reti tradizionali in reti intelligenti, capaci di acquisire e analizzare dati su portate, pressioni e qualità dell'acqua in tempo reale. Questo approccio è considerato essenziale per ridurre sprechi e migliorare la resilienza del sistema idrico nazionale[72].

Secondo le previsioni, il mercato del monitoraggio delle reti idriche connesse potrebbe crescere ad un ritmo medio del 11,9% annuo nel periodo di osservazione 2025-2029, passando da 18 a 25 miliardi di euro a livello globale. Questa dinamica riflette soprattutto la necessità di rinnovare le infrastrutture ormai obsolete e l'obiettivo strategico di ridurre le perdite idriche non contabilizzate per preservare la risorsa acqua.

Distinguendo il mercato tra dispositivi hardware (prevalentemente meters), soluzioni software e servizi, si evidenzia che quest'ultimo segmento mostra la dinamica di crescita più sostenuta (+14,1%), mentre la componente dei sensori registra la minore crescita. In effetti, i contatori dell'acqua comprendono dispositivi AMR (Automatic Meter Reading) e AMI (Advanced Metering Infrastructure). I contatori AMR, introdotti già da diverso tempo nel sistema, rappresentano un segmento di mercato più ampio rispetto agli AMI, ma la tendenza è destinata a cambiare. e si prevede che i contatori AMI – che presentano capacità di comunicazione più veloci e costi in calo – potranno crescere più velocemente rispetto al passato perché più adatti alle necessità di gestione delle reti intelligenti.

Le soluzioni di Smart Water Management (SWM) si articolano in diverse categorie anche molto differenti tra di loro, tra cui:

- gestione degli asset aziendali,
- analisi e gestione dei dati,
- sicurezza,
- gestione intelligente dell'irrigazione,
- APM (Asset Performance Management),
- gestione della forza lavoro mobile (MWM, Mobile Workforce Management),
- gestione della rete,
- CIS (Customer Information System) e fatturazione,
- rilevamento delle perdite e altre applicazioni.

Tra queste tipologie, si stima che la gestione degli asset aziendali rappresenti la quota maggiore del mercato delle soluzioni di SWM sostenuta dall'adozione di tecnologie per il monitoraggio in tempo reale e la manutenzione predittiva, strumenti essenziali per garantire continuità e ridurre i costi operativi. La manutenzione predittiva, in particolare, è destinata a crescere rapidamente a causa della crescente necessità di efficienza operativa e di prevenzione dei guasti, aspetto particolarmente critico in questo tipo di infrastrutture. L'analisi e la gestione dei dati, d'altra parte, dovrebbero registrare il tasso di crescita più elevato dal momento che l'innovazione in questo settore porterà ad una sensibile aumento – rispetto al passato – della quantità di dati raccolti che potranno promuovere l'introduzione di sistemi decisionali finalizzati a individuare le migliori soluzioni in termini di gestione dei consumi.

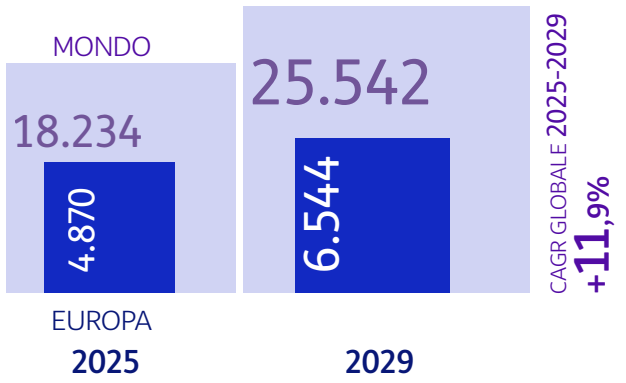
I servizi SWM sono ripartiti in tre grandi aree: servizi professionali, servizi di supporto/manutenzione e servizi di gestione. La prima tipologia comprende le attività di consulenza, integrazione, implementazione per progettare, personalizzare e avviare sistemi smart water. I servizi di supporto/manutenzione si riferiscono alle attività necessarie per assicurare il funzionamento ottimale, la continuità e la sicurezza dei sistemi nel tempo, mentre i servizi gestiti permettono una vista a 360° sul sistema in modo da consentire una governance completa.

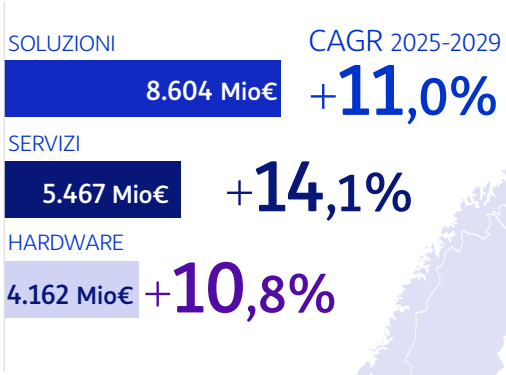
L'intero segmento dei servizi presenta la crescita più sostenuta nel periodo dì-osservazione (+14,1%). Tale dinamica è alimentata in particolare dalla crescente necessità di aggiornamenti e manutenzione delle soluzioni esistenti e dalla espansione dei progetti di modernizzazione nelle diverse aree regionali. Oggi, le utility stanno anche passando all'adozione di servizi gestiti per un'operatività senza problemi. I servizi gestiti aiutano inoltre le utility a concentrarsi maggiormente sulle loro esigenze operative principali.

L'Europa rappresenta una quota importante del mercato globale. Le utility dell'area europea mostrano una certa proattività e una crescita progressiva nell'implementazione e nella modernizzazione delle infrastrutture idriche. Il Regno Unito rappresenta il mercato più importante dell'area, con una quota del 22% nel 2025, mentre la Francia mostra la crescita più rapida (+11,4% di crescita media annua nel periodo osservato). L'Italia, pur con una rete idrica estesa e datata, ha ancora ampi margini di miglioramento, soprattutto in termini di digitalizzazione e smart metering.

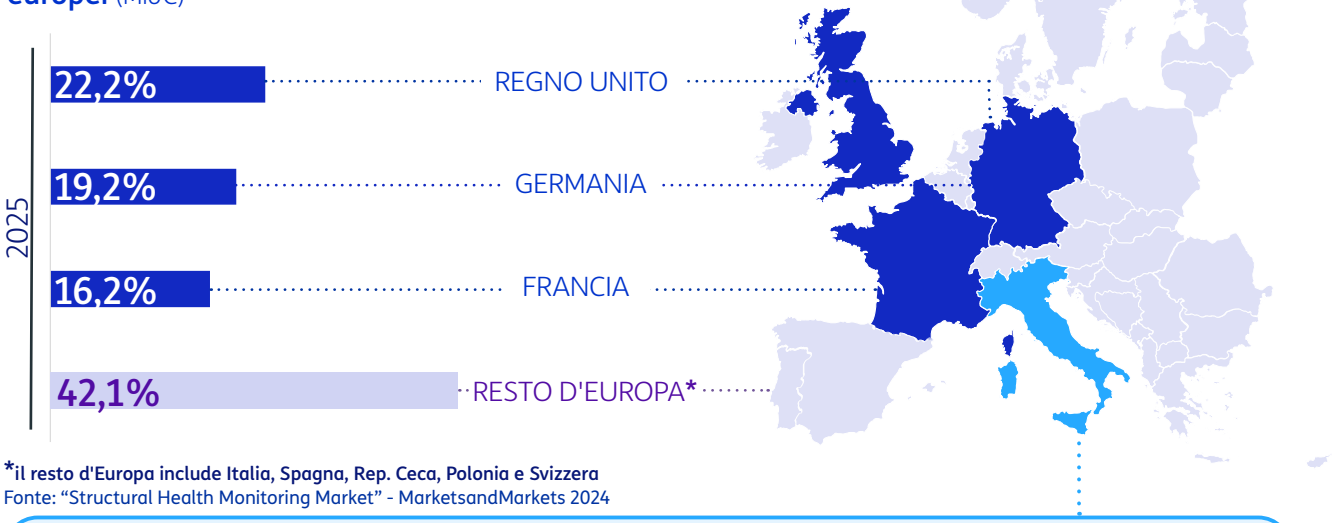
Settore **idrico**

Mercato del monitoraggio reti idriche (Mio€)





Mercato del monitoraggio reti elettriche nei principali Paesi europei (Mio€)

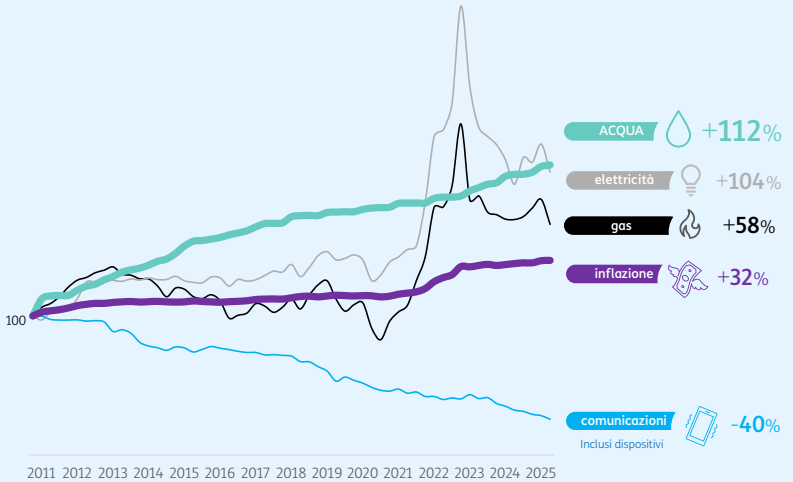


***il resto d'Europa include Italia, Spagna, Rep. Ceca, Polonia e Svizzera**
Fonte: "Structural Health Monitoring Market" - MarketsandMarkets 2024

Andamento dei prezzi Numero

indice 2010 = 100
Grafico in scala logaritmica

Il prezzo dell'acqua è più che raddoppiato rispetto al 2010 evidenziando l'aumento dei costi di gestione e la progressiva scarsità della risorsa acqua



Fonte: "Structural Health Monitoring Market" - MarketsandMarkets 2024

CENTRO STUDI TIM

Smart Energy

La digitalizzazione nel settore Utility sta accelerando, grazie all'adozione di tecnologie che favoriscono innovazione e maggiore efficienza.

Questo trend è confermato anche a livello italiano, guardando l'andamento del budget ICT delle aziende di questo ambito e in particolare la quota dedicata alla digitalizzazione rispetto al fatturato[1], in crescita dal 2,1% del 2019 al 2,8% del 2023, fino al 2,9% nel 2024, un valore oggi superiore rispetto a quello registrato in altri settori, come ad esempio il comparto industriale (2,2% nel 2024) e il mondo dei servizi (2,7%). La costante crescita della quota di fatturato dedicata alla digitalizzazione conferma l'importanza strategica di tali investimenti per il futuro delle utility.

Alla luce di ciò, risulta fondamentale individuare le principali innovazioni tecnologiche adottate dalle aziende del comparto. A questo riguardo, l'Osservatorio ha condotto un'analisi a livello internazionale per censire le tecnologie innovative abilitanti impiegate nei più recenti progetti di digitalizzazione. Su un campione di 282 iniziative, il 28% si basa su tecnologie IoT, il 20% su Intelligenza Artificiale e il 18% su soluzioni di Data Analytics. Seguono altre tecnologie emergenti, tra cui droni, satelliti, Digital Twin e Blockchain. Nella maggior parte dei progetti, le tecnologie vengono implementate congiuntamente, con particolare diffusione delle combinazioni IoT-Data Analytics e IoT-AI. Ciò evidenzia il ruolo sempre più centrale dell'IoT nella raccolta dei dati, che successivamente vengono valorizzati attraverso strumenti di analisi avanzata o algoritmi di AI, consentendo di estrarre informazioni di maggiore valore.

L'analisi dell'evoluzione temporale dei progetti di Smart Utility evidenzia una crescita significativa a partire dal 2023: la quota di iniziative è passata dal 14% nel 2022 al 30% nel 2023, fino al 32% nel 2024. In termini di settori coinvolti, il 57% dei progetti riguarda il comparto elettrico, il 25% il settore idrico e il 18% quello del gas. Analizzando questi ambiti, è possibile osservare come le tecnologie impiegate si distribuiscano lungo la catena del valore e quali funzionalità e interventi abilitino.

Nel settore elettrico, le innovazioni si concentrano nelle fasi di produzione da fonti rinnovabili e non, di trasmissione e di distribuzione dell'energia. Le tecnologie principali sono IoT, droni, AI e Data Analytics. Queste soluzioni permettono interventi come l'ispezione delle reti in aree difficili, il monitoraggio continuo delle condizioni operative, il rilevamento tempestivo dei guasti e la manutenzione predittiva.

Nel settore idrico, le tecnologie sono applicate soprattutto nelle fasi di estrazione e distribuzione. L'IoT è la più utilizzata, seguita da tecnologia satellitare, AI e Data Analytics. L'intervento più diffuso è il rilevamento delle perdite, reso possibile dall'AI, dai sensori e dalle immagini satellitari, che analizzano variazioni di pressione dell'acqua e umidità del terreno per individuare anomalie. Un'altra applicazione chiave è il monitoraggio della qualità dell'acqua, che raccoglie dati in tempo reale su parametri come pH, cloro, torbidità e contaminanti. Sono inoltre impiegate soluzioni per il monitoraggio delle infrastrutture e il rilevamento dei guasti.

1 Fonte: Osservatorio Startup Thinking, 141 rispondenti, 2024

Figura 1
Smart Metering gas
le caratteristiche del nuovo contatore 2G

Fonte: Osservatorio Digirtal Innovation - Politecnico di Milano (www.osservatori.net)

Nel settore del gas, i progetti sono equamente distribuiti tra upstream (esplorazione e produzione), midstream (trattamento, trasporto e stoccaggio) e downstream (distribuzione ed esportazione). L'AI è la tecnologia più utilizzata, seguita da IoT, robotica e droni. Gli interventi principali riguardano il rilevamento delle perdite, con algoritmi di AI in grado di identificare anomalie nei dati, l'ispezione tramite droni e robot per ridurre i rischi delle verifiche manuali, la manutenzione predittiva per prevenire guasti e ottimizzare i costi e la cybersecurity per garantire la sicurezza della rete.

In questo scenario di innovazione, lo Smart Metering rappresenta una delle componenti più rilevanti del mercato, grazie ai numerosi piani di roll-out attuati negli ultimi anni per sostituire i contatori tradizionali con dispositivi connessi di nuova generazione.
In Europa, la diffusione dei contatori elettrici intelligenti varia notevolmente da Paese a Paese: Belgio e Germania presentano un roll-out ancora limitato (meno del 20%), Portogallo e Regno Unito si trovano a metà del processo di sostituzione (circa 50%), Francia e Paesi Bassi hanno già raggiunto un'adozione intorno al 90%, mentre in Italia è terminata da alcuni anni l'installazione dei contatori di prima generazione e si è raggiunta quota 1,4 milioni di contatori di seconda generazione, con un'incidenza del 75%.

Tuttavia, il grado di diffusione e sostituzione dei contatori non è l'unico parametro di valutazione: è infatti fondamentale considerare anche le funzionalità avanzate che un contatore intelligente può offrire. E il nostro Paese, essendosi mosso in anticipo, non presenta alcune funzionalità che invece possiedono altri Paesi attivatisi successivamente. Per affrontare questa criticità, il mercato italiano sta cercando di far evolvere la propria offerta per i contatori 2G: se ancora oggi persiste un ritardo di 24-30 ore sull'invio dei dati dal distributore al sistema informativo ("chain 1"), si affacciano sul mercato nuove offerte relative alla "chain 2". Si tratta di appositi moduli e sensori che raccolgono i dati direttamente dall'utenza domestica, mettendoli a disposizione delle utility e permettendo a questi attori di attivare offerte ad hoc basate sul monitoraggio in tempo reale dei consumi energetici. Avanzano anche nuove soluzioni che prevedono l'integrazione con algoritmi AI, consentendo di analizzare e prevedere i consumi con elevata precisione, fino all'individuazione del comportamento energetico dei singoli dispositivi.

Nel settore del gas, il roll-out medio a livello europeo ha toccato quota 43%[2], con Italia, Francia e Paesi Bassi che si collocano tra i Paesi più attivi. In Italia, il parco contatori è interamente smart in ambito industriale, mentre per le utenze domestiche la diffusione ha raggiunto il 90%, con tecnologie punto-punto (59%) e multi-punto (41%). Anche in questo ambito si sta lavorando sul contatore di seconda generazione (cfr. Figura 1), con le prime installazioni già avviate. Si tratta di dispositivi in grado di comunicare su più canali combinando le reti primarie (ad esempio, NB-IoT e LoRaWAN) con una rete "mesh" di backup, consentendo la trasmissione dati anche in assenza di segnale e registrando performance prossime al 100% (contro il 70% dei contatori di prima generazione). Tali contatori sono inoltre dotati di funzionalità e algoritmi legati alla sicurezza, nonché di sensori operativi: i primi permettono di rilevare eventuali sismi e incendi e di sospendere l'attività di erogazione del gas, mentre i secondi monitorano la carica effettiva residua del contatore e la pressione di esercizio.

Per quanto riguarda il settore idrico, sebbene le installazioni siano ancora limitate, il mercato è in forte espansione. In Europa, il comparto vale 1,3 miliardi di dollari, con un roll-out del 49%[3]. In Italia si contano 4 milioni di contatori intelligenti installati (19% del totale), di cui 500.000 nel 2024, segnando un incremento del 14% rispetto all'anno precedente[4]. È un settore che si sta muovendo velocemente e che porta una serie di benefici che spaziano dalla lettura del contatore da remoto a una maggiore accuratezza della bolletta, passando per il rilevamento frodi e l'identificazione di guasti nelle condutture. L'Osservatorio ha quantificato i benefici ambientali ipotizzando diversi scenari di roll-out da 160.000, 3,5 milioni e 17,5 milioni di contatori installati (equivalenti alla totalità dei contatori presenti sul territorio italiano). Le quantità di acqua risparmiate variano – sempre con riferimento ai tre scenari – da 2,1 milioni a 63,6 milioni a 453,5 milioni di m3/anno, che corrispondono rispettivamente a un risparmio del 3,7%, 5,2% e 7,4% rispetto allo scenario senza telelettura.

2 Fonte: Berg Insight, 2024
3 Fonte: Precedence Research, 2024
4 Fonte: Analisi dell'ufficio studi di MeteRSit, Gruppo SIT, 2023

Smart Road

La strategia europea per perseguire gli obiettivi di efficienza, sicurezza e sostenibilità nella mobilità emerge anche attraverso le sperimentazioni in ambito Smart Road, che stanno assumendo un ruolo sempre più importante, grazie alla capacità di raccogliere grandi quantità di dati sia dai veicoli connessi sia dalle infrastrutture intelligenti, aprendo così la strada all'erogazione di numerosi servizi innovativi. A riprova di ciò, il 2024 si conferma un anno significativo per queste iniziative, sia a livello nazionale che internazionale. Il censimento di 166 progetti avviati nel mondo dal 2017 al 2024 da parte dell'Osservatorio[1], conferma una continua proliferazione di nuove iniziative. Nello specifico, sono ben 46 i progetti avviati nel 2024, in crescita rispetto ai 44 del 2023 e ai 28 del 2022.

I principali obiettivi delle iniziative avviate riguardano la sicurezza stradale, il maggior comfort per chi guida, l'ottimizzazione dei flussi di traffico, la possibilità di ottimizzare la manutenzione dell'infrastruttura stradale e la riduzione dell'inquinamento. In Italia sono 21 le iniziative attivate nel solo triennio 2022-2024 (cfr. Figura 1), a riprova dell'impegno e dell'interesse del Paese su questo fronte. Recenti esempi, particolarmente virtuosi, sono:

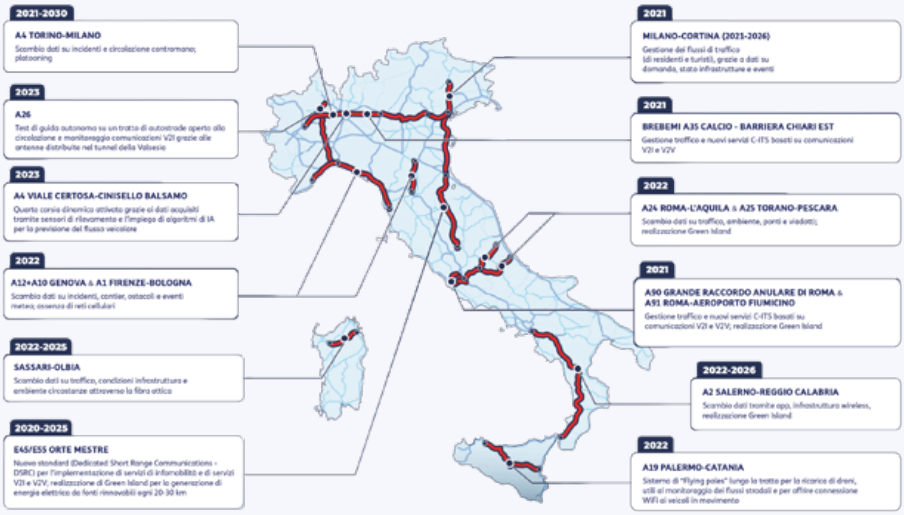
La A7 Milano-Serravalle, con un progetto che trasformerà l'intero tracciato in Smart Road entro il 2026, con l'obiettivo di migliorare sicurezza e gestione del traffico tramite tecnologie digitali per il monitoraggio in tempo reale, rilevamento incidenti e comunicazione veicolo-infrastruttura;

la A32, lungo la quale nel 2024 è stato avviato un corridoio digitale abilitato al 5G in prossimità del traforo del Frejus, con l'obiettivo di migliorare la connettività e la sicurezza della mobilità lungo l'asse Torino-Lione, in un'ottica di supporto alla mobilità connessa e autonoma.

la A2, dove nel 2024 è stata completata la Green Island di Montalto Uffugo (CS), una delle infrastrutture simbolo del programma Smart Road di Anas, di cui l'investimento complessivo ammonta a circa 1 miliardo di euro e del quale è tuttora in corso una prima fase sperimentale.

L'Osservatorio ha analizzato i servizi dei 166 progetti Smart Road censiti a livello internazionale, classificandoli sulla base di tre livelli di maturità. Il primo livello comprende servizi di base come, ad esempio, i servizi informativi per l'invio di notifiche push in tempo reale agli utenti, presenti nella maggior parte dei progetti (54%). Il secondo livello è composto da servizi più personalizzati e adattivi, come i sistemi di assistenza alla guida (37%), di ricarica per veicoli elettrici (14%) e di mobilità integrata (14%) per un'esperienza di viaggio più sicura e fluida. Il terzo livello riguarda servizi avanzati come, ad esempio, l'analisi delle prestazioni dei Veicoli Connessi e Autonomi (CAV) e l'utilizzo di piattaforme cloud per coordinare in maniera centralizzata i flussi stradali, agendo preventivamente per ridurre il rischio di collisioni. Sebbene questa tipologia di servizi mostri un discreto livello di diffusione (39%), sono spesso presenti solo all'interno di sperimentazioni e progetti pilota. Appartengono al terzo livello anche i servizi di generazione e stoccaggio di energia pulita per alimentare sistemi di illuminazione intelligenti o stazioni di ricarica per veicoli elettrici, ancora poco diffusi all'interno delle iniziative (1%).

I servizi abilitati dai progetti Smart Road saranno ulteriormente potenziati attraverso due strumenti di cui oggi si osserva un uso crescente: l'integrazione con dati geospaziali, provenienti da satelliti, e la loro rielaborazione attraverso algoritmi di AI. In futuro, è probabile che assisteremo a un aumento delle partnership tra attori pubblici e privati, per integrare sempre di più le informazioni provenienti da veicoli e infrastrutture con i dati quelli satellitari e con l'Intelligenza Artificiale, accelerando così l'innovazione e la sostenibilità nel settore della mobilità.



Smart Road

le principali sperimentazioni attive in Italia

Fonte: Osservatorio Digirtal Innovation - Politecnico di Milano (www.osservatori.net)

CAPITOLO 7: Benefici economici

Principali motivazioni per l'adozione di soluzioni smart

Come abbiamo avuto modo di descrivere nei capitoli precedenti, l'introduzione e l'impiego dei sistemi SHM sta determinando una serie di vantaggi. Alcuni di questi benefici sono immediatamente tangibili e misurabili, altri più generali, legati al raggiungimento degli obiettivi ESG della strategia 2030. L'obiettivo di questo capitolo è quello di esplorare le molteplici ricadute connesse alla diffusione delle tecnologie SHM, analizzandone l'impatto operativo, economico e sociale.

Infrastrutture civili

L'adozione del monitoraggio intelligente nell'ambito delle infrastrutture civili è sostenuta da motivazioni tecniche, economiche e sociali:

- **Riduzione del rischio e aumento della sicurezza**: il monitoraggio continuo consente di individuare difetti in fase di costruzione o degradi progressivi, riducendo l'incertezza e permettendo decisioni basate su dati oggettivi[73]. La sicurezza è uno dei principali benefici del monitoraggio delle infrastrutture. Identificando i problemi in anticipo, è possibile evitare incidenti e garantire la sicurezza degli utenti e dei lavoratori. Un sistema di monitoraggio efficace consente di rilevare cambiamenti strutturali o ambientali che potrebbero compromettere l'integrità delle infrastrutture, consentendo di prendere misure preventive per evitare situazioni di rischio.

- **Miglioramento delle prestazioni**: Attraverso il monitoraggio continuo, è possibile ottimizzare le prestazioni delle infrastrutture, migliorandone l'efficienza operativa e riducendo i costi di manutenzione a lungo termine. Per esempio, nei sistemi di trasporto, il monitoraggio può aiutare a gestire il traffico in modo più efficiente, riducendo i tempi di attesa e migliorando la qualità del servizio. Inoltre, le infrastrutture energetiche possono beneficiare di un monitoraggio continuo per garantire una distribuzione stabile e affidabile dell'energia.

- **Manutenzione predittiva**: si passa da una strategia "time-scheduled" a una "condition-based", ottimizzando costi e tempi[74].

- **Rilevazione precoce dei problemi:** Il monitoraggio consente di individuare anomalie e difetti strutturali nelle prime fasi, permettendo interventi tempestivi e riducendo il rischio di guasti catastrofici. Ad esempio, crepe in un ponte possono essere rilevate e riparate prima che si allarghino e compromettano la stabilità della struttura. Questa rilevazione precoce non solo previene incidenti, ma riduce anche i costi di riparazione, poiché i problemi vengono affrontati prima di aggravarsi.

- **Estensione della vita utile**: studi dimostrano che l'installazione di SHM su ponti candidati alla sostituzione può ridurre del 30% i costi

complessivi, evitando interventi non necessari[75].

- **Sostenibilità**: il monitoraggio intelligente riduce sprechi di risorse, evita demolizioni premature e supporta strategie di asset management.
- **Impatto sociale**: oltre ai benefici tecnici, il monitoraggio trasmette un'immagine di affidabilità e "high-tech", rassicurando l'opinione pubblica sulla sicurezza delle infrastrutture.

Applicazioni e casi studio

Tra i casi più emblematici si annovera il Ponte San Giorgio di Genova, dotato di un sistema di monitoraggio basato su sensori in fibra ottica e algoritmi di analisi avanzata. Questo sistema consente di rilevare deformazioni, vibrazioni e variazioni termiche in tempo reale, garantendo la sicurezza dell'opera e fornendo dati utili per la ricerca[76].

Analogamente, numerosi trafori alpini, come il Tunnel del Frejus e il Monte Bianco, sono monitorati con reti di sensori distribuiti, capaci di rilevare spostamenti, pressioni e variazioni ambientali. Questi sistemi permettono di prevenire fenomeni di cedimento e di pianificare interventi mirati[77].

Reti elettriche

La società moderna dipende fortemente dall'energia elettrica, e la sua mancanza può causare gravi disagi. Secondo i dati della U.S. Energy Information Administration (EIA), nel 2020 i clienti statunitensi hanno sperimentato interruzioni di corrente per oltre otto ore in media, il valore più alto da quando l'ente ha iniziato a raccogliere dati sulla continuità del servizio[78]. Questo dato è stato influenzato da eventi eccezionali come uragani e tempeste, ma anche escludendo tali circostanze, le interruzioni annuali si attestano mediamente intorno alle due ore.

In Italia, le interruzioni sono monitorate da ARERA. La durata media delle interruzioni lunghe[79] senza preavviso (SAIDI[80]) per utente in bassa tensione (BT) è passata da 99 minuti nel 2023 (ma nel 2022 erano stati 75 minuti/utente in BT) ai 76 minuti nel 2024[81]. Il miglioramento della performance della durata per il 2024 è in parte associato al minor impatto di eventi meteorologici estremi (alluvioni, tempeste di vento e ondate di calore)[82]. Se si considerano le interruzioni lunghe totali[83], incluse quelle programmate, i clienti in BT hanno registrato una durata media di 185 minuti nel 2023, ridotta a 163 minuti nel 2024. Il numero delle interruzioni totali, brevi e lunghe, è passato da 4,88 anno per utente in BT[84] nel 2023 a 5,13 nel 2024. Per molti, è ancora troppo, e le aziende elettriche cercano costantemente soluzioni per ridurre sia il numero sia la durata dei blackout.

Nel calcolo di tali valori sono dedotte: le interruzioni con origine sulla RTN e sulla rete in alta tensione,

le interruzioni eccezionali avvenute in periodi di condizioni perturbate e in giorni con fulminazioni eccezionali (identificate in base a due metodi statistici specifici), le interruzioni dovute a eventi eccezionali, ad atti di autorità pubblica e a furti, nonché le interruzioni dovute a cause esterne a partire dall'anno 2024.

Il monitoraggio intelligente consente:

- **Rilevamento immediato dei guasti** e ripristino automatico (self-healing).
- **Bilanciamento dinamico dei carichi** per ridurre picchi e sprechi.
- **Previsione della domanda** e ottimizzazione delle risorse grazie ad AI e ML.
- **Integrazione delle rinnovabili** gestendo l'intermittenza con accumulo e demand response.
- **Cybersecurity e protezione dei dati,** indispensabili per reti connesse e interoperabili.

L'applicazione nelle reti elettriche di sistemi di monitoraggio integrato ha permesso di ridurre l'insorgenza e la durata delle interruzioni locali di corrente dal 34% al 55%[85].

Un esempio significativo è quello di PPL Electric Utilities, parte del gruppo PPL Corporation, che fornisce energia a oltre 1,4 milioni di clienti in Pennsylvania. L'azienda ha avviato una strategia di modernizzazione della rete elettrica, adottando anche il modulo Fault Isolation Service Restoration (FISR), parte del software ADMS (Advanced Distribution Management Solution) di GE Digital.[86] Prima dell'adozione di ADMS, la gestione dei guasti era manuale: gli operatori dovevano individuare il problema tramite mappe cartacee e inviare squadre sul campo per eseguire le manovre. Questo richiedeva tempo e comportava lunghi disservizi. Oggi, grazie alla telemetria e alla visibilità immediata delle anomalie, il ripristino avviene in pochi minuti anziché in ore, riducendo anche il numero di clienti coinvolti. Se un interruttore di linea si apre per un guasto, i dispositivi intelligenti rilevano la corrente di guasto e inviano i dati al software ADMS. Quest'ultimo elabora automaticamente un piano per isolare il tratto danneggiato e ripristinare l'alimentazione tramite linee alternative, mantenendo il servizio per la maggior parte degli utenti mentre si effettuano le riparazioni. Dal suo avvio, il sistema ha evitato milioni di interruzioni e ridotto i blackout del 30% rispetto a dieci anni fa. Nel 2021, PPL Electric ha registrato una riduzione del 34% rispetto alla media quinquennale, confermando l'efficacia delle tecnologie smart grid.

Un esempio di applicazione delle tecnologie smart grid è quello di EPB Chattanooga (Tennessee, USA)[87]. L'azienda ha implementato una rete in fibra ottica integrata con contatori intelligenti (smart meters) e dispositivi di automazione, creando una infrastruttura capace di monitorare e gestire il flusso di energia in tempo reale. Grazie a questa innovazione, EPB ha ridotto le interruzioni di corrente del 55%, dimostrando come la digitalizzazione della rete possa migliorare la resilienza e la continuità del servizio. Il sistema utilizza sensori distribuiti e interruttori automatici che isolano i guasti e ripristinano l'alimentazione in pochi secondi, senza intervento umano. Questo approccio non solo aumenta l'affidabilità, ma consente anche una gestione più efficiente dei carichi e una risposta rapida agli eventi critici, ponendo le basi per una rete elettrica "autoriparante" e altamente performante.

Quali sono dunque i vantaggi dell'adozione delle Smart grid e conseguentemente dei sistemi di monitoraggio intelligente?

1. Maggiore affidabilità e riduzione dei blackout. Uno dei principali vantaggi delle smart grid è la capacità di migliorare la continuità del servizio. Grazie a dispositivi intelligenti e software avanzati, la rete può individuare rapidamente i guasti, isolare le aree danneggiate e ripristinare l'alimentazione in pochi secondi, senza intervento umano. Questo approccio riduce sia il numero sia la durata delle interruzioni, aumentando la resilienza del sistema anche in caso di eventi estremi[88].

2. Integrazione delle fonti rinnovabili. Le smart grid sono una tecnologia abilitante per la decarbonizzazione. Consentono di integrare in modo efficiente fonti rinnovabili come solare ed eolico, gestendo la loro variabilità e garantendo stabilità alla rete. Questo è essenziale per raggiungere gli obiettivi europei di riduzione delle emissioni e per favorire l'elettrificazione dei consumi, come trasporti e riscaldamento[89].

3. Efficienza energetica e riduzione dei costi. Le smart grid ottimizzano la distribuzione dell'energia, riducendo le perdite lungo la rete e migliorando la gestione dei picchi di domanda. Questo si traduce in minori costi operativi per i gestori e in tariffe più competitive per i consumatori. Inoltre, grazie ai contatori intelligenti (smart meters), gli utenti possono monitorare i propri consumi in tempo reale e adottare comportamenti più sostenibili[90].

4. Partecipazione attiva dei consumatori. Le smart grid trasformano il consumatore in prosumer, cioè produttore e consumatore di energia. Chi dispone di impianti fotovoltaici, ad esempio, può immettere energia in rete e partecipare a mercati locali, favorendo modelli di comunità energetiche e autoconsumo collettivo[91].

5. Sicurezza e resilienza. La digitalizzazione della rete consente di implementare sistemi di cybersicurezza e strategie di controllo avanzate, garantendo la protezione dei dati e la continuità del servizio anche in presenza di minacce informatiche. Inoltre, le smart grid sono

progettate per resistere meglio a eventi climatici estremi, grazie alla capacità di autoriparazione e alla gestione distribuita[92].

Reti idriche

L'adozione di sistemi di Smart Water Monitoring (SWM) è spinta da una serie di fattori strategici e tecnologici. In primo luogo, come abbiamo visto, la crescente scarsità idrica e la pressione normativa a livello globale rendono indispensabile migliorare l'efficienza delle reti e ridurre le perdite. Secondo i rapporti ONU e OCSE, la domanda di acqua è destinata ad aumentare significativamente entro il 2050, con rischi di deficit che impongono investimenti in tecnologie di monitoraggio avanzate[93].

Come abbiamo visto il problema delle perdite in Italia è molto rilevante. Per questo motivo, il PNRR finanzia interventi di digitalizzazione e telecontrollo, favorendo l'adozione di sensori IoT e sistemi di analisi predittiva per ridurre le perdite e migliorare la resilienza delle infrastrutture. Un altro driver fondamentale è la maturità tecnologica: la disponibilità di sensori idraulici, acustici e di qualità dell'acqua connessi tramite protocolli come LoRaWAN, NB-IoT e 5G, insieme a piattaforme edge e cloud, consente di implementare monitoraggi continui a costi sempre più competitivi[94]. Queste soluzioni permettono non solo di rilevare perdite, ma anche di monitorare parametri di qualità come pH, torbidità e cloro, garantendo conformità normativa e sicurezza per i consumatori[95].

I vantaggi dall'adozione di questi sistemi sono notevoli:

- Meno perdite, più efficienza: micro-rotture individuate in tempo reale riducono il volume non fatturato e il prelievo sulla risorsa[96].
- Servizio continuo e resiliente: riparazioni più rapide e minori costi di manutenzione[97].
- Acqua sicura: l'integrazione di sensori chimici e fisici consente di individuare anomalie chimiche e fisiche rilevate prima che diventino emergenze[98].
- Efficienza economica: ottimizzazione dei profili di pompaggio e riduzione dei costi operativi ed energetici[99].
- Leak detection avanzato: soluzioni IoT per l'acquisizione distribuita di pressione e portata identificano perdite con una precisione del 75%, riducendo i tempi di intervento da settimane a ore[100]. Questo si traduce in un vantaggio anche per i clienti (notifiche in tempo reale e automazione) con impatti positivi anche sul fronte assicurativo.

I benefici derivanti dell'adozione delle tecnologie di monitoraggio intelligente

Dopo aver esaminato i driver evidenziati dalla letteratura e confermati da studi e casi d'uso, abbiamo applicato queste evidenze a casi reali per quantificare dei benefici:

- **Economici**: quanto si può risparmiare adottando le soluzioni illustrate, trasformando l'innovazione in vantaggio concreto.
- **Ambientali**: la riduzione delle emissioni, misurata in CO_2 equivalente, che rende il monitoraggio intelligente non solo efficiente, ma anche sostenibile.

I benefici economici per le infrastrutture civili.

Costi di manutenzione

Secondo una indagine di ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili), l'applicazione di monitoraggio intelligente e di intelligenza artificiale alle costruzioni può rivoluzionare il settore, offrendo benefici concreti in termini di efficienza e riduzione dei costi[101]. L'adozione di soluzioni SHM e progettazione basate su AI consente di ottenere:

- Precisione nel controllo qualità superiore all'80%,
- Riduzione dell'80% dei tempi di preparazione delle offerte nelle gare d'appalto,
- Taglio dei costi di manutenzione compreso tra il 20% e il 30%, grazie a sistemi predittivi che individuano anomalie prima che diventino criticità, evitando interventi straordinari e fermo macchina.
- Diminuzione delle tempistiche di progettazione (30-50%) e dei tempi di consegna (50-70%), con un impatto diretto sulla competitività delle imprese.

Riduzione dei costi di manutenzione stradale del 20/30%

Oltre ai risparmi economici, l'AI permette il monitoraggio in tempo reale delle condizioni di lavoro, riducendo i rischi e prevenendo incidenti. Secondo il report, le aziende che hanno avviato l'adozione già nel 2017 hanno recuperato rapidamente l'investimento iniziale, ottenendo vantaggi competitivi significativi.

Una simulazione di impatto utilizzando i dati ANAS

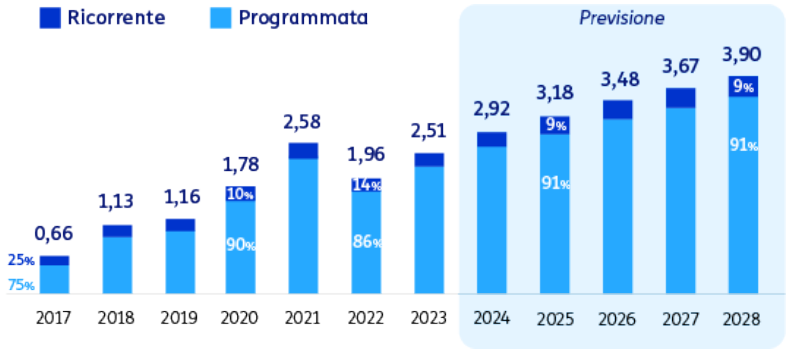
In Italia, Anas S.p.A. gestisce circa 32.342 km di infrastrutture stradali di interesse nazionale, includendo strade statali, autostrade e raccordi non a pedaggio, oltre alle relative strade di servizio. È il secondo gestore nazionale per autostrade e raccordi (circa 1.300 km). Le attività principali comprendono manutenzione ordinaria e straordinaria, gestione, sicurezza e progettazione, con un focus crescente su manutenzione programmata e ammodernamento.

Dai bilanci Anas emergono gli investimenti e le spese dedicate alla manutenzione, come illustrato nel grafico seguente.

Costi di manutenzione delle strade ANAS

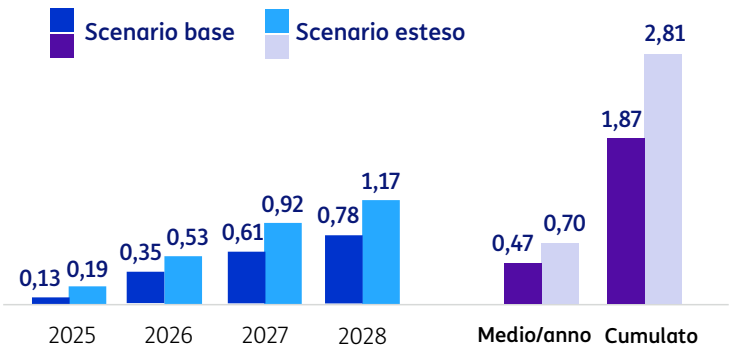
(Miliardi di euro)

Fonte: bilanci ANAS 2018-2024. Elaborazioni Centro Studi TIM



*Assumendo di poter raggiungere in 4 anni il tasso di risparmio a regime e applicando questo risultato ad una previsione sui costi ANAS di manutenzione ordinaria (sia ricorrente sia programmata) nei prossimi 4 anni (2025-2028), l'**applicazione di queste tecnologie alla manutenzione ordinaria delle strade italiane** potrebbe portare:*

- *un **risparmio medio/anno** compreso tra **470 e 700 milioni di euro** (rispettivamente nello scenario base di risparmi al 20% e nello scenario esteso di risparmio al 30%)*
- *Pari ad un **risparmio cumulato** nel periodo '25-'28 compreso **tra 1,87 e 2,81 miliardi di euro.***



Risparmi sui costi di manutenzione strade ANAS indotti dal monitoraggio strutturale e l'AI

(Miliardi di euro)

Fonte: Elaborazioni Centro Studi TIM su dati da bilanci ANAS 2018-2024.

Prevenzione crolli

Tra il 2014 e il 2020 l'Italia ha vissuto una serie di crolli di infrastrutture civili che hanno messo in luce criticità strutturali e carenze manutentive (vedi box).

Le indagini su questi eventi hanno evidenziato fattori ricorrenti: degrado strutturale, manutenzione insufficiente e assenza di monitoraggi sistematici, frane e dissesto idrogeologico, spesso aggravati da eventi meteorologici estremi, errori progettuali e difetti costruttivi in alcune infrastrutture, sovraccarichi e traffico intenso, non previsti nei progetti originari. Tutti aspetti che possono essere prevenuti utilizzando sistemi di monitoraggio strutturale. Le misure normative e tecniche adottate dal governo all'indomani del crollo del Ponte Morandi mirano a ridurre il rischio di nuovi crolli, ma richiedono continuità negli investimenti e una cultura della manutenzione preventiva.

Prevenzione crolli: si può prevenire il 27% dei crolli di natura strutturale

Uno studio su un viadotto svizzero acciaio-calcestruzzo, monitorato per tre anni con tecniche SPM (Structural Performance Monitoring) e SHM (Structural Health Monitoring), ci permette di individuare una misura esatta: il monitoraggio aumenta del 36% la conformità strutturale e può prevenire fino al 27% dei crolli[102] [103] [104]. Assumendo una distribuzione uniforme tra 0 ed 1 dei livelli di conformità nei casi di crollo (ipotesi prudente poiché è altamente probabile che nella maggior parte dei casi la conformità sia poco sotto 1), si ottiene che il monitoraggio strutturale continuativo può prevenire il 27%[105] dei crolli di natura infrastrutturale.

Crolli di ponti in Italia

- 2014: cedimento del viadotto Petrulla (SS 626, Licata), quattro feriti e ricostruzione completata nel 2018.
- 2015: frana sul viadotto Himera (A19 Palermo-Catania), chiusura prolungata di un'arteria strategica.
- 2016: crollo di un cavalcavia sulla Milano-Lecco, una vittima e quattro feriti.
- 2017: collasso del viadotto Fossano (senza vittime) e crollo di un ponte sull'A14 ad Ancona durante lavori (due morti).
- 2018: disastro del Ponte Morandi a Genova, 43 vittime e impatto devastante su economia e mobilità.
- 2019: frana sull'A6 Torino-Savona, chiusura prolungata.
- 2020: crollo del ponte di Albiano Magra, un ferito.

Attraverso il monitoraggio strutturale è quindi possibile **prevenire tutti i crolli causati da**:

- **Degrado progressivo** e non visibile (corrosione dell'acciaio, cavi precompressione, fatica metallica).
- **Eventi improvvisi e imprevedibili** (terremoti, alluvioni, urti di mezzi navali).
- **Errori di progettazione o costruzione** che si manifestano nel tempo.

Quali sono però i costi del monitoraggio strutturale, e i vantaggi economici della sua applicazione? Il suo valore emerge analizzando i diversi livelli di prevenzione:

- **Crolli severi**: Un sistema di monitoraggio intelligente è progettato per individuare problemi critici – come corrosione di cavi, cedimenti di fondazioni o fatica nei giunti metallici – molto prima che possano causare un collasso riducendo quasi a zero il rischio di crolli improvvisi.
- **Crolli intermedi:** rilevamento di danni significativi (fessurazioni profonde o deformazioni anomale) consente di intervenire prima che un danno lieve evolva in uno più serio. ridurre i costi di manutenzione e a preservare la vita utile della struttura.
- **Danni lievi**: prevenzione dell'evoluzione di microfessurazioni e usura, riducendo costi di manutenzione.

Il monitoraggio strutturale è efficace solo se applicato con strategia. Quattro fattori fanno la differenza:

- **Copertura e qualità del sistema**: monitorare solo i grandi ponti o anche edifici pubblici e viadotti minori fa una grande differenza.
- **Età e stato delle infrastrutture**: in Paesi con opere datate, come Italia e USA, il potenziale di prevenzione è enorme.
- **Condizioni ambientali ed eventi estremi:** dopo terremoti, alluvioni o frane, i dati dei sensori sono cruciali per valutare la sicurezza.
- **Reattività della gestione:** il monitoraggio è inutile se le allerte non vengono analizzate e trasformate in azioni concrete.

Dagli studi raccolti si evidenziano i vantaggi economici che derivano dall'applicazione del monitoraggio strutturale:

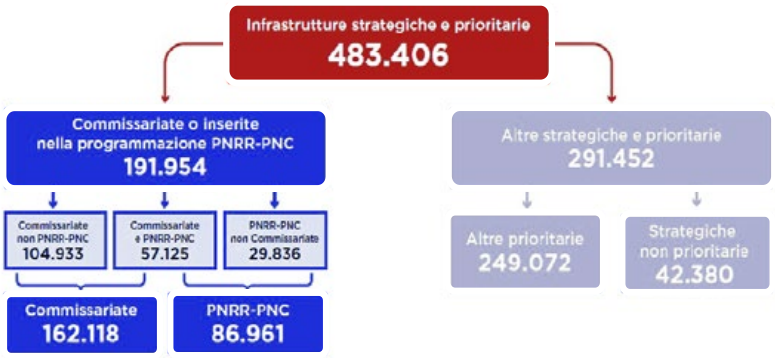
- **Riduzione dei costi di manutenzione:** la manutenzione predittiva basata sul monitoraggio può ridurre i costi del 25-40% rispetto alla manutenzione programmata e fino al 70% rispetto a quella reattiva[106].
- **Estensione della vita utile**: un sistema SHM può prolungare la vita di una struttura di decenni, evitando ricostruzioni costose.
- **Rapporto costo-beneficio:** il costo di un sistema di monitoraggio è irrisorio rispetto alle perdite economiche causate da chiusure o crolli.

Simulazione di impatto: risparmi dall'adozione di sistemi di SHM

Facciamo qualche esempio.

- ***Ponte San Giorgio**, ricostruito dopo il crollo del Morandi. Costo di circa €202 milioni. Il nuovo ponte è dotato di un monitoraggio estremamente capillare proprio per evitare qualsiasi futura tragedia*[107].
- ***Ponte della Scafa** (Fiumicino). Chiuso nel 2018 per gravi problemi strutturali e rischio di collasso, con pesanti ripercussioni sulla mobilità tra Ostia e Fiumicino. La ricostruzione è stata inserita tra le opere strategiche per il Giubileo 2025*[108]*. La costruzione del nuovo ponte dovrebbe durare circa tre anni, con un costo stimato in circa 110 milioni di euro*[109].
- ***Viadotto Cannavino** (Celico, Calabria) criticità strutturali*[110]*, chiusure ripetute, lavori di messa in sicurezza e progetto di demolizione/ricostruzione, con fondi PNRR per 17,2 milioni di euro.*[111] [112] [113]

Vediamo quindi quali sono gli investimenti previsti in infrastrutture critiche nei prossimi anni. Secondo il Rapporto annuale della Camera dei deputati 2024 sulle infrastrutture strategiche e prioritarie il costo delle infrastrutture strategiche prioritarie val 31 agosto 2024 era pari a 483 miliardi di euro, rispetto alle quali le disponibilità finanziarie ammontavano a 343 miliardi, pari al 71% del costo. Le Infrastrutture commissariate o inserite nella programmazione PNRR-PNC[114] *avevano un costo di 192 miliardi di euro (il 40% del totale delle infrastrutture strategiche e prioritarie) e presentavano una copertura finanziaria del 71%.*



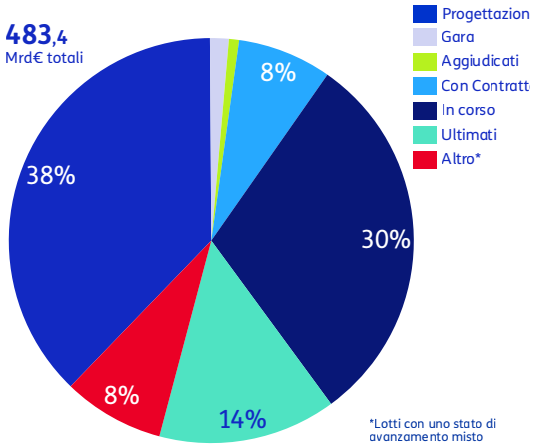
Le altre infrastrutture strategiche e prioritarie nazionali, non inserite nel PNRR né oggetto di commissariamento ma importanti e destinate a ridurre il gap infrastrutturale del Paese, avevano un costo di 291 miliardi con copertura finanziaria, al momento della rilevazione, del 71%.

La maggior parte delle risorse, pari al 79% del programma, è destinata al potenziamento delle reti ferroviarie e stradali: circa 205,6 miliardi per la rete ferroviaria (42,5%) e 161,8 miliardi per quella stradale (33,5%). A queste si aggiungono 13,5 miliardi per il Ponte sullo Stretto di Messina, mentre il restante 17,5% – circa 86 miliardi – è dedicato a sistemi urbani, porti, aeroporti e ciclovie. Una quota residuale del 3,5% finanzia il Mo.S.E., altri interventi infrastrutturali e l'edilizia pubblica.

Al 31 agosto 2024 risultavano già ultimate opere per circa 69 miliardi di euro, mentre eran o in corso lavori per 146 miliardi, con le restanti opere distribuite in vari stadi di avanzamento.

Considerando che i fondi PNRR-PNC devono essere spesi entro il 2026 e che i finanziamenti FSC sono programmati fino al 2027 ma utilizzabili entro il 2030, è possibile ipotizzare una distribuzione dei costi fino al 2030 basata sugli avanzamenti attuali e sulle previsioni del Piano Strutturale di Bilancio.[115]

Costi delle opere infrastrutturali per stato di avanzamento (Mrd€- valori %)

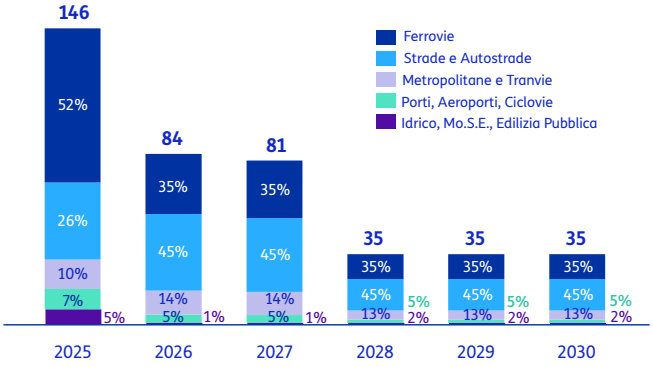


Fonte: Camera dei Deputati - Infrastrutture strategiche e prioritarie 2024

Per stimare i totali degli investimenti previsti per il 2026 e il 2027, abbiamo utilizzato i dati sugli investimenti fissi lordi delle Amministrazioni Pubbliche relativi al periodo 2016-2027, come indicato nelle previsioni del Piano Strutturale di Bilancio di medio termine. Su queste previsioni è stata applicata la ripartizione degli investimenti per tipologia, secondo quanto definito dal piano. Il residuo, valido per il triennio 2028-2030, è stato suddiviso equamente nei tre anni di piano per minimizzare l'errore.

Stiamo parlando di investimenti di grande entità. Abbiamo seguito le ipotesi formulate da D. Inaudi in Cost-Benefits Analysis in SHM Projects[116]*, che riportiamo qui di seguito per facilitare la lettura del lavoro. Supponiamo di installare sistemi SHM sui ponti identificati come candidati alla sostituzione, in base alle condizioni strutturali stimate*[117]*. Il costo del sistema SHM e l'analisi dei dati ingegneristici si attesta di solito attorno al 3% del costo di ricostruzione*[118] *per valutare se debba essere sostituito, se possa essere riabilitato o se possa continuare a funzionare senza interventi.*

Investimenti previsti in infrastrutture critiche (Mrd €)



Secondo D. Inaudi- Cost-Benefits Analysis in SHM Projects[119]*, si suppone che:*

- *20% dei ponti risulti in condizioni migliori del previsto e non richieda alcun intervento.*
- *20% dei ponti possa essere riabilitato con un costo pari al 30% del costo di sostituzione.*
- *60% dei ponti necessiti effettivamente di sostituzione.*

Ancora seguendo l'analisi citata, supponendo che il costo di sostituzione di ciascun ponte, senza una valutazione preventiva, sia pari al 100%, possiamo stimare il costo della strategia basata su monitoraggio strutturale (SHM) come segue:

- *Costo della strumentazione e analisi dati: 3%*
- *Sostituzione dei ponti non salvabili: 60% (100% del costo per il 60% dei ponti)*
- *Riparazione dei ponti riabilitabili: 6% (30% del costo per il 20% dei ponti)*
- *Ponti che non richiedono interventi: 0% (20% dei ponti)*

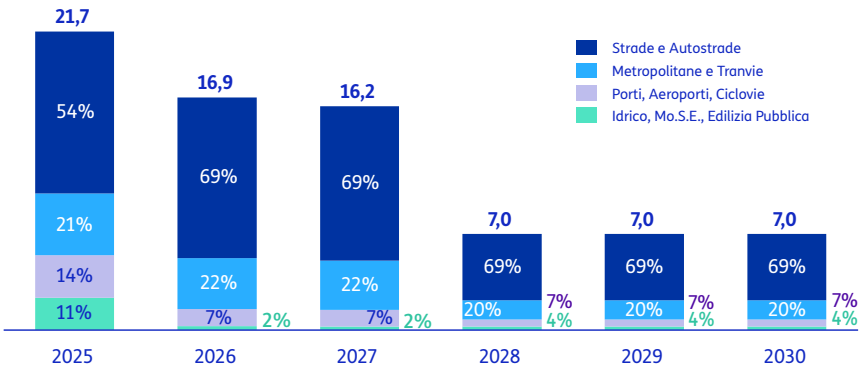
Costo totale con SHM: 69% rispetto al 100% del costo tradizionale.

Risparmio stimato: 31%.

Questo esempio, basato su dati realistici e conservativi, mostra che l'implementazione sistematica di un sistema SHM su tutti i ponti identificati per la sostituzione può comportare una riduzione del 31% degli investimenti complessivi per il proprietario. Questo risultato si ottiene posticipando in modo sicuro solo il 40% delle sostituzioni. Questo vantaggio concreto è interessante per i proprietari, perché consente risparmi immediati[120].

Quindi, se estendiamo questa ipotesi anche alle nuove costruzioni civili, possiamo utilizzare come base di calcolo i dati previsti per le infrastrutture critiche nei prossimi anni. In modo conservativo abbiamo considerato le opere previste a piano con esclusione di quelle ferroviarie, il cui monitoraggio non è approfondito in questo studio.

Applicando il risparmio del 31% sui costi previsti dal 2026 al 2030, otteniamo un risparmio annuo di oltre 16 miliardi di euro nei primi due anni, e di 7 miliardi di euro l'anno negli ultimi tre, per un totale cumulato nel quinquennio di oltre 54 miliardi di euro.



Investimenti previsti in infrastrutture critiche
(Mrd €)

In conclusione, oltre alle motivazioni qualitative che spingono all'adozione dei sistemi di SHM che abbiamo visto nel capitolo precedente, i principali benefici tangibili del monitoraggio strutturale sono

1. Aumento della Vita Utile: Un monitoraggio efficace può estendere la vita di una struttura del 20-30%, ritardando costosissime ricostruzioni.
2. Riduzione dei Costi di Manutenzione: Intervenire su un problema piccolo costa 10-100 volte meno che riparare un danno grande o ricostruire. Si stima un risparmio del 25-40% sui costi del ciclo di vita dell'infrastruttura.
3. Minore Impatto Sociale ed Economico: Evitare la chiusura improvvisa di un viadotto cruciale (come un'autostrada) previene perdite economiche enormi per il sistema paese (blocco della logistica, deviazioni, ritardi).

I benefici economici per le reti elettriche

Quando una rete elettrica è smart?

Serve un upgrade completo che includa:

- Contatori intelligenti di seconda generazione.
- Sensori avanzati per monitoraggio in tempo reale.
- Automazione distribuita su media e bassa tensione.
- Sistemi ADMS per gestione dinamica e predittiva.
- Integrazione di storage e rinnovabili per bilanciare la rete.
- Piattaforme di demand response per modulare i consumi.

Valutare i benefici derivanti dall'implementazione su larga scala delle smart grid in Italia è un esercizio complesso, poiché dipende da variabili interconnesse: il livello di digitalizzazione già raggiunto, la configurazione della rete elettrica, le politiche di incentivazione e il grado di penetrazione delle fonti rinnovabili.

Tuttavia, sulla base di studi internazionali e delle caratteristiche del sistema elettrico italiano, è possibile delineare una stima quantitativa e qualitativa dei vantaggi attesi. Il nostro Paese parte da una posizione di vantaggio rispetto alla media UE grazie alla digitalizzazione avviata con i contatori intelligenti.

I benefici attesi sono quindi incrementali, non "da zero", ma comunque significativi.

Possiamo identificare 4 ambiti di miglioramento:

1. Riduzione delle perdite tecniche

Le perdite tecniche rappresentano l'energia dissipata lungo le linee e nei trasformatori per effetto della resistenza elettrica. Le smart grid consentono di ridurle grazie a:

- Monitoraggio in tempo reale per individuare anomalie e intervenire subito.
- Riconfigurazione dinamica della rete per bilanciare i carichi.

- Controllo ottimale della tensione per minimizzare le perdite Joule.

In Italia nel 2024 il consumo interno lordo di energia è stato pari a 321,6 TWh. Nella relazione annuale di Terna sono riportate le perdite tecniche anno per anno, che sono generalmente fra il 5 e il 6 % nella sequenza temporale analizzata[121].

Nel 2024 le perdite tecniche sono state pari al 6,3% dell'energia consumata[122].

Secondo il Joint Research Centre, le smart grid sono fondamentali per la digitalizzazione del sistema elettrico europeo e per raggiungere gli obiettivi del Green Deal: decarbonizzazione e integrazione delle rinnovabili. Non si limitano a migliorare l'efficienza, ma creano un ecosistema digitale che collega case intelligenti, comunità energetiche e mobilità elettrica. **Tra i benefici concreti, la riduzione delle perdite di rete stimata tra 1% e 3% l'anno**[123].

Per una stima prudente, consideriamo l'1% di riduzione aggiuntiva determinata da un'introduzione massiva di smart grid. Le perdite passerebbero così dal 6,5% al 5,5% l'anno, con una diminuzione, in base ai dati del 2024, di 3,13 TWh/anno. Utilizzando il prezzo unico nazionale (PUN) medio per il 2024 della borsa italiana all'ingrosso di 108,5€ per MWh, **ciò implica un risparmio di ca. 339 Milioni di euro l'anno.**

2. Benefici in termini Peak Load Transfer

Le smart grid abilitano programmi di Demand Response (DR) e tariffe dinamiche, spingendo i consumatori a spostare i consumi dalle ore di picco a fasce meno congestionate. Questo riduce la pressione sulla rete e i costi di generazione.

Nel contesto italiano, **il picco di carico nazionale nel 2024 ha raggiunto 57,5 GW**[124]. Secondo studi e progetti pilota condotti da **RSE** e **Terna**, un programma aggressivo di Demand Response potrebbe ridurre il picco di carico **tra il 5% e il 10%**[125]. Utilizzando una stima conservativa del **5%** e considerando un valore medio di picco di **57,8 GW** (media degli ultimi dieci anni, escluso il 2020), il beneficio in termini di energia non generata si traduce in **2,9 GW**.

Questo valore non rappresenta solo energia risparmiata, ma soprattutto **capacità resa disponibile**, che ha un impatto diretto sul **Mercato della Capacità**. Tale mercato, introdotto per garantire la sicurezza del sistema elettrico, remunera la disponibilità di potenza con valori che oscillano tra **33 e 78 €/kW/anno,** secondo il risultato delle aste[126]. Utilizzando il valore degli ultimi anni, e in particolare il valore di riferimento per le consegne 2027, pari a **47 €/kW/anno**, il beneficio economico stimato è di circa **136 milioni di euro all'anno**[127], che possiamo definire come il valore della capacità.

A questo vantaggio si aggiunge il risparmio sull'energia non prodotta da impianti di picco, caratterizzati da costi molto elevati, superiori a **200 €/MWh**. Considerando un utilizzo medio di 200 ore/anno per tali impianti e il risparmio di energia di 2,9 GW/anno, e valorizzando tale energia con la differenza tra il costo di picco (200 €/MWh) e il PUN all'ingrosso (108,5 €/MWh), si ottiene un ulteriore beneficio di circa **53 milioni di euro all'anno** come risparmio sul differenziale del costo di produzione. Complessivamente, la combinazione di riduzione dei costi di capacità e dei costi di generazione di picco porta a un impatto economico superiore a **188 milioni di euro annui**, senza contare i benefici ambientali derivanti dalla minore produzione da fonti termoelettriche.

A livello di sistema Paese quindi, i benefici complessivi stimati sono di circa 530 milioni di euro anno in termini di riduzione delle perdite tecniche e gestione dei picchi di domanda di energia.

3. Benefici di risparmio energetico

Le smart grid generano vantaggi economici per le famiglie attraverso due meccanismi principali:

1. **Maggiore efficienza energetica**: i contatori intelligenti permettono di monitorare i consumi in tempo reale, ridurre sprechi e adottare comportamenti più virtuosi.

2. **Riduzione dei consumi negli orari di picco**: grazie alle tariffe dinamiche il cliente è incentivato a spostare i consumi dalle ore di picco a fasce meno costose (es. lavatrici, lavastoviglie, ricarica veicoli elettrici). Questo riduce la bolletta e genera un minor carico nelle ore di punta, diminuisce la pressione sulle centrali di picco, che sono le più costose e inquinanti.

Le stime sull'efficienza indotta dai soli contatori intelligenti sono relativamente contenute: **0,5-1,5% del consumo totale per famiglia**[128]. Considerando che i consumi domestici rappresentano circa il **22,5% del totale nazionale**[129], pari a **66 TWh/anno nel 2024**, possiamo ipotizzare un risparmio dell'**1%** sui consumi domestici. Quindi, secondo i dati 2024, pari a 6,59 MWh/anno per l'Italia.

Utilizzando il prezzo medio retail per famiglia nel 2024, pari a **217 €/MWh**[130], il beneficio economico complessivo per il paese è di oltre **143Mil€/anno**

Questo risparmio, seppur apparentemente modesto in termini percentuali, ha un impatto significativo:

- **Riduce la spesa energetica delle famiglie**
- **Contribuisce alla sostenibilità**, poiché ogni kWh risparmiato riduce le emissioni di CO_2.
- **Supporta la stabilità del sistema**, diminuendo la domanda nelle ore critiche.

4. Altri Benefici Non Quantificati (Ma Cruciali)

- **Integrazione delle Fonti Rinnovabili**: sistemi intelligenti svolgono un ruolo fondamentale nell'integrazione delle energie rinnovabili, come solare ed eolico che sono fortemente variabili. In questo modo, è possibile garantire stabilità e continuità del servizio per raggiungere gli obiettivi fissati dal PNIEC (Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima).

- **Affidabilità e Qualità del Servizio (SAIDI/SAIFI)**: l'automazione e l'auto-riconfigurazione della rete riducono durata ed estensione dei guasti permettendo di isolare rapidamente le sezioni danneggiate e ripristinare il servizio in tempi molto più brevi rispetto ai sistemi tradizionali. Questo non solo migliora gli indicatori di qualità (SAIDI e SAIFI), ma evita anche ingenti danni economici (i danni da interruzioni prolungate possono ammontare a decine di milioni di euro annui).

- **Sicurezza e Resilienza**: una rete più intelligente è anche una rete più sicura. La capacità di monitorare e reagire in tempo reale a situazioni critiche (cyberattacchi, eventi climatici estremi) rappresenta un vantaggio strategico per la continuità del servizio e la protezione delle infrastrutture.

- **Nuovi Servizi e Mercati:** l'evoluzione tecnologica della rete favorisce la partecipazione attiva dei cittadini e delle comunità energetiche. Il mercato dei prosumer (consumatori che producono energia), le comunità energetiche e la ricarica intelligente dei veicoli elettrici sono solo alcuni esempi.

La riduzione dei costi delle reti idriche

La gestione delle risorse idriche in Italia rappresenta un tema strategico, regolato principalmente dalla parte terza del Codice dell'Ambiente (D.Lgs. 152/2006), che ha recepito la direttiva quadro europea 2000/60/CE e introdotto il principio dell'uso integrato della risorsa acqua. Tale normativa ha segnato il passaggio da una gestione frammentata a un Servizio Idrico Integrato (SII), organizzato per Ambiti Territoriali Ottimali (ATO), con l'obiettivo di garantire efficienza, economicità e sostenibilità del servizio.

Nonostante i progressi normativi e l'azione di regolazione dell'ARERA, il settore idrico italiano continua a presentare criticità strutturali e gestionali. Tra le principali problematiche emergono:

- Perdite idriche elevate: secondo i dati ARERA, nel 2023 le perdite percentuali hanno raggiunto il 41,8% a livello nazionale, con punte superiori al 55% nel Mezzogiorno, a fronte di una media europea del 25%. Questo fenomeno è aggravato dall'obsolescenza delle reti, di cui il 60% ha oltre trent'anni di vita. Di questa quota, inoltre, il 25% avrebbe superato i 70 anni di vita mentre in diversi centri storici italiani vi sarebbero ancora tubature risalenti al periodo post-unitario[131].

- Carenza di investimenti: sebbene negli ultimi anni si registri un incremento, con valori medi pro capite pari a 70 euro nel 2023 (+113% rispetto al decennio precedente), le gestioni in economia restano ferme a soli 11 euro per abitante, molto lontane dagli standard europei (82 euro). Tale divario è particolarmente marcato nel Sud e nelle Isole, dove si concentra la maggior parte delle gestioni frammentate[132].

- Frammentazione gestionale: nonostante la normativa punti all'unicità della gestione per ATO, persistono oltre 1.300 comuni con gestioni in economia, pari al 12% della popolazione, concentrati per il 95% nel Mezzogiorno[133]. Questa frammentazione ostacola economie di scala e capacità di investimento.

- Elevati consumi e prelievi idrici: l'Italia si conferma al primo posto in Europa per volumi assoluti di acqua prelevata per uso potabile (9,14 miliardi di m^3 nel 2022), pari a 424 litri per abitante al giorno, contro una media europea di 45-90 litri[134]. Tale pressione sulla risorsa, unita alla crescente frequenza di eventi siccitosi, accentua il rischio di stress idrico.

Per affrontare queste criticità, negli ultimi anni sono stati avviati interventi significativi, tra cui le misure del PNRR (Missione 2, Componente 4), che destinano 4,5 miliardi di euro al settore idrico, e il Piano Nazionale di Interventi Infrastrutturali e per la Sicurezza nel Settore Idrico (PNIISSI), con un fabbisogno stimato di 12 miliardi di euro per 418 nuovi interventi. Tuttavia, come evidenziato dalla Corte dei conti e dall'ARERA, il raggiungimento degli obiettivi richiede un rafforzamento della governance e un'accelerazione nell'attuazione dei progetti,

soprattutto nelle aree meridionali, per ridurre il cosiddetto *water service divide*[135].

Il ruolo del Water Monitoring nella gestione idrica

Il monitoraggio delle risorse idriche (water monitoring) costituisce un elemento strategico per l'efficientamento del Servizio Idrico Integrato (SII), come previsto dal Codice dell'Ambiente (D.Lgs. 152/2006) e dalla Direttiva 2000/60/CE, che sanciscono il principio dell'uso sostenibile e integrato della risorsa acqua. Tale attività è inoltre coerente con gli obiettivi di qualità tecnica definiti dall'ARERA (Delibera 917/2017/R/IDR), che include indicatori specifici per la riduzione delle perdite e il miglioramento della continuità del servizio.

Abbiamo cercato qui di quantificare alcuni dei principali vantaggi legati all'adozione del monitoraggio intelligente nelle reti idriche.

Riduzione delle perdite idriche

Il monitoraggio in tempo reale delle reti idriche consente di individuare anomalie e dispersioni, riducendo sprechi e costi di manutenzione. Studi indicano una riduzione complessiva delle perdite fino al 4%, se la rete è distrettualizzata per interventi rapidi[136].

Secondo analisi sul campo, L'adozione di contatori smart da parte dei clienti consente una riduzione drastica delle perdite idriche post-contatore grazie alla capacità di questi dispositivi di fornire dati ad alta risoluzione sul consumo domestico. A differenza dei contatori tradizionali, i sistemi smart registrano e trasmettono i volumi d'acqua a intervalli molto brevi (da 1 a 10 secondi), permettendo di individuare pattern anomali come flussi continui durante le ore notturne, tipici delle perdite interne[137].

Lo studio condotto in Australia ha dimostrato che, attraverso l'installazione di contatori intelligenti e l'invio di informazioni mirate agli utenti, è stato possibile ridurre il Minimum Night Flow (MNF) – indicatore chiave per rilevare perdite – di circa 89%, valore che corrisponde alla quasi totale eliminazione delle perdite domestiche. Questo risultato è stato ottenuto grazie a due fattori:

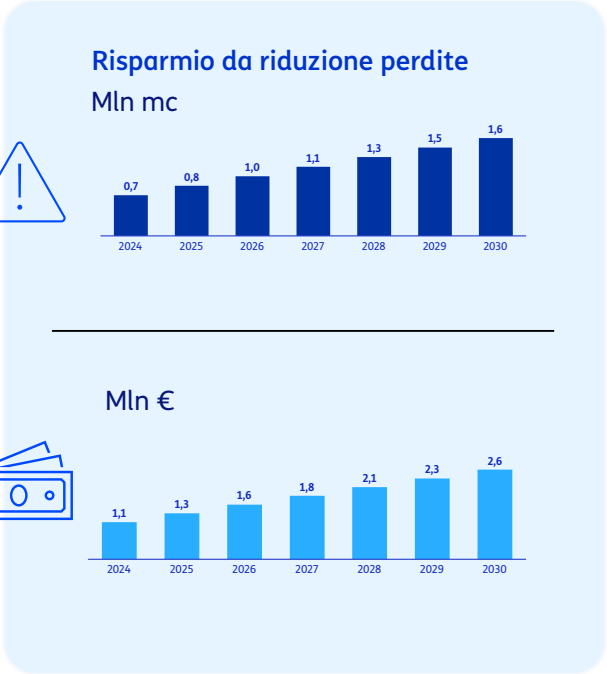
- Identificazione rapida delle perdite: i dati granulari consentono di distinguere tra consumi normali e flussi anomali, anche di piccola entità (es. gocciolamenti da rubinetti o scarichi difettosi).

- Intervento immediato dell'utente: la comunicazione personalizzata e la consapevolezza generata dal monitoraggio spingono i clienti a riparare le perdite in tempi brevi.

Secondo gli autori, la combinazione di tecnologia e comportamento proattivo è la chiave per ottenere riduzioni così elevate, con benefici sia economici sia ambientali. Inoltre, il paper sottolinea che le perdite post-contatore possono rappresentare fino al 10% del consumo totale in ambito residenziale; quindi, il loro contenimento ha un impatto significativo sulla domanda complessiva di acqua[138].

Uno studio ha evidenziato che il tempo di scoperta della perdita passa dai 90 gg medi nel caso di rete tradizionale a circa 7 gg[139] nel caso di rete dotata di contatori smart e sensori. In Italia sono presenti 21 milioni di contatori, di cui il 17% (3,5 milioni), al 2023 erano smart meter[140]. Nel PNRR sono stati stanziati ca. 900 milioni di euro per gli investimenti in progetti di riduzione delle perdite nelle reti di distribuzione dell'acqua e relativi interventi di digitalizzazione e di monitoraggio delle infrastrutture[141]. Da agosto 2022 a settembre 2023 sono state effettuate 29 gare per l'assegnazione di 2,7 milioni di contatori acqua, per un valore totale di contratti assegnati di circa 250 milioni di euro[142], escluso il valore delle installazioni e dei servizi accessori.

Abbiamo dunque elaborato una ipotesi di sostituzione di 1 milione di contatori l'anno, considerando solo i meter degli utenti e non quelli installati su condutture di rete. L'ipotesi rispecchia quanto previsto dalle gare, e tale dimensione di sostituzione è stata effettivamente realizzata da operatori del sistema idrico nel Regno Unito[143]. Se consideriamo una tariffa media per mc di acqua pari a 1,16€[144] (solo la materia prima acqua), questo consentirebbe un risparmio di 2,6 Mrd€ nell'anno 2030 in Italia, per circa 10,4 miliardi di euro cumulati nell'arco temporale 2026-2030.



Ottimizzazione dei consumi e gestione della domanda

L'analisi dei dati di consumo consente politiche di risparmio e tariffe basate su consumi reali, in linea con il principio del full cost recovery (art. 154 Codice dell'Ambiente). Sul campo, una maggiore trasparenza sui consumi ha generato riduzioni della domanda idrica tra 10% e 18%[145].

Prendendo a riferimento un caso effettivamente verificato sul campo nel Regno Unito[146], e

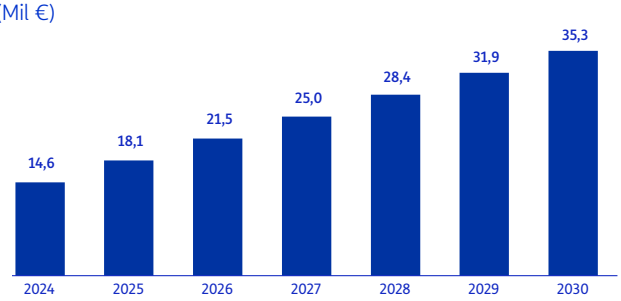
mantenendo la stessa progressione di contatori utilizzata in precedenza di 1 milione di contatori l'anno[147], la riduzione del consumo per utente combinata con il maggior numero di smart meter, considerando inoltre il costo dell'acqua, questa volta completo[148], pari a 1,95€/mc medio, risulta un risparmio cumulato al 2030 di quasi 1,4 miliardi di mc di acqua per un valore di circa 2,7 Mrd€.

Riduzione dei costi di lettura

L'adozione dei contatori smart rivoluziona la gestione del servizio idrico, riducendo drasticamente i costi operativi legati alla lettura dei consumi. Nei sistemi tradizionali, un operatore legge circa 300 contatori in 8 ore; con gli smart meter, la stessa risorsa può gestire fino a 20.000 dispositivi grazie alla trasmissione automatica dei dati e alla lettura da remoto[149] con un risparmio di costi. Secondo progetti Sensus con operatori statunitensi, il costo per singola lettura cala di 0,80 € rispetto ai sistemi meccanici[150]. Considerando una media di 4 letture annue per le utenze con consumi inferiori o pari a 3.000 m³/anno – che rappresentano circa il 95% del totale – e 6 letture annue per le utenze con consumi maggiori[151], il risparmio cumulato stimato al 2030 raggiunge circa 175 milioni di euro. Oltre al beneficio economico, la digitalizzazione elimina errori manuali, accelera la disponibilità dei dati e favorisce politiche di gestione più efficienti e sostenibili, liberando risorse per investimenti in infrastrutture e innovazione.

Risparmio da facilità di lettura degli smart meter

(Mil €)

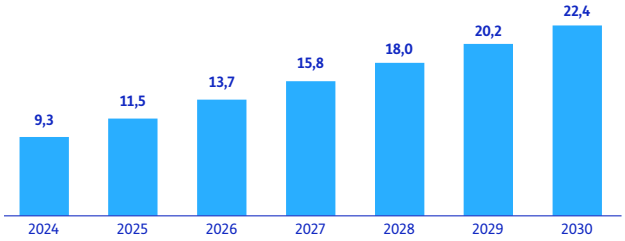


Riduzione di riparazione delle perdite

Intervenire tempestivamente sulle perdite riduce tempi e costi, evitando danni maggiori. Oggi le riparazioni pesano per circa 16% sui costi operativi del servizio idrico (95 € per abitante/anno)[152]. Inoltre, la gestione tradizionale delle reti, basata su interventi reattivi, comporta mobilitazione di squadre, costi di manodopera e materiali, oltre a disagi per gli utenti.

Risparmio da riduzione costi di riparazione perdite

(Mil €)



Con tecnologie intelligenti e contatori smart, si passa a un approccio predittivo che permette la rilevazione immediata delle anomalie, la segnalazione automatica ed interventi mirati. Il risparmio stimato è fino al 5% di questa componente. In termini economici, il beneficio è rilevante: considerando il peso delle riparazioni sul totale degli Opex, il risparmio cumulato al 2030 può raggiungere decine di milioni di euro, liberando risorse per investimenti infrastrutturali e innovazione[153]. In Italia il 93,2% della popolazione è servita dal servizio idrico. Considerando quindi gli abitanti coinvolti dalla progressiva sostituzione dei contatori con versioni smart, e i costi dovuti a riparazione ridotti, i risparmi ammonterebbero a oltre 110 Mil€ cumulati al 2030.

La riduzione delle perdite comporta un duplice vantaggio: da un lato, minori costi diretti di riparazione; dall'altro, minori sprechi di acqua trattata, energia per il pompaggio e sostanze chimiche per la potabilizzazione, con un impatto positivo anche sulla sostenibilità ambientale.

CAPITOLO 8: I benefici per l'ambiente

Infrastrutture civili smart: ponti e strade più verdi

Il monitoraggio intelligente delle infrastrutture civili contribuisce alla decarbonizzazione in diversi modi, grazie all'uso di tecnologie digitali come sensori IoT, intelligenza artificiale e analisi dei big data.

Il monitoraggio continuo permette di individuare tempestivamente problemi strutturali, favorendo interventi preventivi e riducendo così la necessità di lavori urgenti ad alto impatto ambientale.

Secondo il Position Paper AIS, la digitalizzazione può abbattere fino al 30% delle emissioni di CO_2 durante il ciclo di vita delle infrastrutture, grazie alla gestione proattiva e alla riduzione degli sprechi[154]: sensori e piattaforme di analisi monitorano vibrazioni, carichi ed energia. Questi dati, elaborati con algoritmi di AI, consentono di ottimizzare l'uso di energia e materiali, riducendo il consumo complessivo e quindi le emissioni. L'utilizzo in particolare di sensori wireless nelle infrastrutture critiche, specie quelle esistenti, migliora la gestione e favorisce la decarbonizzazione.

Simulazione di impatto

Per valutare l'impatto ambientale della manutenzione intelligente, sono state considerate le necessità di supervisione delle infrastrutture critiche prive di monitoraggio.

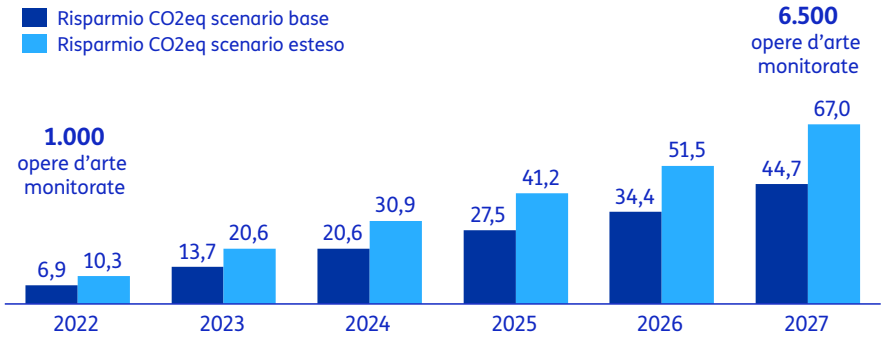
Nel 2022 ANAS ha avviato il modello di monitoraggio SHM (Structural Health Monitoring) grazie a 275 milioni di euro del Fondo Complementare PNRR, per il monitoraggio dinamico e controllo da remoto di 1.000 ponti e viadotti entro il 2026[155]. Con i nuovi investimenti del PNRR pari a 100 Mil/anno per il 2023, 2024, 2025 e 75 Mil per il 2026, è previsto l'estensione del sistema a oltre 12.000 opere, di cui ulteriori 5.500 opere critiche con sensori di monitoraggio a distanza[156].

La supervisione tradizionale con 30.708 ispezioni visive ha richiesto agli ispettori ANAS nel 2023 la percorrenza di 1.944.750 Km (considerando una percorrenza di 50-100 km a ispezione, inclusi spostamenti tra opere e accessi). La crescente attenzione verso un patrimonio infrastrutturale sempre più anziano ha portato a prevedere 47.956 ispezioni nel 2024 (dato l'aumento della frequenza ispettiva delle opere in CdA Alta e Medio/Alta da 1 anno a 6 mesi), con un aumento circa del 55% rispetto all'anno precedente[157]. Nonostante la flotta ANAS sia soggetta a rinnovamento, con la sostituzione di auto con motore termico con nuove auto elettriche, l'impatto ambientale degli

spostamenti per ispezione a livello del paese resta alto, vista l'impronta energetica della produzione elettrica.

Applichiamo la riduzione di ispezione visive dovuta all'introduzione di sistemi di monitoraggio nello scenario base (20%) e nello scenario esteso (30%) ai chilometri percorsi ogni anno per le ispezioni visive, calcolando il risparmio con un'ipotesi di introduzione di 1000 opere monitorate l'anno (1500 nel 2027) per arrivare a 6.500 opere critiche monitorate a fine 2027 come previsto dal MIT. Prendendo a riferimento il valore di 135,6 g di CO_2eq/km riportato dall'ISPRA per i veicoli passeggeri a motore termico benzina Hybrid[158] (una scelta prudenziale non conoscendo la composizione del parco auto fra veicoli passeggeri e veicoli commerciali leggeri, che sono in buona parte con motorizzazione diesel e hanno un impatto inquinante in termini di g di CO_2eq/km molto più elevato), la diminuzione dei chilometri percorsi annualmente dovuta all'introduzione delle nuove tecnologie consentirebbe solo per le prime 1000 opere di diminuire le emissioni fra 9 e le 14 ktCO_2eq in meno/anno . A regime (6500 opere nel 2027) i risparmi di CO_2 equivalente emessa si attesteranno fra 45 e 67 ktCO_2eq in meno/anno[159].

Investimenti previsti in infrastrutture critiche (Mrd €)



Naturalmente la progettazione delle infrastrutture effettuata con l'ausilio di strumenti come il Building Information Modeling (BIM) e i digital twin permette di simulare scenari e valutare l'impatto ambientale delle scelte progettuali, ottimizzando il ciclo di vita dell'opera. Questo approccio riduce il "carbon footprint" complessivo, integrando dati su materiali, processi e consumo energetico.

Impatto climatico del monitoraggio elettrico

Per le infrastrutture elettriche, il monitoraggio intelligente è una leva strategica che accelera la transizione verso infrastrutture a basse emissioni, perché riduce sprechi, ottimizza risorse, abilita l'integrazione delle rinnovabili e favorisce la manutenzione predittiva. In altre parole, digitalizzare significa rendere le infrastrutture più resilienti e accelera il percorso verso la decarbonizzazione in linea con gli obiettivi del Green Deal europeo e della roadmap al 2050[160].

Le reti tradizionali, progettate per flussi energetici centralizzati, non sono adeguate ad un contesto dominato da fonti rinnovabili intermittenti, elettrificazione dei consumi e crescita dei prosumer che richiede smart grid dinamiche e adattive, capaci di reagire in tempo reale alla domanda e all'offerta di energia, migliorando resilienza ed efficienza. Inoltre, l'integrazione di sensori e sistemi IoT consente di raccogliere dati sullo stato delle linee, sui carichi e sulle condizioni ambientali, riducendo il rischio di guasti e ottimizzando la manutenzione. Questo riduce gli interventi emergenziali che generano emissioni più elevate. In sintesi, l'uso combinato di AI e IoT nelle smart grid, oltre a favorire una gestione ottimizzata, sicura ed efficiente determina una riduzione delle emissioni di CO_2: l'analisi predittiva dei dati anticipa i picchi di consumo e attiva l'uso delle fonti rinnovabili, evitando il ricorso a fonti fossili[161].

Simulazione di impatto

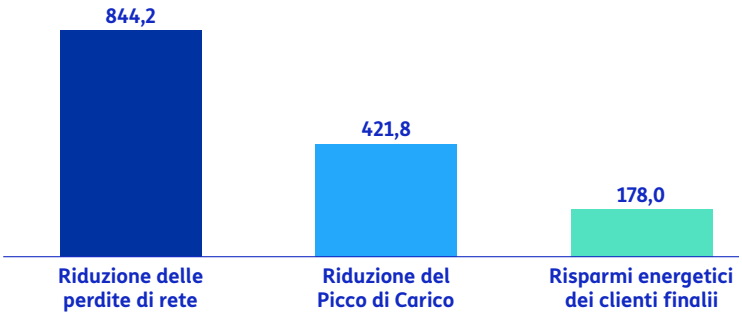
L'impatto climatico del monitoraggio intelligente dipende dal fattore di emissione del mix elettrico italiano, che indica quanta CO_2eq si produce per kWh. Questo valore varia nel tempo e cambia anche in funzione delle fonti energetiche utilizzate (rinnovabili, gas, carbone). Secondo Terna e ISPRA, l'intensità carbonica media del mix elettrico italiano si è ridotta più o meno progressivamente dal 2015 dai 406 gCO_2/kWh del 2015 ai 270g CO_2eq/kWh del 2024[162], grazie alle rinnovabili. Per le stime assumiamo il valore di 270 g CO_2eq/kWh.

Riprendendo i risparmi energetici già stimati per i benefici economici, valutiamo la riduzione di CO_2eq:

- *Riduzione delle perdite di rete: 3,13 TWh/anno risparmiati, che moltiplicato per fattore di emissione del mix elettrico italiano si traduce in un risparmio pari a 844,1K t di CO_2eq/anno.*
- *Riduzione del Picco di Carico: Il picco viene tipicamente coperto da impianti a olio combustibile o carbone, che hanno un'intensità carbonica molto più alta del mix medio. Secondo l'EPA[163] le turbine a gas olio combustibile usate emettono ca. 730 g CO_2eq/kWh. Quindi, i 577.778 MWh di*

energia di picco evitata equivarrebbero a ca. 422K t di CO_2eq/anno.

- *Risparmi Energetici degli Utenti Finali: risparmio di 0,66 TWh/anno, che si traduce, tramite il fattore di emissione del mix elettrico italiano, in un risparmio di 178K t di CO_2eq/anno*



Risparmi stimati di emissioni di gas serra da azioni sulla rete elettrica

(ktCO2eq/anno)

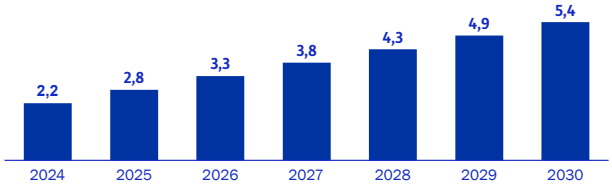
I vantaggi ambientali dello smart metering e monitoring delle reti idriche

Anche per le infrastrutture idriche, applichiamo lo stesso approccio ripartendo dallo schema dallo schema utilizzato per valutazione degli effetti economici.

Nel Regno Unito, diversi use case mostrano che gli smart meter installati presso gli utenti finali riducono le emissioni di CO_2eq dello 0,5%. È stato stimato che ogni abitazione genera 2,67 kgCO_2eq al giorno, per un consumo medio di 138 litri di acqua[164]. . Scalando questa stima alla realtà italiana, dove il consumo procapite giornaliero di acqua fatturata si attesta a 215 litri di acqua al giorno (fonte: ISTAT)[165], stimiamo quindi che ciascuna abitazione produca 4,16 kgCO_2eq al giorno.

L'installazione di 1 milione di smart meter all'anno per il monitoraggio dell'acqua potrebbe quindi generare un impatto significativo: i risparmi di consumo calcolati portano a una riduzione di 2,23 MtCO_2eq nel 2024, fino a 5,39 MtCO_2eq nel 2030. Secondo le previsioni ISPRA ciò corrisponde allo 0,6% delle emisisoni totali di gas serra in Italia del 2024[166] (escluso LULUCF)[167], con un peso crescente negli anni successivi che arriva al 1,58% nel 2030, nonostante la prevista decrescita delle emissioni.

Riduzione di Emissioni di Gas Serra (MtCO_2eq)



Oltre alla riduzione dei consumi, i benefici derivano anche da vantaggi operativi e ambientali, tra cui:

- Riduzione delle perdite idriche, con minore consumo di energia per pompaggio e trattamento.
- Ottimizzazione della pressione, che riduce sprechi energetici e aumenta l'efficienza del sistema.
- Rilevamento precoce di contaminanti, evitando processi di depurazione emergenziali ad alta intensità energetica.

A questi si aggiungono ulteriori risparmi energetici legati all'efficientamento di impianti strategici:

- Dissalatori, con una riduzione stimata di circa 1 GWh al giorno.
- Impianti di trattamento dei fanghi di fognatura e depurazione, con potenziali riduzioni dei consumi fino al 30%[168].

Riduzione del consumo di acqua in bottiglia

I sensori utilizzati nel monitoraggio intelligente idrico controllino anche la qualità dell'acqua che passa negli acquedotti in modo costante e puntuale. L'adozione del monitoraggio intelligente può migliorare la fiducia nell'acqua di rubinetto, oggi bassa: secondo un sondaggio effettuato da Ambrosetti[169], solo 1 italiano su 3 ha fiducia nell'acqua erogata dagli acquedotti e per questo L'Italia è il primo consumatore europeo di acqua in bottiglia (249 l/ab/anno, di cui il 72% acqua naturale[170]), con impatti ambientali enormi: 10 miliardi di litri in PET, 7 miliardi di bottiglie non riciclate[171], 850 kt CO_2eq/anno.

Simulazione di impatto

L'ARERA calcola un indicatore utile per valutare l'efficienza del SII (Sistema Idrico Integrato) e, in particolare, della rete idrica: il numero di ore di interruzione del servizio di acquedotto. Tale indicatore (denominato M2) presenta valori contenuti (inferiori alle 20 ore) in quasi tutte le regioni e una media nazionale che si attesta, nel 2023, sul valore di 59 ore[172]. Poiché i valori dell'indicatore M2 presentano una variabilità molto elevata, appare forse più opportuno, per avere un'indicazione sull'efficienza del servizio di acquedotto, utilizzare la percentuale di famiglie che lamentano irregolarità nell'erogazione di acqua. Anche in questo caso, le percentuali maggiori (che l'ISTAT calcola con riferimento all'anno 2024) si registrano nel Mezzogiorno dove la percentuale è pari al 14,7% nelle regioni del Sud e cresce fino al 26,3% nelle Isole, contro un valore medio nazionale dell'8,7%. Interessante notare come la percentuale, rilevata dall'ISTAT, di famiglie che non si fidano a bere l'acqua dal rubinetto presenti un indice di correlazione elevato (70%) con la percentuale di famiglie che lamentano irregolarità nell'erogazione dell'acqua[173].

Quindi la fiducia degli utenti della rete idrica è derivata da fattori complessi, ma che possono essere comunque gestiti attraverso il monitoraggio intelligente.

Anche senza considerare gli impatti del trasporto delle bottiglie di acqua minerale in bottiglia sulle emissioni di gas serra, osserviamo che ben 10 miliardi di litri d'acqua consumati ogni anno sono contenuti in PET[174].

Considerando che:

- *7 mrd di bottiglie monouso in PET non vengono riciclate;*
- *Lo scarto di riciclo del PET è pari al 32% del prodotto iniziale, e solo il 5% è destinato alla produzione di nuove bottiglie,*

ogni anno vengono impiegate 850k tonn CO_2eq per fare 278k tonn di PET che non viene riciclato.

Con l'adozione degli smart meter e il rilascio di informazioni puntuali sulla qualità dell'acqua erogata alle famiglie, il ricorso all'acqua in bottiglia potrebbe ridursi, dal momento che la qualità dell'acqua erogata dagli acquedotti preoccupa il 27,9% degli Italiani che bevono acqua minerale[175] e il 28,8% delle famiglie italiane, che non si fida a bere acqua del rubinetto[176].

Conclusioni

Un ultimo elemento di riflessione sui vantaggi del monitoraggio infrastrutturale nasce dai suoi effetti sul Prodotto Interno Lordo. Molto è stato scritto sull'effetto moltiplicatore degli investimenti in infrastrutture sia sul PIL, sia sui posti di lavoro. Secondo un'analisi condotta nel 2018 da Oxera per ICE (-Agenzia per la promozione all'estero e l'internazionalizzazione delle imprese italiane)[177] il fattore moltiplicatore delle infrastrutture si attesta, secondo il tipo di investimento, fra il 1,5 e il 2,7 del valore dell'investimento.

Un'analisi simile è stata ripresa da WIOD/McKinsey Global Institute[178], che pone il moltiplicatore del PIL per le costruzioni allo 0,81 del costo nel breve periodo e al 11,95 per la creazione di posti di lavoro per ogni dollaro investito. Stessi valori sono ripresi da Banca d'Italia[179], secondo la quale il moltiplicatore passa a 1,5 nel medio periodo (2-5 anni).

In quest'ottica, dal momento che il monitoraggio infrastrutturale introduce risparmi economici una volta applicato, e quindi riduzione dei costi di gestione delle infrastrutture, potremmo dire che l'effetto sul sistema paese è di ridurre l'impatto degli investimenti infrastrutturali sul PIL.

Se le risorse liberate venissero investite in manutenzione invece che in nuove opere, l'impatto economico sul PIL sarebbe molto simile, perché il moltiplicatore della manutenzione è praticamente allineato a quello degli investimenti infrastrutturali.

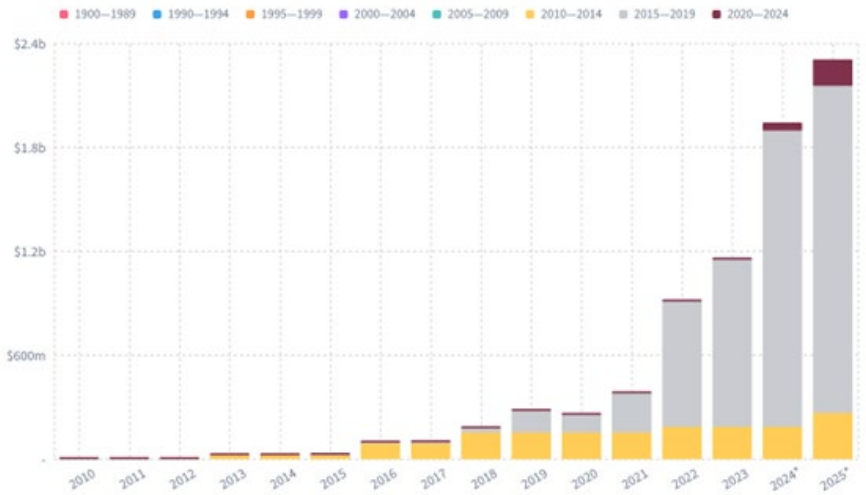
Tuttavia gli investimenti in manutenzione, che normalmente mirano a compensare il naturale deterioramento delle infrastrutture, possono anche diventare un potente strumento anticiclico perché di solito riguardano progetti più piccoli, brevi e meno complessi, i cui tempi di realizzazione più ridotti consentono un'attivazione rapida dei fattori produttivi privati, incluso il lavoro[180]. La velocità di realizzazione è anche legata a iter autorizzativi più brevi rispetto a quelli richiesti per le nuove opere, che per la loro realizzazione possono interrompere la fruibilità delle opere esistenti e generare quindi esternalità negative.

Nel caso della manutenzione intelligente, abbiamo visto come ciò porti vantaggi di medio e lungo periodo sullo stato delle infrastrutture stesse, sulla loro funzionalità, sulla sicurezza e sull'impatto ambientale. Inoltre, l'impatto dei risparmi ottenibili a livello sistemico è tale da non esaurirsi con gli investimenti in monitoraggio intelligente, ma produce effetti nel medio e nel lungo periodo, inducendo così un circolo virtuoso che a tendere produce effetti positivi sia per l'economia del paese, le sue dotazioni infrastrutturali, e l'ambiente.

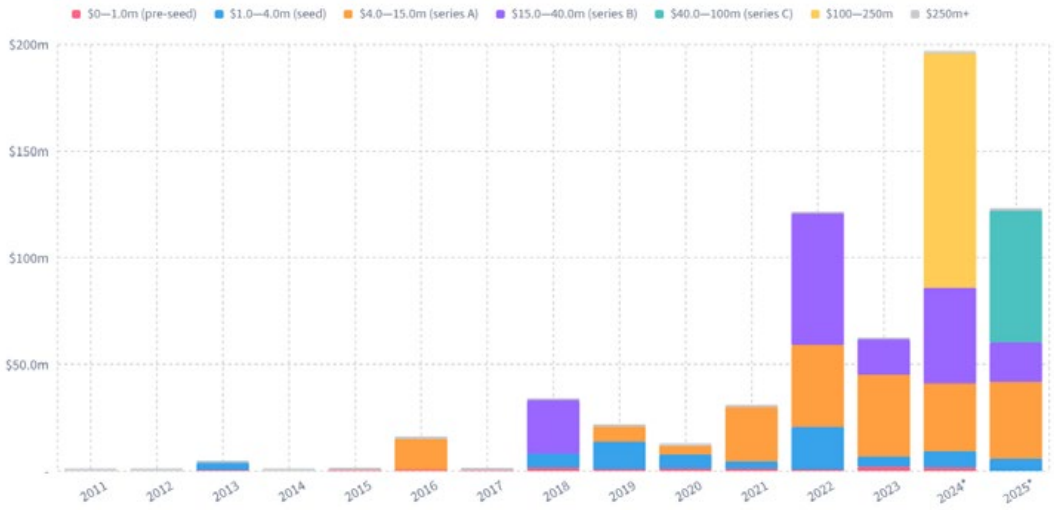
La Smart Infrastructure Challenge di TIM

L'iniziativa TIM Smart Infrastructure Challenge ha suscitato un notevole interesse, con 106 aziende candidate, di cui 70 italiane e 36 internazionali. Le proposte si sono concentrate principalmente su due ambiti: il monitoraggio delle infrastrutture complesse e idriche (74 candidature) e i sistemi di Building and Energy Management (BEMS) (32 candidature). A livello europeo, la partecipazione è stata significativa, con realtà provenienti da Regno Unito, Germania, Spagna, Francia e Belgio, oltre a presenze da Stati Uniti, Brasile e Ucraina.

Il focus sulle startup italiane ed europee nel settore smart infrastructure, secondo i dati Dealroom[181], evidenzia un ecosistema in forte crescita: oltre 60 aziende con un valore complessivo di 2,3 miliardi di dollari, fondate principalmente tra il 2015 e il 2019.



Il trend di finanziamento ha registrato un'accelerazione a partire dal 2022, come si può vedere nel grafico seguente.



Nel solo 2025 sono stati già raccolti, fino a fine agosto, oltre 122 milioni di dollari attraverso dieci round di investimento, di seguito le 10 aziende che hanno ricevuto i maggiori finanziamenti.

Nome	Investitori	Mercato	Sede	Round Valuation	Ultimo Round	Data
Aerones	Change Ventures S2G Ventures Activate Capital Lightrock Blume Equityt	B2B Energy robotics clean energy	Riga, Latvia	$248m - $372m	$62.0m LATE VC	Jun 2025
Optics11	SET Ventures Join Capital FORWARD.one Venture Capital	B2B semiconductors engineering and manufacturing equipment	Amsterdam, Netherlands	€68.0m-€102m	€17.0m EARLY VC	May 2025
Voliro	Cherry Ventures noa	B2B robotics	Zurich, Switzerland	$44.0m-$66.0m	$11.0m SERIES A	Jun 2025
CSignum	Scottish Enterprise Growth Investments Par Equity Archangels Raptor Group British Business Investments	B2B Telecom energy	Bathgate, United Kingdom	£24.0m-£36.0m	£6.0m SERIES A	Apr 2025
Wsense	Axon Partners Group CDP Venture Capital Fincantieri Blue Ocean Partners RunwayFBU	B2B Telecom semiconductors	Rome, Italy	€45m	€7.2m EARLY VC	Apr 2025
Next Generation Robotics	CDP Venture Capital Simest Pariter Partners AVM Gestioni Kilometro Rosso	B2B robotics	San Giuliano Terme, Italy	€18.0m-€27.0m	€4.5m SERIES A	Apr 2025
RTDT Laboratories	Rockstrat Swisscom Ventures BackBone Ventures Kickfund	B2B Energy Clean energy	Zurich, Switzerland	$16.0m - $24.0m	$4.0m SEED	Jul 2025
DriveSec	LIFTT Levante capital	B2B Security engineering and manufacturing equipment device security & antivirus	Turin, Italy	€12.0m - €18.0m	€3.0m EARLY VC	Feb 2025
Displaid	CDP Venture Capital Club degli Investitori Plug and Play ELIS- Centro Imprenditoria e innovazione Growth Capital	real estate construction	Milan, Italy	€4.8m - €7.2m	€1.2m SEED	Jul 2025

Le aree di innovazione sono molteplici e spaziano dal monitoraggio IoT e sensoristica per ponti, strade e ferrovie, alla robotica per ispezioni, fino alle soluzioni di digital twin e mappatura. Particolarmente rilevanti sono i segmenti legati alla cybersecurity IoT (32 milioni di dollari), ai droni per ispezione e monitoraggio (188 milioni) e alle infrastrutture per droni (139 milioni). Non mancano soluzioni per la decarbonizzazione, la gestione della manutenzione e il monitoraggio delle reti elettriche, con investimenti significativi in software e piattaforme digitali.

Questo scenario conferma come la digitalizzazione delle infrastrutture sia un pilastro strategico per la transizione verso modelli più sostenibili, sicuri ed efficienti. L'integrazione di tecnologie avanzate – dall'IoT all'intelligenza artificiale – non solo migliora la resilienza delle infrastrutture, ma apre nuove opportunità di business e collaborazione tra operatori, startup e investitori.

Qui accanto, la mappa delle Startup in Europa.

Aree	Finanziamento combinato $	Imprese
Infrastructure monitoring - IoT and sensors for bridges, roads and trains	7.6M	2
Infrastructure monitoring - robotics monitoring for bridges, roads and trains	4.5M	1
Pipeline inspection	6.3M	4
Digital twins and mapping for infrastructure	7.4M	6
Underwater monitoring and communication	60M	7
IoT cybersecurity	32M	7
Drones and aerial vehicles for infrastructure inspection and monitoring	188M	14
Logistic drones for infrastructure	1.3M	2
Infrastructures for drones	139M	5
Maintenance management software	59M	4
Infrastructure monitoring - IoT & Sensors for other infrastructure	14M	2
Decarbonization planning software	15M	4
Grid: infrastructure monitoring and management	47M	3

Note

1 https://www.istat.it/it/files/2011/03/UAN0146354InformazioniN7_Infrastrutture_in_Italia.pdf

2 D. Biehl, The Role of Infrastructure in Regional Development, 1991

3 D. Biehl, The Role of Infrastructure in Regional Development, 1991

4 D. Biehl, The Role of Infrastructure in Regional Development, 1991

5 https://www.ansfisa.gov.it/-/sistemi-di-gestione-della-sicurezza-delle-infrastrutture-stradaligestite-da-enti-locali-lavori-in-corso

6 https://www.ingenio-web.it/articoli/840-000-km-di-strade-2-179-gallerie-21-072-ponti-eviadotti-che-conoscenza-abbiamo-del-livello-di-sicurezza/

7 https://www.ansfisa.gov.it/-/sistemi-di-gestione-della-sicurezza-delle-infrastrutture-stradaligestite-da-enti-locali-lavori-in-corso

8 https://provinceditalia.it/wp-content/uploads/2019/08/Dossier-Province-monitoraggio-ponti-2-.pdf

9 https://www.stradeanas.it/it

10 https://www.ingenio-web.it/articoli/840-000-km-di-strade-2-179-gallerie-21-072-ponti-eviadotti-che-conoscenza-abbiamo-del-livello-di-sicurezza/

11 https://www.ingenio-web.it/articoli/840-000-km-di-strade-2-179-gallerie-21-072-ponti-eviadotti-che-conoscenza-abbiamo-del-livello-di-sicurezza/

12 https://www.ansfisa.gov.it/-/sistemi-di-gestione-della-sicurezza-delle-infrastrutture-stradaligestite-da-enti-locali-lavori-in-corso

13 Menghini, A.; Bozo, E.; Castiglioni, C. A., POLIMI, Applicazione delle recenti Linee Guida al caso studio di un ponte metallico a doppio impalcato stradale e ferroviario, Costruzioni Metalliche, Nov/Dic 2021

14 Portale ANSFISA: https://www.ansfisa.gov.it

15 https://www.ingenio-web.it/articoli/840-000-km-di-strade-2-179-gallerie-21-072-ponti-eviadotti-che-conoscenza-abbiamo-del-livello-di-sicurezza/

16 https://www.ansfisa.gov.it/-/sistemi-di-gestione-della-sicurezza-delle-infrastrutture-stradaligestite-da-enti-locali-lavori-in-corso/

17 Portale AINOP: https://ainop.mit.gov.it/portale/#/

18 https://ainop.mit.gov.it/portale/#/

19 Le linee guida sono state emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2020) e adottate dal MIMS con Decreto ministeriale 1 luglio 2022 – Adozione delle “Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti”. Gazzetta Ufficiale n.196 del 23 agosto 2022.

20 Queste Linee Guida, analoghe a quelle già predisposte per i ponti, derivano dal comma 1 dell’articolo 49 del DL 16

luglio 2020, n. 76, convertito con modifiche dalla legge 11 settembre 2020, n. 120, che stabilisce: Per garantire uniformità nella classificazione e gestione del rischio, nella valutazione della sicurezza e nel monitoraggio delle gallerie esistenti lungo la rete stradale e autostradale, con decreto del Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti, sentito il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, da adottare entro trenta giorni dall'entrata in vigore del presente decreto, sono approvate specifiche linee guida per la programmazione e l'esecuzione delle indagini sullo stato di conservazione delle gallerie esistenti lungo le strade statali o autostrade gestite da Anas S.p.A. o da concessionari autostradali, per le ispezioni e per la pianificazione degli interventi di manutenzione e messa in sicurezza https://cslp.mit.gov.it/sites/default/files/ALL%20DM%20247%20Allegato_1_-_LL_GG_gallerie_con_allegati_A-B-C1-C2-D.pdf

21 DLgs 15 marzo 2011, n. 35 per la sicurezza stradale e DLgs 5 ottobre 2006, n. 264 e successive modifiche per la sicurezza antincendio nelle gallerie della rete transeuropea

22 Inaudi D., Cost-Benefits Analysis in SHM Projects, SHMII-5 Conference, 2011

23 Li H.N. et al., State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2016

24 Dalmasso M., Civera M., De Biagi V., Chiaia B., Grandi infrastrutture: le sfide tecniche dei sistemi per il monitoraggio strutturale di ponti e gallerie, Ingenio, 2023

25 https://biblus.acca.it/monitoraggio-infrastrutture/

26 Vanderzee P., A better way to fix our national bridge problem, Lifespan Technologies, 2008

27 He Z. et al., Integrated structural health monitoring in bridge engineering, Automation in Construction, 2022.

28 Kullaa J., Eliminating Environmental or Operational Influences in Structural Health Monitoring using Missing Data Analysis, 2008

29 Un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) è una piattaforma di supervisione e controllo che consente di monitorare e gestire in tempo reale reti e impianti complessi, come quelli elettrici. È composto da sensori e dispositivi di campo che raccolgono dati, unità di controllo locali (RTU o PLC) e un centro di supervisione che elabora le informazioni e invia comandi. In una Smart Grid SCADA è il sistema di controllo operativo, mentre EMS è il sistema di ottimizzazione strategica.

30 ARERA. (2025). Progetti pilota e regolazione smart grid.

31 https://etmgroup.it/news/nuove_normative_arera_obbligo_di_cci_per_impianti_oltre_i_100_kw

32 CEI. (2023). Norma CEI 0-16: Regola tecnica di riferimento per la connessione alle reti AT e MT. https://static.ceinorme.it/strumenti-online/doc/20402.pdf

33 Dipartimento per la Trasformazione Digitale. (2023). Attuazione misure PNRR – Italia Digitale 2026.

34 Commissione Europea. (2023). Grids, the Missing Link – EU Action Plan for the Grids. https://www.e-distribuzione.it/archivio-news/2023/12/eu-action-plan-for-the-grids--la-chiave-del-futuro-e-la-digitali.html

35 Rinnovabili.it. (2023). Sviluppo delle reti elettriche: il Piano d'Azione UE. https://www.rinnovabili.it/energia/infrastrutture/sviluppo-delle-reti-elettriche-ue-piano-d-azione/

36 Qualenergia. (2025). European Grids Package: cosa prevede il nuovo pacchetto UE. https://www.qualenergia.it/articoli/cosa-vuole-fare-ue-rafforzare-reti-elettriche/

37 JECIR, Smart Grids: A Comprehensive Review of Technologies, Challenges, and Future Directions, 2024

38 https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375750_ita [unesdoc.unesco.org]

39 https://unesdoc.unesco.org

40 https://sfera.unife.it/bitstream/11392/2505173/2/Tesi_Dottorato_Marzola_REV1.pdf [sfera.unife.it] e OpenPNRR. (2025). Riduzione delle perdite nelle reti di distribuzione dell'acqua, compresa la digitalizzazione e il monitoraggio delle reti. https://openpnrr.it/misure/128/ [openpnrr.it]

41 https://frontiere.io/come-linternet-of-things-sta-trasformando-il-settore-delle-risorse-idriche/

42 Eurispes (2023), Un sistema che fa acqua - Lo stato delle acque in Italia

43 ARERA. (2024). Relazione annuale sullo stato dei servizi e sull'attività svolta dall'Autorità.

44 ARERA, per monitorare la qualità tecnica del SII, costruisce e valuta i seguenti sei indicatori: M1 "Perdite idriche" (articolato nei due sottoindicatori, M1a e M1b); M2 "Interruzioni del servizio"; M3 "Qualità dell'acqua erogata"; M4 "Adeguatezza del sistema fognario"; M5 "Smaltimento fanghi in discarica"; M6 "Qualità dell'acqua depurata". Per dettagli sulle modalità di calcolo degli indicatori, si rimanda all'Allegato A alla delibera dell'ARERA n. 917/2017/R/IDR, recante "Regolazione della qualità tecnica del servizio idrico integrato ovvero di ciascuno dei singoli servizi che lo compongono (RQTI)".

45 https://frontiere.io/come-linternet-of-things-sta-trasformando-il-settore-delle-risorse-idriche/

46 UNESCO. (2021). Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche: Il valore dell'acqua

47 https://www.hydroitalia.com/pnrr-ultime-novita-e-aggiornamenti/

48 Bip Consulting. (2022). Digital Water: come evolve il sistema idrico integrato. Recuperato da https://www.bip-group.com/it/insights/digital-water-come-evolve-il-sistema-idrico-integrato/

49 Caleffi. (2025). La nuova normativa per l'acqua potabile: gestione del rischio e responsabilità nelle reti idriche interne. https://www.caleffi.com/it-it/blog/la-nuova-normativa-lacqua-potabile-gestione-del-rischio-e-responsabilita-nelle-reti-idriche

50 Commissione Europea. (2023). Strategia per la resilienza idrica. https://commission.europa.eu/topics/environment/water-resilience-strategy_it

51 https://it.euronews.com/green/2024/09/17/limpatto-della-tecnologia-digitale-sulla-gestione-dellacqua-in-europa

52 Zapata-Sierra, A. J., Salmerón-Manzano, E., Alcayde, A., Zapata-Castillo, M. L., & Manzano-Agugliaro, F. (2024). The Scientific Landscape of Smart Water Meters: A Comprehensive Review. Water, 16(1), 113. https://doi.org/10.3390/w16010113

53 Jamadarkhani, M., et al. (2025). IoT enabled smart water metering using multi sensor data and machine learning techniques. Frontiers in Water. https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1586916

54 https://cdsentec.com/it/pressure-sensor-water/

55 https://www.lumi4innovation.it/smart-water-metering/

56 Zapata-Sierra, A. J., Salmerón-Manzano, E., Alcayde, A., Zapata-Castillo, M. L., & Manzano-Agugliaro, F. (2024). The Scientific Landscape of Smart Water Meters: A Comprehensive Review. Water, 16(1), 113. https://doi.org/10.3390/w16010113 [mdpi.com]

57 Zapata-Sierra, A. J., Salmerón-Manzano, E., Alcayde, A., Zapata-Castillo, M. L., & Manzano-Agugliaro, F. (2024). The Scientific Landscape of Smart Water Meters: A Comprehensive Review. Water, 16(1), 113. https://doi.org/10.3390/w16010113

58 Zapata-Sierra, A. J., Salmerón-Manzano, E., Alcayde, A., Zapata-Castillo, M. L., & Manzano-Agugliaro, F. (2024). The Scientific Landscape of Smart Water Meters: A Comprehensive Review. Water, 16(1), 113. https://doi.org/10.3390/w16010113

59 Commissione delle Comunità Europee. (1985). Comunicazione della Commissione al Consiglio: Orientamenti per una politica comune delle infrastrutture di trasporto. COM(85) 310 final. Recuperato da https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:51985DC0310.

60 Consiglio delle Comunità Europee. (1992). Trattato sull'Unione Europea (Maastricht). Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, C 191. Recuperato da https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:C:1992:191:FULL

61 Next Generation EU è un'alleanza tra generazioni. Per la prima volta, noi, l'Unione europea, stiamo chiedendo soldi in prestito ai nostri figli. (...) Gli investimenti di oggi sono per la prossima generazione di europei. Next Generation EU trasforma la sfida eccezionale che stiamo affrontando in un'opportunità. Discorso della Presidente von der Leyen

all'incontro "Progettiamo il Rilancio" convocato dal Presidente del Consiglio Giuseppe Conte il 13 giugno 2020. Disponibile su: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/speech_20_1060

62 Corte dei conti europea (2025), Orientamento alla performance, obbligo di rendiconto e trasparenza: cosa insegnano le criticità dell'RRF, Analisi RV-2025-02, Lussemburgo. Disponibile all'indirizzo: https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/RV-2025-02/RV-2025-02_IT.pdf

63 https://commission.europa.eu/document/download/81dd7c71-7b75-4b2a-8323-fb7b4326fa16_en?filename=COM_2025_637_1_EN_ACT_part1_v4.pdf

64 Corte dei Conti Europea. (2025). Il sostegno alla transizione digitale negli Stati membri dell'UE: un'occasione mancata per una focalizzazione strategica della risposta alle esigenze digitali. Estratto da https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2025-13/SR-2025-13_IT.pdf

65 Corte dei Conti Europea. (2025). Preparare la rete elettrica dell'UE all'azzeramento delle emissioni nette. Estratto da https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/RV-2025-01/RV-2025-01_IT.pdf

66 Corte dei Conti Europea. (2025). Verificare se i finanziamenti dell'RRF sono spesi in conformità alle norme in materia di appalti pubblici e di aiuti di Stato: i sistemi di controllo migliorano, ma restano insufficienti. Estratto da https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2025-09/SR-2025-09_IT.pdf

67 Szczepanski, M. (2025, 17 giugno). Nuova dottrina dell'UE sulla sicurezza economica. Servizio di Ricerca del Parlamento Europeo (EPRS), Briefing EPRS_BRI(2025)775883. Disponibile su: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/775883/EPRS_BRI(2025)775883_EN.pdf775883_EN.pdf)

68 https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/762375/EPRS_BRI(2024)762375_EN.pdf

69 Il Global Infrastructure Hub (GI Hub) è un'organizzazione internazionale senza scopo di lucro, creata nel 2014 dal G20 per promuovere lo sviluppo delle infrastrutture a livello globale.

70 Infrastrutture: nel prossimo decennio boom di investimenti

71 Hydro Italia. (2024). PNRR e risorse idriche: tutte le novità e gli ultimi aggiornamenti. https://www.hydroitalia.com/pnrr-ultime-novita-e-aggiornamenti/ [hydroitalia.com]

72 OpenPNRR. (2025). Riduzione delle perdite nelle reti di distribuzione dell'acqua, compresa la digitalizzazione e il monitoraggio delle reti. https://openpnrr.it/misure/128/

73 Inaudi D., Cost-Benefits Analysis in SHM Projects, SHMII-5 Conference, 2011

74 Piastra F. et al., The Genoa San Giorgio Bridge Fiber-Optic Structural Monitoring System, Lecture Notes in Civil Engineering, 2023

75 Inaudi D., op. cit.

76 Piastra F. et al., The Genoa San Giorgio Bridge Fiber-Optic Structural Monitoring System, Lecture Notes in Civil Engineering, 2023

77 Dalmasso M., Civera M., De Biagi V., Chiaia B., Grandi infrastrutture: le sfide tecniche dei sistemi per il monitoraggio strutturale di ponti e gallerie, Ingenio, 2023

78 U.S. electricity customers experienced eight hours of power interruptions in 2020 - U.S. Energy Information Administration (EIA)

79 Sono considerate interruzioni lunghe le interruzioni di corrente di durata superiore a 3 minuti, mentre sono interruzioni brevi le interruzioni di durata compresa tra 1 secondo e 3 minuti. Le interruzioni di durata inferiore al secondo non sono computate.

80 SAIDI (System Average Interruption Duration Index): misura la durata media annuale delle interruzioni per utente, espressa in minuti. Indica quanto tempo, in media, un cliente è rimasto senza alimentazione elettrica nell'anno considerato. Secondo ARERA, il SAIDI è calcolato come:

SAIDI= ∑(durata delle interruzioni lunghe non programmate)/numero di clienti in BT serviti

Caratteristiche del calcolo:

- Si considerano solo le interruzioni lunghe non programmate (durata > 3 minuti).
- Sono escluse le interruzioni brevi (< 3 minuti) e quelle dovute a eventi eccezionali.
- Il valore è espresso in minuti per utente BT (bassa tensione).
- È una media nazionale, che include sia clienti domestici sia non domestici.

81 Esclusi gli incidenti rilevanti sull'RTN, gli interventi dei sistemi di difesa e le interruzioni dovute a furti

82 ARERA (2025), Relazione annuale sullo stato dei servizi e sull'attività svolta dall'Autorità

83 Esclusi gli incidenti rilevanti sull'RTN, gli interventi dei sistemi di difesa e le interruzioni dovute a furti

84 SAIFI (System Average Interruption Frequency Index): misura il numero medio di interruzioni per utente in un anno. Indica quante volte, in media, un cliente ha subito un'interruzione.

85 Kavitha C. R, Energy Monitoring and Control in the Smart Grid: Integrated Intelligent IoT and ANFIS, 2023, https://doi.org/10.4018/978-1-6684-6577-6.CH014

86 https://www.powermag.com/advanced-power-grid-sensors-and-switches-reduce-downtime-and-improve-system-reliability/

87 https://epb.com/energy/automated-grid/

88 IEA. (2023). Smart Grids Technology Roadmap.

89 European Commission. (2022). EU Strategy for Energy System Integration.

90 Terna. (2023). Digitalizzazione e smart metering nelle reti elettriche italiane.

91 Società Energia Italia. (2023). Comunità energetiche e smart grid. https://www.societaenergiaitalia.com

92 ENEA. (2023). Smart Grid e resilienza delle reti elettriche. https://energia.enea.it

93 UNESCO. (2021). Rapporto mondiale sullo sviluppo delle risorse idriche: Il valore dell'acqua. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375750_ita e - OECD. (2012). Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. OECD Publishing.

94 Kamstrup. (2024). Conoscere LoRaWAN® per la gestione dell'acqua. https://www.kamstrup.com/it-it/insights/lorawan-smart-water-metering e IoT For All / KaaIoT. (2025). Water Leak Detection with IoT-Based Solutions. https://www.iotforall.com/water-leak-detection-with-iot-based-solutions

95 Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., & Whittle, A. J. (2013). Water Distribution System Monitoring and Decision Support Using a Wireless Sensor Network. IEEE. https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/92758/Allen%20et%20al%20-%20SNPD2013.pd

96 Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., & Whittle, A. J. (2013). Water Distribution System Monitoring and Decision Support Using a Wireless Sensor Network. IEEE.

97 UNESCO. (2021). Rapporto mondiale sullo sviluppo delle risorse idriche: Il valore dell'acqua

98 Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., & Whittle, A. J. (2013). Water Distribution System Monitoring and Decision Support Using a Wireless Sensor Network. IEEE e IoT For All / KaaIoT. (2025). Water Leak Detection with IoT-Based Solutions

99 Kamstrup. (2024). Conoscere LoRaWAN® per la gestione dell'acqua

100 https://www.vackerglobal.com/blog/water-leak-detection-using-iot-technology-how-does-it-work/

101 https://ance.it/2025/02/ance-impatto-ia-nelle-costruzioni-fino-a-150-miliardi-di-dollari/

102 Numa J. Bertola & Eugen Brühwiler (2024) Framework to evaluate the value of monitoring-technique information for structural performance monitoring, Structure and Infrastructure Engineering, 20:7-8, 1033-1052, DOI: 10.1080/15732479.2023.2280727

103 Verifica della capacità strutturale in un dato momento, utile per confermare la sicurezza attuale.

104 Analisi del degrado nel tempo, orientata alla previsione della vita residua.

105 Conformità limite x 1,36 = 1 -> Conformità limite = 1/(1,36)= 0,73 pertanto riduzione crolli = 1-Conformità limite= 0,27

106 Predictive Maintenance: Cutting Costs & Downtime Smartly

107 https://quifinanza.it/attualita/genova-inaugurazione-nuovo-ponte-san-giorgio-costi-caratteristiche-conte-mattarella/405225/

108 https://www.risorseperroma.it/news/2553-nuovo-ponte-scafa-112024.html#:~:text=Il%20vecchio%20Ponte%20della%20Scafa,e%20della%20realizzazione%20dell'opera.

109 https://ilcaffediroma.it/193980/roma-dopo-20-anni-al-via-il-nuovo-ponte-della-scafa/#:~:text=I%20lavori%20per%20il%20nuovo,anche%20un%20nuovo%20inquadramento%20paesaggistico.

110 https://www.lacnews24.it/attualita/il-ponte-che-fa-paura-ricordo-e-ferite-del-crollo-del-viadotto-cannavino-a-53-anni-dalla-tragedia-che-spezzo-la-calabria-ht93969h

111 https://www.socotec.it/media/client-projects/controllo-e-monitoraggio-del-ponte-cannavino

112 https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Info/8905 e https://www.stradeanas.it/it/calabria-anas-entro-lestate-completamento-del-progetto-del-nuovo-impalcato-sul-viadotto-cannavino

113 https://www.quotidianodelsud.it/calabria/cosenza/cronache/infrastrutture/2021/12/10/celico-il-viadotto-cannavino-sara-demolito-e-ricostruito

114 PNRR: Piano Nazionale Ripresa e Resilienza, PNC: Piano Nazionale Complementare. Le altre fonti di finanziamento sono FSC, Fondo per lo Sviluppo e la Coesione, uno strumento finanziario nazionale italiano, alimentato da risorse statali e cofinanziamenti europei, finalizzato a ridurre i divari economici e sociali tra le diverse aree del Paese, con particolare attenzione al Mezzogiorno, e gli stanziamenti delle PA locali.

115 Fonti: https://blog.fenealuil.it/2025/02/19/le-infrastrutture-strategiche-in-italia-investimenti-progressi-e-criticita/, https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2025-0/Allegato%20Infrastrutture%20al%20DFP%202025.pdf, https://www.camera.it/application/xmanager/projects/leg19/file/Rapporto_Infrastrutture_Intermedio_29.07_2025_WEB.pdf

116 Cost-Benefits Analysis in SHM Projects, D.Inaudi, SMARTEC SA, Switzerland, 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-5) 2011, Cancún, México

117 Vanderzee P. (2008), A better way to fix our national bridge problem, White paper by LifespanTechnologies, October 2008

118 Cost-Benefits Analysis in SHM Projects, D.Inaudi, SMARTEC SA, Switzerland, 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-5) 2011, Cancún, México

119 Cost-Benefits Analysis in SHM Projects, D.Inaudi, SMARTEC SA, Switzerland, 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-5) 2011, Cancún, México

120 Cost-Benefits Analysis in SHM Projects, D.Inaudi, SMARTEC SA, Switzerland, 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-5) 2011, Cancún, México

121 https://www.arera.it/fileadmin/allegati/relaz_ann/25/Sintesi_Relazione_Annuale_2025_16giu.pdf

122 https://www.arera.it/fileadmin/allegati/relaz_ann/25/Sintesi_Relazione_Annuale_2025_16giu.pdf

123 Smart Grid Projects Outlook 2023, https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/smart-grids_en

124 ARERA (2025). Relazione Annuale 2025

125 RSE (2023). Progetti pilota Demand Response, https://www.ferc.gov/sites/default/files/2024-11/Annual%20Assessment%20of%20Demand%20Response_1119_1400.pdf

126 Terna (2024). Report Mercato della Capacità, https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/mercato-capacita

127 Secondo il calcolo 2,9 GW =2.900.000 kW, valorizzato al costo di 47 €/kW/anno è pari a 2.900.000 kW x 47€ = 135,8 milioni di euro l'anno.

128 https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en#:~:text=Smart%20grids%20open%2Dup%20the,communities%20and%20energy%20sharing%20schemes

129 Media dei dati TERNA 2021-2023 sui consumi domestici, Bilancio Elettrico Nazionale, Pubblicazioni Statistiche - Terna spa

130 https://www.arera.it/comunicati-stampa/dettaglio/elettricita-bolletta-in-tutela-108-nel-primo-trimestre-2024#:~:text=Le%20componenti%20della%20bolletta%20nel,consumo%20associato%20ad%20ogni%20trimestre

131 Eurispes, Un sistema che fa acqua - Lo stato delle acque in Italia, 2023

132 Utilitatis-Utilitalia, "Blue Book 2025", marzo 2025

133 Utilitatis-Utilitalia, "Blue Book 2025", marzo 2025.

134 ISTAT, "Le statistiche sull'acqua - anni 2020-2023", marzo 2024

135 Camera dei Deputati, Servizio Studi Dipartimento Ambiente, "Il servizio idrico integrato", aprile 2025

136 R. Vadruccio, G. Salvadori, A. Tumino, Smart metering and Internet of Things for efficient water management, POLIMI, 2023

137 Britton, T.C. Stewart, R.A., O'Halloran, K.R. (2013) Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management, Journal of Cleaner Production, Volume 54, Pages 166-176, ISSN 0959-6526, http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.018.

138 Britton et al., 2013

139 R. Vadruccio, G. Salvadori, A. Tumino, Smart metering and Internet of Things for efficient water management, POLIMI, 2023

140 20231120_CS_SIT_-Dati-mercato-e-lancio-contatore-acqua-Smartio.docx

141 https://www.mit.gov.it/comunicazione/news/pnrr-il-mit-assegna-293-mln-per-ridurre-le-perdite-di-acqua-potabile

142 https://www.sitcorporate.it/app/uploads/2023/11/20231120_CS_SIT_-Dati-mercato-e-lancio-contatore-acqua-Smartio.docx.pdf

143 https://www.arqiva.com/Arqiva+Waterwise+Net+Zero+Report+FINAL.pdf

144 Britton, T.C. Stewart, R.A., O'Halloran, K.R. (2013) Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management, Journal of Cleaner Production, Volume 54, Pages 166-176, ISSN 0959-6526, http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.018

145 https://www.arqiva.com/Arqiva+Waterwise+Net+Zero+Report+FINAL.pdf

146 https://www.arqiva.com/Arqiva+Waterwise+Net+Zero+Report+FINAL.pdf

147 R. Vadruccio, G. Salvadori, A. Tumino, Smart metering and Internet of Things for efficient water management, POLIMI, 2023

148 Il costo dell'acqua completo è un concetto introdotto dalla Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE e recepito dal Codice dell'Ambiente (D.Lgs. 152/2006).

Significa che il prezzo pagato dagli utenti per il servizio idrico deve coprire tutti i costi associati alla gestione della risorsa, non solo quelli operativi. In particolare, comprende:

- Costi finanziari: spese di investimento per infrastrutture (reti, impianti di depurazione, invasi) e costi di esercizio e manutenzione.
- Costi ambientali: oneri legati alla tutela della risorsa, alla prevenzione dell'inquinamento e al ripristino dei danni ambientali.
- Costi della risorsa: valore economico dell'acqua come bene limitato, tenendo conto della scarsità e dell'impatto

sull'ecosistema.

l calcolo avviene attraverso il Metodo Tariffario Idrico (MTI) definito da ARERA, che stabilisce:

- Capex (costi di capitale) e Opex (costi operativi).
- Indicatori di qualità tecnica (M1-M6) per premiare gestioni efficienti.
- Meccanismi di perequazione per garantire equità territoriale.

149 D. Uggeri, E. Simeon, Smart water metering: analytical model computation for an estimated costs and benefits analysis, Thesis 2019-2020, Politecnico di Milano, Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, Master of Science Management Engineer

150 Sensus, Water2020 Report

151 https://www.arera.it/atlante-per-il-consumatore/acqua/la-bolletta/invio-e-pagamento/ogni-quanto-tempo-deve-essere-inviata-la-bolletta

152 REF Ricerche, Acqua n°117, 'Investimenti Nell'Acqua: La Vera Manovra Espansiva Per L'Economia Italiana' Laboratorio SPL Collana Ambiente, 2019

153 Sensus, Water2020 Report

154 AIS Associazione Infrastrutture Sostenibili, Position Paper 2024 n.8, Digitalizzazione per la sostenibilità

155 https://www.stradeanas.it/it/le-strade/monitoraggio-di-ponti-e-viadotti-tramite-sensori

156 Pnrr: a Anas e concessionari autostradali 450 mln fino al 2026 del Piano Complementare per monitoraggio dinamico di ponti, viadotti e tunnel | Ministero delle infrastrutture e dei trasporti

157 Mannella-Pellicanò - ANAS, CSLLPP (Consiglio Superiore Lavori Pubblici), Linee guida ponti e viadotti esistenti, reLuiss, ottobre 2023

158 ISPRA, La banca dati dei fattori di emissione medi per il parco circolante in Italia.

159 Elaborazioni Centro Studi TIM basata su dati ANAS, da bilancio ANAS 2022,2023 e 2024, LINEE GUIDA PONTI - DM 204/2022, https://ance.it/2025/02/ance-impatto-ia-nelle-costruzioni-fino-a-150-miliardi-di-dollari

160 EC, Affordable Energy Action Plan (COM/2025/79), Affordable energy, febbraio 2025 e EC, Grid Action Plan (COM/2023/757), novembre 2023.

161 ENEA, L'intelligenza artificiale al servizio delle reti e microreti elettriche

162 Bilancio Elettrico Nazionale, Pubblicazioni Statistiche - Terna spa e ISPRA, r413-2025_def.pdf e r404-2024.pdf

163 Environmental Protection Agency. Si tratta dell'ente governativo statunitense responsabile della tutela dell'ambiente e della salute pubblica, attraverso la regolamentazione e il controllo di inquinamento atmosferico, idrico, gestione dei rifiuti, sostanze chimiche e cambiamenti climatici.

164 https://www.arqiva.com/Arqiva+Waterwise+Net+Zero+Report+FINAL.pdf

165 ISTAT, Goal6.pdf

166 ISPRA, Tabella_1_2025 totale proiezioni_politiche correnti.xlsx

167 Uso del suolo, Cambio di Uso del Suolo e Foreste (LULUCF)

168 The European House — Ambrosetti, Libro-Bianco-Valore-Acqua-per-lItalia-2024

169 The European House — Ambrosetti, Libro-Bianco-Valore-Acqua-per-lItalia-2024

170 https://www.beverfood.com/report-beverfoodcom-mercato-acque-minerali-italia-2023-consumi-147-mrd-litri-wd/

171 The European House — Ambrosetti, Libro-Bianco-Valore-Acqua-per-lItalia-2024

172 ARERA 2024

173 ISTAT, "Le statistiche sull'acqua - anni 2020-2024", marzo 2025

174 The European House — Ambrosetti, Libro-Bianco-Valore-Acqua-per-lItalia-2024

175 CENSIS, Il Valore Sociale Rivelato del Consumo di Acque Minerali, 2018

176 https://www.istat.it/wp-content/uploads/2025/03/Report-Statistiche-sullacqua_Anni-2020-2024.pdf

177 OXERA- ICE, 2018.

178 ISPI- Istituto per gli Studi di Politica Internazionale, WIOD/McKinsey Global Institute, Infrastructure in a changing world: trends and challenges, 2020

179 Banca d'Italia, Questioni di Economia e Finanza (Occasional Papers), The macroeconomic impact of infrastructure investment: a review of channels, marzo 2021

180 Banca d'Italia, Questioni di Economia e Finanza (Occasional Papers), The macroeconomic impact of infrastructure investment: a review of channels, marzo 2021

181 Dealroom è una piattaforma avanzata di intelligence e analytics che aggrega milioni di dati su startup, scaleup, investitori, settori emergenti ed ecosistemi innovativi. Supporta fondi, aziende e istituzioni nell'identificare trend, valutare opportunità di investimento e monitorare l'evoluzione del mercato tecnologico globale.

Limiti di responsabilità

I dati e le informazioni cui si fa riferimento nel presente documento sono forniti in buona fede e TIM le ritiene accurate. In nessun caso TIM sarà ritenuta responsabile per qualsiasi danno diretto o indiretto, causato dall'utilizzo di queste informazioni. I dati, le ricerche, le opinioni o i punti di vista espressi da TIM S.p.A non rappresentano dati di fatto. I materiali contenuti in questo documento riflettono le informazioni e le opinioni a novembre 2025. Le informazioni e le opinioni espresse in questo documento sono soggette a modifiche senza preavviso. TIM non ha alcun obbligo o responsabilità di aggiornare i materiali di questa pubblicazione di conseguenza. TIM non sarà, in nessuna circostanza, responsabile per qualsiasi investimento, decisione commerciale o di altro tipo basata o presa in base ai contenuti di questo documento.

Si ringrazia MarketsandMarkets per i dati forniti.

Smart
Infrastructure
Le infrastrutture italiane tra sfide e innovazione

2025

CENTRO STUDI

TIM