

ET4 Digital

ET4D



CORSO 3



Tecnologie e processi digitali nell'ambiente costruito



Cofinanziato
dall'Unione europea

Finanziato dall'Unione europea. Le opinioni espresse appartengono, tuttavia, al solo o ai soli autori e non riflettono necessariamente le opinioni dell'Unione europea o dell'Agenzia esecutiva europea per l'istruzione e la cultura (EACEA). Né l'Unione europea né l'EACEA possono esserne ritenute responsabili.

Corso 3:

Tecnologie e processi digitali nell'ambiente costruito (Digital Twin e IA)

*Argomento 1: Comprensione e applicazione dei Digital Twin
nell'ambiente costruito*

*Argomento 2: Intelligenza artificiale e tecnologie aumentate per
ambienti costruiti più intelligenti*

Indice

Argomento 1: Comprensione e applicazione dei gemelli digitali nell'ambiente costruito

Obiettivi di apprendimento, risultati e glossario.....	6
1. Panoramica dell'argomento 1	8
2. Evoluzione della digitalizzazione nell'ambiente costruito 2.1 Concetti fondamentali dell'IoT per l'edilizia 8	
Progettazione assistita da computer (CAD) nell'edilizia e nell'architettura	8
Building Information Modelling (BIM).....	9
Gemelli digitali	9
Esercizio.....	11
2. Definizioni, concetti e tipi di gemelli digitali.....	12
Esercizio.....	12
3. Componenti fondamentali di un sistema di gemelli digitali.....	13
Esercizio.....	15
4. Fonti di dati e livelli di integrazione.....	16
5. I gemelli digitali lungo tutto il ciclo di vita delle risorse.....	18
Fase 1: Progettazione e pre-costruzione.....	18
Fase 2: Costruzione e messa in servizio	18
Fase 3: Gestione e manutenzione (il ciclo di vita più lungo).....	18
Fase 4: Ristrutturazione, riconversione e fine vita.....	19
Esercizio.....	20
6. Applicazioni pratiche e casi di studio.....	21
Edifici: gestione energetica e delle strutture (FM)	21
Infrastrutture: monitoraggio dello stato delle strutture	22
Esercizio.....	22
7. Ruolo dei droni e della scansione laser.....	23
Esercizio.....	25
8. Sfide, rischi e limiti	25
Rischi tecnici.....	25
Rischi relativi ai dati.....	25
Rischi organizzativi.....	26
Rischi legali e di sicurezza.....	26
Esercizio.....	27

9. Preparazione organizzativa e requisiti di competenza.....	27
Esercizio.....	28
10. Strategie per l'introduzione dei gemelli digitali nella pratica e nella formazione	29
Esercizio.....	31
11. Esercizi.....	31
12. Riferimenti	33

Argomento 2: Intelligenza artificiale e tecnologie aumentate per ambienti costruiti più intelligenti

Obiettivi di apprendimento, risultati e glossario.....	34
Introduzione all'argomento 2.....	36
1.Fondamenti di intelligenza artificiale.....	36
Esercizio 1.....	37
Esercizio 2.....	37
2. Tecniche di IA relative all'ambiente costruito	38
Esempi pratici.....	38
Esercizio.....	39
3. Flussi di lavoro BIM e Digital Twin basati sull'intelligenza artificiale.....	40
Esercizio.....	41
4. Manutenzione predittiva e analisi dei rischi.....	42
Esercizio.....	42
5. Visione artificiale nell'edilizia e nelle infrastrutture	43
Esercizio 1.....	44
Esercizio 2.....	44
6. Concetti di realtà aumentata e realtà virtuale.....	45
Esercizio.....	47
7. Applicazioni AR/VR nel ciclo di vita delle risorse.....	48
Esercizio 1.....	48
Esercizio 2.....	49
8. L'intelligenza artificiale per l'apprendimento e lo sviluppo delle competenze.....	49
Esercizio.....	50
9. Considerazioni etiche, legali e organizzative	50
Questioni chiave.....	50
Preparazione organizzativa.....	51

Esercizio.....	51
10. Strategie di adozione e tendenze future.....	52
Esercizio1.....	53
Esercizio 2.....	53
11. Esercizi.....	54
12. Riferimenti	56

Argomento 1: Comprensione e applicazione dei gemelli digitali nell'ambiente costruito

Obiettivi di apprendimento, risultati e glossario

Questo breve corso mira a sviluppare consapevolezza, comprensione e preparazione alle tecnologie digitali avanzate nell'ambiente costruito. Affronta le attuali lacune di conoscenza ed esperienza pratica relative ai gemelli digitali, all'intelligenza artificiale e alla loro integrazione con il BIM e altri strumenti emergenti (ad esempio, droni, scansione laser, realtà aumentata).

Obiettivi di apprendimento

- Tracciare l'evoluzione dal CAD al BIM ai gemelli digitali e riconoscere le tappe tecnologiche fondamentali nell'ambiente costruito.
- Definire cosa è (e cosa non è) un gemello digitale, distinguendo tra tipi e livelli di maturità.
- Identificare gli elementi fondamentali di un Digital Twin e spiegare come interagiscono i componenti.
- Comprendere le principali fonti di dati e le tecnologie di acquisizione della realtà, riconoscendone i vantaggi e i limiti.
- Esplorare le sfide di integrazione e interoperabilità nell'implementazione dei Digital Twin.
- Applicare prospettive basate sul ciclo di vita per valutare le applicazioni dei Digital Twin e la creazione di valore in ogni fase.
- Esaminare casi d'uso reali per comprendere i vantaggi, i limiti e la trasferibilità tra contesti diversi.
- Riconoscere le categorie di rischio e i fattori organizzativi/umani che influenzano il successo dei progetti di Digital Twin.
- Apprendere approcci strutturati per l'adozione del Digital Twin a supporto della pratica professionale e dello sviluppo delle competenze.

Risultati di apprendimento

Dopo aver completato l'Argomento 1, i partecipanti saranno in grado di:

- Spiegare l'evoluzione delle tecnologie digitali nell'ambiente costruito, compresa la transizione dal CAD al BIM e ai concetti di Digital Twin.
- Definire i principi fondamentali e le componenti di un sistema Digital Twin, inclusi gli asset fisici, i modelli digitali, l'integrazione dei dati e i livelli di analisi.
- Identificare le principali fonti di dati e tecnologie che supportano lo sviluppo del Digital Twin, quali sensori, sistemi IoT, modelli BIM, droni e scansione laser. • Valutare il valore dei Digital Twin lungo l'intero ciclo di vita delle risorse, comprese le fasi di progettazione, costruzione, gestione e manutenzione.
- Riconoscere le sfide organizzative, tecniche e relative ai dati associate all'implementazione di soluzioni Digital Twin in progetti reali.

Glossario

Ciclo di vita delle risorse

La sequenza di fasi che un bene costruito attraversa dalla pianificazione e progettazione alla costruzione, al funzionamento, alla ristrutturazione e alla fine del ciclo di vita.

Livello di analisi	La componente di una piattaforma Digital Twin responsabile dell'analisi dei dati, della generazione di approfondimenti e del supporto al processo decisionale.
BIM (Building Information Modelling)	Un processo collaborativo che utilizza modelli digitali contenenti dati geometrici e semantici relativi a edifici o infrastrutture durante il loro intero ciclo di vita.
Sistema di gestione degli edifici (BMS)	Un sistema che monitora e controlla i servizi dell'edificio come HVAC, illuminazione e sicurezza.
CAD (Computer-Aided Design)	Tecnologia digitale utilizzata per la creazione di disegni e modelli tecnici in 2D e 3D nei settori dell'ingegneria e dell'architettura.
Ambiente di dati comune (CDE)	Una piattaforma digitale centralizzata in cui le informazioni di progetto vengono archiviate, condivise e gestite tra i team di progetto.
Integrazione dei dati	Il processo di combinazione di dati provenienti da più fonti per fornire una visione unificata ai fini dell'analisi e del processo decisionale.
Gemello digitale	Una rappresentazione digitale di un bene, un sistema o un processo fisico che viene continuamente aggiornata con dati in tempo reale o quasi reale.
Piattaforma Digital Twin	Infrastruttura software utilizzata per gestire modelli digitali, dati dei sensori e analisi associate a un gemello digitale.
Drone (UAV)	Veicolo aereo senza pilota utilizzato per ispezioni, rilievi e acquisizione di immagini aeree per la modellazione digitale.
Principi Gemini	Principi guida sviluppati dal Centre for Digital Built Britain del Regno Unito per garantire che i Digital Twin siano affidabili, sicuri e vantaggiosi.
GIS (Sistema informativo geografico)	Tecnologia utilizzata per la gestione dei dati spaziali e la mappatura delle informazioni geografiche.
IoT (Internet delle cose)	Rete di sensori e dispositivi interconnessi che raccolgono e scambiano dati in tempo reale.
Scansione laser	Tecnologia di acquisizione della realtà che utilizza raggi laser per produrre nuvole di punti 3D altamente accurate di ambienti fisici.
Gestione del ciclo di vita	La gestione di un bene durante l'intero ciclo di vita utilizzando strumenti digitali
OpenBIM	Un approccio promosso da buildingSMART che garantisce l'interoperabilità e standard aperti per lo scambio di dati BIM.
Fotogrammetria	Tecnica per ottenere misurazioni e modelli 3D da fotografie.

Manutenzione predittiva	Strategia di manutenzione che utilizza l'analisi dei dati e modelli predittivi per anticipare i guasti delle apparecchiature.
Acquisizione della realtà	Tecnologie quali droni, scansione laser e fotogrammetria utilizzate per acquisire digitalmente gli ambienti del mondo reale.
Città intelligente	Un ambiente urbano che utilizza tecnologie digitali e dati per migliorare la sostenibilità, l'efficienza e la qualità della vita.

1. Panoramica dell'argomento 1

Questo modulo formativo offre un'introduzione approfondita ai gemelli digitali nell'ambiente costruito. È strutturato in 10 parti complete, pensate per la formazione professionale, l'istruzione superiore e i programmi di sviluppo delle competenze. Il modulo combina teoria, esempi pratici, spiegazioni visive, grafici, esercizi e sezioni di riflessione.

- Ogni parte include:
- Testo esplicativo di base
- Foto/figure consigliate
- Grafici o diagrammi (descritti)
- Brevi esercizi o spunti di discussione

2. Evoluzione della digitalizzazione nell'ambiente costruito 2.1 Concetti fondamentali dell'IoT per l'edilizia

La trasformazione digitale dell'ambiente costruito si è evoluta nel corso di diversi decenni. La digitalizzazione iniziale è iniziata con la progettazione assistita da computer (CAD), che ha sostituito il disegno manuale e migliorato la precisione e l'efficienza dei disegni (panoramica ISO 19650) [\[1\]](#).

La progettazione assistita da computer (CAD) consiste nell'uso di software per creare, modificare, analizzare e ottimizzare rappresentazioni digitali 2D e 3D di edifici, migliorando la precisione, l'efficienza e la collaborazione rispetto al disegno manuale. Le applicazioni principali includono la creazione di piani architettonici dettagliati, l'analisi strutturale, la progettazione di sistemi MEP e, attraverso il Building Information Modeling (BIM), simulazioni 4D/5D per i costi e la pianificazione.

Progettazione assistita da computer (CAD) nell'edilizia e nell'architettura

Il CAD utilizza software specializzati per creare disegni tecnici 2D e modelli 3D precisi, dettagliati e scalabili. Ha in gran parte sostituito il disegno manuale su carta. Offre una maggiore precisione, iterazioni di progettazione più veloci, una migliore

visualizzazione e, grazie a software basati sui dati, facilita la condivisione tra architetti, ingegneri e appaltatori. Le applicazioni principali del CAD nel settore edile sono:

- Progettazione architettonica: sviluppo di planimetrie, prospetti, sezioni e visualizzazioni 3D a partire dai rilievi iniziali.
- Ingegneria: modellazione e analisi di sistemi strutturali, elettrici e idraulici (MEP).
- Gestione della costruzione: utilizzo di modelli 3D per la pianificazione (4D), la stima dei costi (5D) e la creazione di registrazioni "as-built".
- Pianificazione e conformità: garantire che i progetti siano conformi alle normative edilizie e facilitare l'analisi del sito.

I software CAD più diffusi in architettura sono Autodesk AutoCAD, spesso utilizzato per il disegno 2D e la modellazione 3D, Autodesk Revit, frequentemente utilizzato per il BIM (Building Information Modeling) e altri strumenti specializzati utilizzati per l'ingegneria civile, lo sviluppo territoriale e l'ingegneria strutturale, elettrica o idraulica.

Building Information Modelling (BIM)

Il successivo grande passo avanti è stato il Building Information Modelling (BIM). Il BIM ha introdotto la modellazione basata sugli oggetti, in cui gli elementi edilizi contengono sia dati geometrici che semantici, e ha reso possibile la collaborazione multidisciplinare (buildingSMART openBIM:[\[2\]](#)).

Il Building Information Modeling (BIM) è un processo collaborativo e basato sulla tecnologia per la creazione, la gestione e lo scambio di rappresentazioni digitali di beni immobiliari fisici durante il loro ciclo di vita. Integra la modellazione 3D con i dati, consentendo ai team di visualizzare, simulare e ottimizzare la progettazione, la costruzione e il funzionamento. Le applicazioni principali includono il rilevamento delle interferenze, la stima dei costi e la gestione delle strutture.

Le caratteristiche del BIM sono:

- Processo, non solo software: il BIM è una metodologia di lavoro collaborativo che utilizza un Common Data Environment (CDE) per condividere informazioni tra architetti, ingegneri e appaltatori.
- Modello 3D intelligente: piuttosto che un semplice disegno 3D, il BIM crea un database di elementi edilizi contenente geometria, relazioni spaziali e proprietà fisiche.
- Gestione del ciclo di vita: si estende dalla progettazione iniziale, alla pianificazione e alla costruzione, fino al funzionamento, alla manutenzione e all'eventuale demolizione o ristrutturazione.
- Livelli di maturità: la maturità del BIM varia dal Livello 0 (CAD 2D non gestito) al Livello 2 (3D collaborativo con CDE) e al Livello 3 (dati completamente integrati e basati su cloud).

Il BIM negli edifici viene utilizzato per:

- Progettazione e visualizzazione: consente alle parti interessate di esplorare rappresentazioni virtuali in 3D per valutare la qualità del progetto, la pianificazione degli spazi e l'estetica.
- Il rilevamento e il coordinamento delle interferenze identificano potenziali conflitti tra i sistemi dell'edificio (ad esempio, idraulica, HVAC, strutturale) prima dell'inizio della costruzione, riducendo le rilavorazioni.
- Simulazione e analisi: utilizzate per l'analisi della sostenibilità, come la modellazione energetica degli edifici (BEM) per analizzare il comportamento termico, l'illuminazione e la ventilazione.
- La gestione e la pianificazione della costruzione facilitano la programmazione, la modellazione 4D, la stima dei costi (5D) e la logistica del cantiere.
- Gestione delle strutture: fornisce un modello accurato e ricco di dati che consente ai proprietari di gestire la manutenzione, le riparazioni e le operazioni dopo il completamento dell'edificio.

I vantaggi dell'utilizzo del BIM sono una migliore collaborazione e comunicazione, una significativa riduzione dei costi grazie alla diminuzione degli errori e a una migliore pianificazione, una maggiore efficienza e produttività e una migliore sostenibilità e prestazione energetica.

Gemelli digitali

I gemelli digitali rappresentano la fase successiva dell'evoluzione. A differenza dei modelli BIM, i gemelli digitali sono dinamici e vengono continuamente aggiornati utilizzando dati operativi, analisi e simulazioni per supportare il processo decisionale (Grieves & Vickers, 2017 – Panoramica Springer [3]; Principi CDBB Gemini [4]).



Crediti immagine: innni/Shutterstock.com (<https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8649>)

Un gemello digitale negli edifici è una replica dinamica, virtuale e in tempo reale di una struttura fisica, creata integrando modelli 3D (BIM) con dati dei sensori IoT, IA e simulazioni. Consente il monitoraggio continuo, la manutenzione predittiva e l'ottimizzazione delle prestazioni dell'edificio durante tutto il suo ciclo di vita, dalla progettazione e costruzione alla gestione.

Le caratteristiche dei gemelli digitali sono:

- Replica virtuale: una rappresentazione digitale in 3D che rispecchia la geometria, i componenti e i sistemi dell'edificio fisico.
- Integrazione dei dati in tempo reale: utilizza l'IoT, i sensori e i droni per trasmettere continuamente i dati provenienti dall'asset fisico, consentendo al gemello di riflettere le condizioni del mondo reale.
- Connessione bidirezionale: a differenza dei modelli statici, i gemelli digitali spesso consentono un sistema a ciclo chiuso in cui i dati possono essere reimmessi per controllare o ottimizzare l'edificio fisico.
- Motore analitico: incorpora l'intelligenza artificiale e l'apprendimento automatico per simulare scenari, individuare inefficienze e prevedere le esigenze di manutenzione.

Le applicazioni dei gemelli digitali negli edifici sono incluse in tutte le fasi di costruzione e utilizzo:

- Progettazione e pianificazione: visualizzazione dei progetti, esecuzione di simulazioni e "clash detection" (identificazione dei conflitti tra i sistemi) prima dell'inizio della costruzione.
- Costruzione e gestione del progetto: monitoraggio in tempo reale dello stato di avanzamento del cantiere, miglioramento della sicurezza, potenziamento della collaborazione tra le parti interessate e ottimizzazione della gestione delle risorse.
- Operazioni e manutenzione: previsione dei guasti alle apparecchiature (ad es. sistemi HVAC), riduzione dei tempi di inattività e ottimizzazione del consumo energetico in base ai modelli di occupazione.
- Monitoraggio dello stato strutturale: monitoraggio delle sollecitazioni, delle vibrazioni e dell'integrità strutturale, in particolare per le strutture complesse.
- Sostenibilità e gestione delle strutture: migliorare l'efficienza energetica, monitorare il ciclo di vita dei materiali e gestire le operazioni delle strutture per aumentare il comfort e ridurre gli sprechi.

I gemelli digitali sono considerati un'evoluzione del Building Information Modeling (BIM), che passa da dati statici della fase di progettazione a informazioni operative dinamiche (Figura 1).

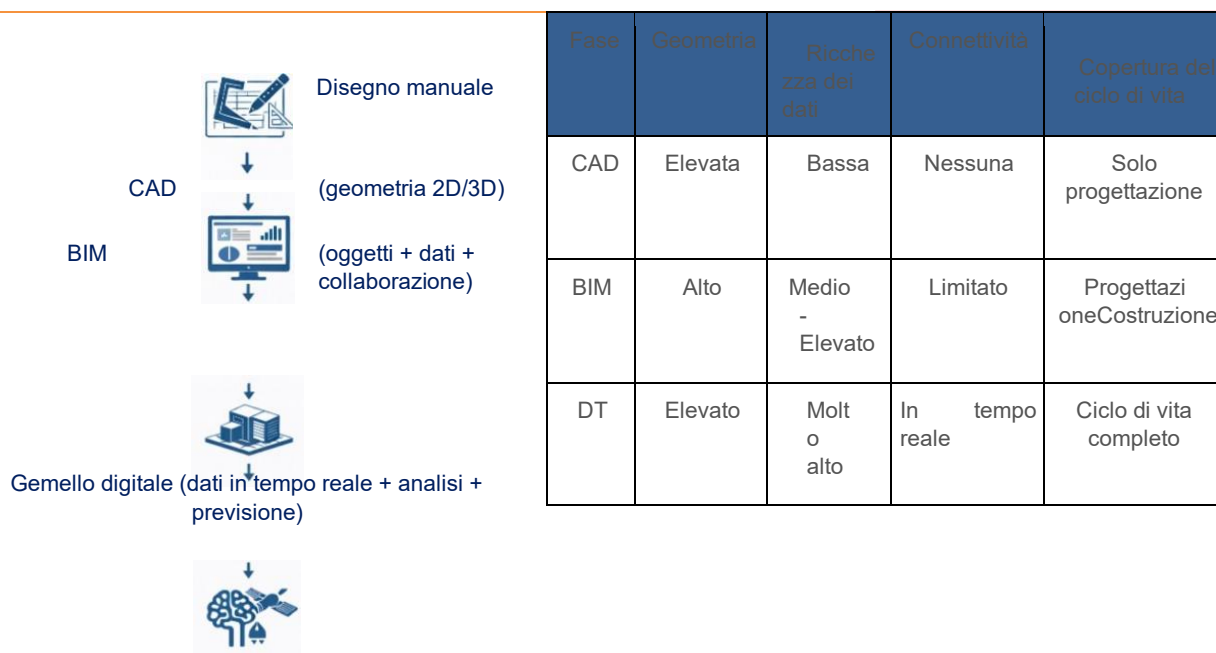


Figura 1:
Cronologia
dell'evoluzione
digitale

Figura 2: Matrice di maturità digitale

Esercizio

Identificate quali strumenti digitali utilizza attualmente la vostra organizzazione e inseriteli nella linea temporale sopra riportata.

Spiegazione dell'esercizio

In questa attività, identificherai gli strumenti digitali che la tua organizzazione utilizza attualmente e li inserirai nella linea temporale fornita.

- Fase 1: Elenca gli strumenti su cui fai affidamento (ad es. software CAD, piattaforme BIM, app di gestione dei progetti, archiviazione cloud, strumenti di comunicazione).
- Fase 2: Annota quando ogni strumento è stato introdotto nella tua organizzazione.
- Fase 3: inseriscili sulla linea temporale in ordine cronologico per mostrare come si è evoluto il tuo ambiente digitale.

2. Definizioni, concetti e tipi di gemelli digitali

Un gemello digitale è una rappresentazione digitale di un bene, un sistema o un processo fisico collegato alla sua controparte fisica attraverso flussi di dati strutturati (Figura 3), che consente analisi, simulazione e ottimizzazione (Grieves & Vickers, 2017 [3]; Tao et al., 2019 [5]).

I gemelli digitali possono essere classificati in base al loro scopo e alla loro maturità (Figura 4), dai gemelli descrittivi e diagnostici ai sistemi predittivi e prescrittivi (Kritzinger et al., 2018 [6]).

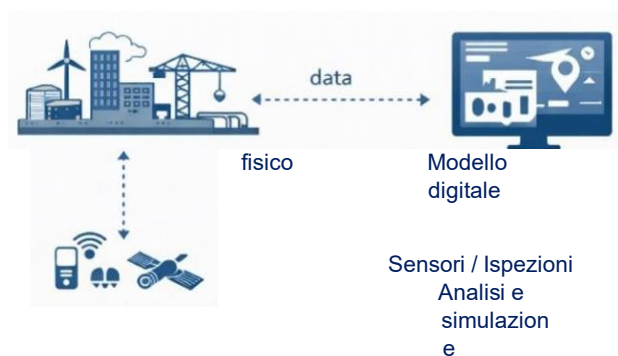


Figura 3: Modello concettuale del Digital Twin

Livello	Capacità	Uso tipico
1	Visualizzazione	Panoramica delle risorse
2	Monitoraggio	Monitoraggio delle prestazioni
3	Previsione	Previsione dei guasti
4	Prescrizione	Automazione delle decisioni

Asset



di maturità

del

Digital Twin

Digital Twin

Esercizio

Classifica un progetto noto in base ai livelli di maturità sopra indicati.

Spiegazione dell'esercizio

In questa attività classificherete un progetto noto in base ai livelli di maturità dei Digital Twin.

- Fase 1: Scegli un progetto che conosci bene (ad esempio, un progetto di un edificio, di un'infrastruttura o di una struttura).
- Fase 2: Esamina l'uso di strumenti digitali e dati nel progetto (CAD, BIM, IoT, simulazione, monitoraggio in tempo reale).
- Fase 3: Confronta queste caratteristiche con i livelli di maturità sopra descritti.
- Fase 4: inserite il progetto nella categoria appropriata, spiegando perché rientra in quel livello. -

3. Componenti fondamentali di un sistema Digital Twin

Un Digital Twin funzionale è costituito da quattro componenti fondamentali: l'asset fisico, un modello digitale, le connessioni dati e un livello di analisi o di intelligence (Figura 5) (Boschert & Rosen, 2016 [\[7\]](#); panoramica ISO 23247 [\[8\]](#)).

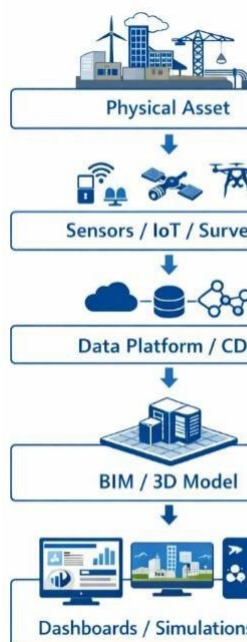


Figura 5: Architettura del

Componente	Ruolo	Strumenti tipici
Asset fisico	Fonte o verità	Edificio, ponte
Livello dati	Acquisizione dati	Sensori, BMS
Livello del modello	Struttura e contesto	BIM, GIS
Analisi	Approfondimenti e decisioni	Dashboard, IA

Figura 6: Matrice delle sistema Digital Twin responsabilità dei componenti

Un sistema Digital Twin per gli edifici (Figura 6) è un framework integrato che collega il mondo fisico e quello virtuale attraverso uno scambio di dati continuo e bidirezionale. A differenza di un modello 3D statico, è un'entità "vivente" che riflette lo stato e il comportamento in tempo reale della sua controparte fisica.

I componenti principali possono essere classificati in quattro livelli principali. Il primo livello è quello fisico (il gemello fisico). Si tratta dell'edificio o dell'infrastruttura nel mondo reale. Comprende:

- Beni fisici: elementi strutturali, sistemi HVAC, illuminazione e ascensori.
- Sensori dell'Internet delle cose (IoT): dispositivi che acquisiscono dati in tempo reale quali temperatura, occupazione, consumo energetico e vibrazioni.
- Attuatori: componenti in grado di ricevere comandi dal Digital Twin per apportare modifiche fisiche, come la regolazione di un termostato o l'azionamento di una valvola.

Il secondo livello è il livello di connettività (il filo digitale). Questo livello funge da "sistema nervoso", facilitando il flusso di dati tra gli ambienti fisici e virtuali:

- Acquisizione dati: gateway IoT e livelli di dati locali che acquisiscono i segnali grezzi dei sensori.
- Protocolli di comunicazione: collegamenti standardizzati (ad es. Bluetooth, ZigBee, cellulare) che garantiscono una trasmissione dei dati sicura e a bassa latenza.
- Middleware: software che fa da ponte tra hardware e applicazioni pulendo, sincronizzando e standardizzando diversi formati di dati.

Il terzo livello è quello virtuale (il modello digitale). La replica digitale in cui i dati vengono contestualizzati e analizzati:

- BIM (Building Information Modeling): fornisce la geometria 3D di base e i dati strutturali dell'edificio.
- Motore di analisi e IA: algoritmi che elaborano i dati per rilevare anomalie, identificare modelli e prevedere le prestazioni future (ad es. guasti alle apparecchiature).
- Motori di simulazione: software utilizzato per eseguire scenari "what-if", come ad esempio verificare in che modo la modifica delle impostazioni HVAC influisca sull'efficienza energetica.

Il quarto livello è il livello applicativo (interazione e interfaccia), in cui gli utenti interagiscono con il sistema per prendere decisioni informate:

- Dashboard: interfacce visive in tempo reale che mostrano gli indicatori chiave di prestazione (KPI) e lo stato di salute del sistema.
- Interfacce immersive: strumenti come la realtà aumentata (AR) o la realtà virtuale (VR) per ispezioni visive e revisioni di progettazione.
- Sistemi di supporto decisionale: strumenti di reporting e avvisi automatici che guidano i facility manager nella manutenzione e nell'ottimizzazione operativa.

L'integrazione di un Digital Twin con un sistema di gestione degli edifici (BMS) trasforma l'edificio da un ambiente reattivo a un ecosistema proattivo e "vivente". Mentre il BMS gestisce tradizionalmente l'automazione quotidiana (come l'accensione e lo spegnimento delle luci), il Digital Twin agisce come un livello di intelligenza che ottimizza tali azioni attraverso simulazioni avanzate e il contesto storico.

- La sinergia tra BMS e Digital Twin consiste nei seguenti ruoli:
- Ruolo del BMS (il controllore tattico): funge da "centro nevralgico" per il controllo centralizzato dei sistemi meccanici ed elettrici, concentrandosi sull'automazione e sull'efficienza operativa.
- Ruolo del Digital Twin (la replica strategica): funge da replica virtuale dinamica e basata sui dati che utilizza l'intelligenza artificiale e l'analisi per l'analisi predittiva e l'ottimizzazione a lungo termine.
- La sinergia: insieme, trasformano la gestione degli edifici da un approccio reattivo e basato su fogli di calcolo a uno proattivo, predittivo e visivamente intuitivo.

Le specifiche capacità di integrazione riguardano:

- Ottimizzazione HVAC: il Digital Twin simula vari setpoint di temperatura e strategie di ventilazione per trovare il perfetto equilibrio tra il comfort degli occupanti e il consumo energetico minimo, quindi invia questi setpoint ottimizzati al BMS.
- Manutenzione predittiva: mentre un BMS potrebbe avvisarti *dopo* il guasto di una pompa, un Digital Twin analizza i dati relativi alle vibrazioni e alle prestazioni per prevedere il guasto con una settimana di anticipo, consentendo ai team di manutenzione di intervenire tempestivamente.
- Gestione energetica: l'integrazione consente il monitoraggio in tempo reale del consumo energetico rispetto ai modelli previsti. Ad esempio, un gemello può utilizzare le previsioni meteorologiche per "preraffreddare" un edificio durante le ore non di punta, riducendo significativamente i costi delle utenze.
- Controllo basato sull'occupazione: sovrapponendo i dati di occupazione in tempo reale al modello BIM, il sistema può automaticamente abbassare l'intensità delle luci o ridurre il flusso d'aria nelle zone sottoutilizzate, ottenendo un risparmio energetico dal 20% al 40%.

I metodi di integrazione tecnica sono i seguenti:

- Protocolli standardizzati: la comunicazione avviene tipicamente tramite protocolli standard del settore come BACnet, Modbus, MQTT e OPC UA, che consentono al Digital Twin di acquisire dati da fornitori di BMS eterogenei.
- Co-simulazione (FMU/FMI): le configurazioni avanzate utilizzano Functional Mock-up Units (FMU) per consentire "handshake" in tempo reale tra modelli termici basati sulla fisica e i controller BMS effettivi.

- Livelli di middleware: viene utilizzato un middleware robusto per pulire e sincronizzare diversi formati di dati (ad esempio, allineando i dati energetici con timestamp ai dati BIM spaziali) prima che vengano analizzati.

Le sfide chiave per l'implementazione riguardano:

- Interoperabilità: molti BMS esistenti sono "scatole nere" proprietarie, il che rende difficile estrarre dati senza gateway o API specializzati.
- Integrità e sicurezza dei dati: la maggiore connettività crea nuovi rischi per la sicurezza informatica. L'implementazione della blockchain per registri di dati sicuri e immutabili è una soluzione emergente per garantire la provenienza e la sicurezza dei dati.
- Costo iniziale elevato: l'integrazione richiede investimenti significativi in sensori, moduli software e formazione del personale.

Esercizio

Individuare le potenziali fonti di dati per un tipico edificio pubblico.

Spiegazione dell'esercizio

In questa attività, mapperai le potenziali fonti di dati per un tipico edificio pubblico.

- Fase 1: Pensate ai diversi sistemi e tecnologie in funzione in un edificio pubblico (ad es. HVAC, illuminazione, sicurezza, contatori energetici, sensori di presenza).
- Fase 2: Identifica il tipo di dati generati da ciascun sistema (temperatura, consumo energetico, registri di accesso, registri di manutenzione, ecc.).
- Fase 3: inserisci queste fonti di dati nel diagramma o nell'elenco fornito, mostrando come contribuiscono all'ecosistema complessivo del Digital Twin.

4. Fonti di dati e livelli di integrazione

I gemelli digitali si basano su molteplici fonti di dati, tra cui modelli BIM, sensori IoT, sistemi di gestione degli edifici, registri delle risorse e tecnologie di acquisizione della realtà. Un'integrazione efficace dipende da una gestione strutturata delle informazioni e da standard aperti (ISO 19650 [\[9\]](#); buildingSMART IFC: [\[10\]](#)).

Nel gemello digitale di un edificio, le fonti di dati forniscono informazioni grezze, mentre i livelli di integrazione trasformano queste informazioni frammentate in una replica virtuale coerente e in tempo reale.

I gemelli digitali acquisiscono diversi tipi di dati per catturare lo stato fisico, operativo e ambientale di un edificio. Le fonti di dati primarie sono:

- Dati ingegneristici statici: progetti di fondazione provenienti dal Building Information Modeling (BIM) o dal CAD, comprese le specifiche dei materiali, i layout geometrici e gli schemi dei sistemi.
- Flussi IoT in tempo reale: sensori che monitorano variabili dinamiche come temperatura, umidità, livelli di CO₂, occupazione e consumo energetico.
- Sistemi operativi: dati provenienti da sistemi di gestione degli edifici (BMS), registri di manutenzione, piattaforme di gestione delle risorse e unità di controllo di ascensori o impianti di climatizzazione.
- Contesto esterno: feed di terze parti quali dati meteorologici locali, prezzi dei servizi pubblici e modelli di traffico che influenzano le prestazioni dell'edificio.

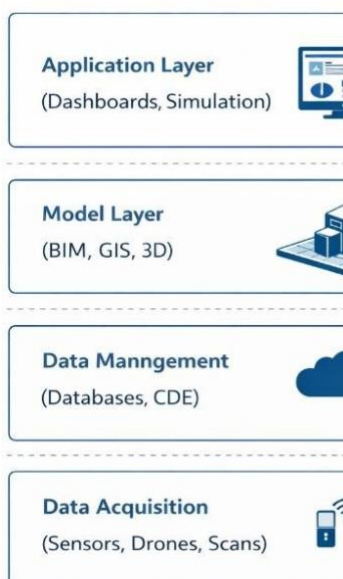


Figura 7: Livelli di integrazione dei dati

Fonte	Frequenza	Precisione	Uso tipico
Sensori	In tempo reale	Medio-alto	Monitoraggio
BIM	Statico	Elevato	Struttura
Scansioni e laser	Periodico	Molto alto	Convalida

Figura 8: Confronto tra integrazione dei dati e le fonti di dati

L'architettura di integrazione funge da pipeline, garantendo che i dati siano sincronizzati e utilizzabili. I livelli di integrazione e elaborazione dei dati (Figura 7) sono:

- Livello di acquisizione dati: raccoglie i dati grezzi tramite protocolli di comunicazione come [MQTT per l'IoT](#), BACnet per i sistemi degli edifici o API REST per servizi web esterni.
- Livello di elaborazione/pulizia dei dati: normalizza i formati di dati eterogenei (ad esempio, convertendo CSV, JSON e log binari proprietari) in una struttura standard, filtrando al contempo il "rumore" o i valori anomali.
- Mappatura e associazione semantica: collega i dati grezzi dei sensori a specifici elementi 3D nel modello virtuale, ad esempio associando una lettura della temperatura a un ID stanza specifico nella [base BIM](#).
- Livello di sincronizzazione: mantiene l'allineamento temporale tra l'asset fisico e il suo gemello, spesso utilizzando "thin loop" (ad esempio, aggiornamenti ogni 1 secondo) per prevenire la "deriva dei dati" in cui il modello virtuale rimane indietro rispetto alla realtà.
- Data Lake/Ambiente federato: un repository centralizzato e indipendente dal fornitore che memorizza sia i dati storici che quelli in tempo reale, fungendo da "unica fonte di verità" per tutte le parti interessate.

Il confronto delle fonti di dati è presentato nella Figura 8. Esercizio

Identificare i rischi legati alla scarsa qualità dei dati.

Spiegazione dell'esercizio

In questa attività, identificherete i rischi legati alla scarsa qualità dei dati nel contesto dei sistemi Digital Twin.

- Fase 1: Pensate alle diverse fonti di dati che alimentano un Digital Twin (ad es. dati dei sensori, modelli BIM, registrazioni di manutenzione, piattaforme IoT).
- Fase 2: Considera cosa potrebbe andare storto se i dati fossero incompleti, obsoleti, incoerenti o imprecisi.
- Fase 3: Elenca i potenziali rischi e rifletti su come potrebbero influire sul processo decisionale, sulle operazioni o

sulle prestazioni del sistema.

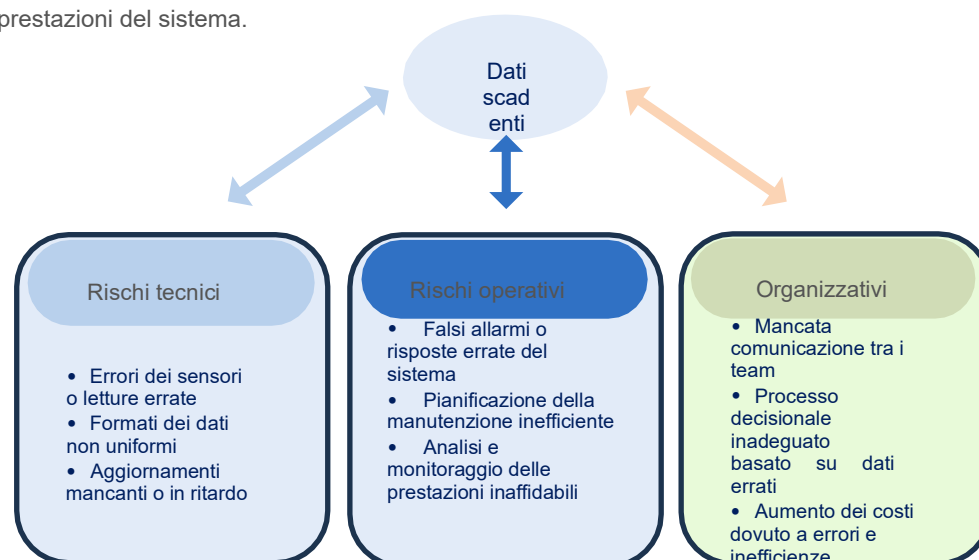


Figura 9. Mappa visiva dei rischi

5. Gemelli digitali lungo il ciclo di vita delle risorse

I gemelli digitali supportano il processo decisionale durante l'intero ciclo di vita delle risorse edilizie, dalla progettazione e costruzione alla gestione operativa e alla fine del ciclo di vita, in linea con i principi di gestione delle risorse (ISO 55000: [\[11\]](#); Principi CDBB Gemini: [\[4\]](#)).

L'evoluzione di un gemello digitale (DT) non è un evento isolato, ma un percorso continuo che rispecchia la traiettoria "dalla culla alla tomba" di un edificio. Mantenendo un filo conduttore digitale, un flusso continuo di informazioni attraverso le diverse fasi, le parti interessate possono abbandonare i silos di dati frammentati e orientarsi verso un approccio gestionale olistico.

Fase 1: Progettazione e pre-costruzione

Durante la fase iniziale, il Digital Twin funge da laboratorio predittivo. Architetti e ingegneri utilizzano il gemello per simulare scenari ipotetici prima ancora che venga posato un solo mattone. Ciò comporta la verifica dell'integrità strutturale, dei modelli di flusso d'aria e del guadagno solare.

A differenza dei modelli 3D tradizionali, in questa fase il gemello integra i dati ambientali e il contesto urbano, consentendo ai progettisti di ottimizzare l'impronta dell'edificio in termini di sostenibilità. Simulando fin dall'inizio il comportamento degli occupanti e la domanda energetica, il gemello garantisce che il progetto finale non sia solo esteticamente gradevole, ma anche efficiente dal punto di vista operativo e conforme agli obiettivi di carbonio a lungo termine.

Fase 2: Costruzione e messa in servizio

Man mano che il progetto si sposta in cantiere, il Digital Twin si trasforma in uno strumento di monitoraggio in tempo reale. Integrando i dati provenienti da droni, scanner laser e dispositivi indossabili, il gemello fornisce un confronto in tempo reale tra la realtà "così come costruita" e il progetto "così come progettato".

- Risoluzione dei conflitti: identifica in tempo reale i conflitti strutturali o gli errori di installazione, riducendo drasticamente le costose rilavorazioni.

- Monitoraggio dei progressi: gli stakeholder possono monitorare le catene di approvvigionamento e la produttività della manodopera attraverso un dashboard centralizzato.
- Il passaggio di consegne: è qui che avviene la transizione più critica. Invece di consegnare una pila di manuali cartacei, l'appaltatore fornisce un "Living Asset", un Digital Twin completamente popolato e pronto per il team operativo.

Fase 3: Operazioni e manutenzione (il ciclo di vita più lungo)

La maggior parte dei costi e dell'impatto ambientale di un edificio si verifica durante la sua vita operativa. Qui, il Digital Twin diventa il sistema nervoso centrale dell'asset. Attingendo dati dai sensori IoT e dai sistemi di gestione degli edifici (BMS), consente:

- Manutenzione predittiva: invece di riparare una caldaia dopo che si è rotta, il gemello analizza le vibrazioni e le tracce di calore per prevedere il guasto con settimane di anticipo.
- Ottimizzazione degli spazi: nell'era del lavoro ibrido, i gemelli analizzano i modelli di occupazione per suggerire riconfigurazioni della planimetria, assicurando che le zone sottoutilizzate vengano spente per risparmiare energia.
- Esperienza utente: gli occupanti possono interagire con il gemello tramite app mobili per regolare l'illuminazione o prenotare sale riunioni, creando un ambiente reattivo che si adatta alle esigenze umane.

Fase 4: Ristrutturazione, riutilizzo e fine vita

Quando un edificio raggiunge la fine del suo utilizzo iniziale previsto, il Digital Twin fornisce le informazioni storiche necessarie per un processo decisionale informato.

Se l'edificio deve essere ristrutturato, il gemello contiene una registrazione perfetta delle "ossature" nascoste della struttura, come tubature, cavi ed elementi portanti, eliminando le congetture dai lavori di ristrutturazione. Se l'edificio deve essere smesso, il gemello funge da passaporto dei materiali. Cataloga ogni componente, dalle travi in acciaio ai pannelli di vetro, facilitando le pratiche di economia circolare identificando quali materiali possono essere recuperati, riciclati o venduti, anziché inviati in discarica.

Il Digital Twin garantisce che le informazioni acquisite durante la progettazione non vadano mai perse, che la precisione della costruzione sia verificata e che l'efficienza delle operazioni sia massimizzata, trasformando in definitiva l'edificio da un oggetto statico a un bene in evoluzione e intelligente.

Matrice di allineamento dei KPI

La mappatura dei KPI del Digital Twin in ogni fase del ciclo di vita rispetto ai principi di gestione delle risorse ISO 55000 e ai Principi Gemini (Fiducia, Valore, Funzione) è presentata nella Matrice di allineamento dei KPI e nella Figura 10.

Fase del ciclo di vita	KPI monitorati	ISO 55000 allineamento	Gemini allineamento ai principi
Fase 1: Progettazione e pre-costruzione	Previsioni della domanda energetica Proiezioni dell'impronta di carbonio Metriche di integrità strutturale Simulazioni del comportamento degli occupanti	Creazione di valore: garantisce che le decisioni di progettazione ottimizzino le prestazioni a lungo termine degli asset Allineamento: integra la sostenibilità e le esigenze degli stakeholder Leadership: guida la strategia patrimoniale nelle fasi iniziali	Fiducia: modellazione trasparente degli impatti sulla sostenibilità Valore: la progettazione ottimizzata riduce i costi del ciclo di vita Funzionalità: garantisce che la progettazione soddisfi gli obiettivi operativi

Fase 2: Costruzione e messa in servizio	Rilevamento delle interferenze Precisione di installazione Prestazioni della catena di fornitura Produttività della manodopera Conformità alle norme di sicurezza	Gestione dei rischi: identifica e mitiga gli errori di costruzione Approccio basato sul ciclo di vita: garantisce una transizione fluida dalla progettazione alla gestione Garanzia: convalida l'integrità degli asset prima della consegna	Fiducia: i dati in tempo reale garantiscono accuratezza e responsabilità Valore: riduce le rilavorazioni e i costi aggiuntivi Funzionalità: fornisce un "bene vivente" pronto per l'operatività
Fase 3: Operazioni e manutenzione	Stato delle apparecchiature Avvisi di manutenzione predittiva Consumo energetico Occupazione e spazio	Valutazione delle prestazioni: monitoraggio continuo dello stato delle risorse Sostenibilità: ottimizza utilizzo di energia e risorse	Fiducia: informazioni affidabili basate sull'IoT Valore: prolunga la vita delle risorse, riduce i tempi di inattività Funzione: migliora la
Fase del ciclo di vita	KPI monitorati	ISO 55000 allineamento ai principi	Gemini allineamento ai principi
	utilizzo Qualità dell'ambiente interno	Miglioramento: consente una manutenzione proattiva e l'adattamento	esperienza ed efficienza operativa
Fase 4: Riqualificazione e fine vita	Completezza del passaporto dei materiali Riciclabilità e potenziale di riutilizzo Fattibilità della riqualificazione Parametri dell'economia circolare	Sostenibilità: supporta l'economia circolare e il recupero delle risorse Approccio basato sul ciclo di vita: gestisce la transizione verso il riutilizzo o lo smaltimento Realizzazione del valore: estrae il massimo valore residuo	Fiducia: registrazioni storiche accurate dei materiali Valore: consente ristrutturazioni e riciclaggio economicamente vantaggiosi Funzione: facilita il riutilizzo adattivo e la dismissione responsabile

La norma ISO 55000 pone l'accento sulla creazione di valore, sul pensiero orientato al ciclo di vita, sulla gestione dei rischi e sulla sostenibilità. Ogni KPI supporta direttamente questi principi garantendo che le risorse siano gestite in modo olistico dalla progettazione allo smaltimento. I principi Gemini (Fiducia, Valore, Funzione) fungono da spina dorsale etica e operativa dei Digital Twin. I KPI garantiscono trasparenza (fiducia), benefici misurabili (valore) e usabilità pratica (funzione). Questa mappatura mostra che i Digital Twin non sono solo strumenti tecnici, ma sono quadri di governance in azione, in linea con gli standard internazionali per una gestione responsabile delle risorse.



Figura 10: Ciclo di vita delle risorse con supporto del Digital Twin

Fase	Livello di valore	Vantaggi tipici
Progettazione	Medio	Progettazione ottimizzata
Costruzione	Medio	Riduzione del rischio
Funzionamento	Elevato	Risparmio sui costi e sull'energia

Figura 11: Contributo di valore per fase del ciclo di vita

Esercizio

Identificate quale fase del ciclo di vita offre il massimo beneficio per la vostra organizzazione.

Spiegazione dell'esercizio

In questa attività, identificherete quale fase del ciclo di vita offre il massimo beneficio per la vostra organizzazione quando si applica la tecnologia Digital Twin.

- Fase 1: Esamina le diverse fasi del ciclo di vita delle risorse (progettazione, costruzione, funzionamento, manutenzione e fine vita).
- Fase 2: Valuta in che modo i Digital Twin potrebbero apportare valore aggiunto in ciascuna fase, ad esempio migliorando la precisione della progettazione, ottimizzando i processi di costruzione, aumentando l'efficienza operativa o supportando la manutenzione predittiva.
- Fase 3: Seleziona la fase in cui ritieni che la tua organizzazione otterrebbe il massimo beneficio e spiega perché.

6. Applicazioni pratiche e casi di studio

Le applicazioni del Digital Twin vengono sempre più implementate attraverso progetti pilota e dimostrativi in edifici, infrastrutture e città, a sostegno di una gestione delle risorse più intelligente e sostenibile (Batty et al., 2012: [\[12\]](#); Commissione Europea Digital Europe: [\[13\]](#)).



Figura 12: Ambiti di
Matrice di applicazione del Digital
confronto dei casi di
Twin

Applicazione	Obiettivo principale	Fonti dei dati	Vantaggio principale
Energy DT	Riduzione del consumo energetico	Sensori, BMS	Risparmio sui costi
Bridge DT	Monitoraggio della sicurezza	Sensori, scansioni	Risparmio sui costi
Campus DT	Gestione delle risorse	BIM, IoT	Efficienza operativa

studio

L'applicazione pratica dei gemelli digitali segue un percorso modulare (Figura 12), in cui l'intelligenza a livello di edificio funge da elemento fondamentale per infrastrutture più ampie ed ecosistemi su scala urbana. Esaminando questi tre ambiti, possiamo vedere come la tecnologia si estenda dalla gestione di una singola stanza all'orchestrazione di interi ambienti urbani.

Edifici: Energia e gestione delle strutture (FM)

Al livello più granulare, il gemello digitale funge da "sistema operativo" per le singole strutture. L'obiettivo principale in questo caso è l'ottimizzazione degli ambienti interni e la conservazione delle risorse meccaniche.

- Ottimizzazione energetica: i Digital Twin si integrano con i sistemi di gestione degli edifici (BMS) per creare un ciclo di feedback. Ad esempio, nei complessi di uffici di fascia alta, i Digital Twin analizzano i dati di occupazione in tempo reale per "modulare" i setpoint degli impianti di climatizzazione nelle zone vuote. Questo sposta la gestione delle strutture da programmi reattivi a una manutenzione guidata dalla domanda, in cui la pulizia e il riscaldamento avvengono solo quando e dove sono necessari.
- Approfondimento del caso di studio: progetti pilota commerciali hanno dimostrato che, utilizzando un gemello per simulare i carichi termici, le strutture possono ridurre il picco della domanda energetica del 15-20%, con un impatto diretto sia sui profitti che sulla rendicontazione delle emissioni di carbonio.

Infrastrutture: monitoraggio dello stato di salute strutturale

Quando applicato alle infrastrutture, come ponti, gallerie e snodi di trasporto, il Digital Twin passa dalla gestione del comfort alla sicurezza e alla longevità.

- Stato strutturale: utilizzando sensori a fibra ottica e accelerometri, il gemello monitora sollecitazioni, deformazioni e vibrazioni in tempo reale. Questo crea una "cartella clinica" del bene, consentendo agli ingegneri di rilevare crepe microscopiche o segni di affaticamento molto prima che siano visibili all'occhio umano.
- Approfondimento sul caso di studio: i principali progetti di ponti utilizzano ora "Digital Shadows" per confrontare i dati di carico reali con le tolleranze di progetto originali. Ciò consente una manutenzione basata sulle condizioni, prolungando il ciclo di vita delle infrastrutture di decenni ed evitando l'enorme costo in termini di emissioni di carbonio derivante da una sostituzione prematura.

Campus e città: sistemi integrati

Al massimo livello di complessità, i Digital Twins aggregano i dati provenienti da più edifici e infrastrutture per gestire campus e città come un unico organismo integrato.

- Sistema di sistemi: in questo ambito, il gemello abbate i silos tra i diversi servizi pubblici. Collega le reti energetiche con i flussi di trasporto e i sistemi di gestione idrica. Ad esempio, un gemello su scala urbana può simulare come un improvviso temporale influenzerà sia l'infrastruttura di drenaggio che il flusso del traffico nelle strade circostanti.
- Approfondimento sul caso di studio: progetti come Virtual Singapore o lo Smart Campus dell'Università di Cambridge utilizzano questi gemelli per testare la resilienza urbana. Visualizzando il "sistema integrato", i pianificatori possono identificare come un'interruzione di corrente in un settore possa ripercuotersi su un altro, consentendo la progettazione di ambienti urbani più robusti e in grado di autoripararsi.

Esercizio

Individua nella tabella un'applicazione che potrebbe realisticamente essere sperimentata nella tua organizzazione.

Spiegazione dell'esercizio

In questa attività, identificherete un'applicazione dalla tabella che potrebbe realisticamente essere sperimentata nella vostra organizzazione.

- Fase 1: Esamina le applicazioni elencate nella tabella (ad esempio, manutenzione predittiva, ottimizzazione energetica, monitoraggio dell'occupazione, pianificazione logistica).
- Fase 2: Valuta quale di queste applicazioni sia più pertinente alle attuali esigenze, alle risorse e al livello di maturità digitale della tua organizzazione.
- Fase 3: Seleziona un'applicazione che potrebbe essere sperimentata e spiega perché è fattibile, quali vantaggi potrebbe apportare e quali limitazioni potrebbero dover essere gestite
- .

7. Il ruolo dei droni e della scansione laser

Le tecnologie di acquisizione della realtà, quali droni, scansione laser e fotogrammetria, forniscono rappresentazioni accurate e aggiornate delle risorse fisiche e supportano l'aggiornamento e la convalida dei gemelli digitali (Kritzinger et al., 2018 [6]; Tao et al., 2019 [5]).

I Digital Twin si basano su dati accurati, tempestivi e completi per rappresentare le risorse fisiche in un ambiente virtuale. Uno dei fattori più critici per garantire questa accuratezza è la tecnologia di acquisizione della realtà. Tra i metodi più utilizzati vi sono i droni, la scansione laser e la fotogrammetria. Questi strumenti costituiscono la base per l'aggiornamento, la convalida e la manutenzione dei Digital Twin, garantendo che la rappresentazione digitale rimanga allineata con la risorsa del mondo reale.

La cattura della realtà si riferisce al processo di raccolta di informazioni precise sul mondo fisico e alla loro conversione in formati digitali. Nell'ambiente costruito, ciò significa spesso catturare la geometria, le condizioni e il contesto di edifici, infrastrutture o paesaggi. Tecnologie come i droni e gli scanner laser hanno trasformato questo processo, rendendolo più veloce, più sicuro e più accurato rispetto ai tradizionali rilievi manuali.

Droni

I droni sono sempre più utilizzati per ispezioni e monitoraggio. Dotati di telecamere ad alta risoluzione, sensori termici o unità LiDAR, i droni possono ispezionare rapidamente tetti, facciate, ponti e altre aree difficili da raggiungere. La loro mobilità consente loro di coprire vaste aree in breve tempo, riducendo la necessità di impalcature o arrampicate manuali. Per i Digital Twin, i droni forniscono immagini e misurazioni aggiornate che possono essere integrate nei modelli per la pianificazione della manutenzione, i controlli di sicurezza o l'analisi delle prestazioni energetiche. I vantaggi sono evidenti: velocità, flessibilità e riduzione dei rischi per gli ispettori umani. Tuttavia, i droni presentano anche dei limiti. Le condizioni

meteorologiche, le normative di volo e la durata della batteria possono limitarne l'uso. Inoltre, mentre i droni eccellono nella cattura visiva, potrebbero non fornire sempre lo stesso livello di precisione geometrica della scansione laser.

Scansione laser

La scansione laser, spesso denominata LiDAR (Light Detection and Ranging), offre una precisione senza pari nell'acquisizione della geometria delle risorse fisiche. Uno scanner laser emette impulsi di luce e misura il tempo impiegato per il loro ritorno, creando una densa "nuvola di punti" che rappresenta le superfici in tre dimensioni. Questo metodo è particolarmente utile per strutture complesse, spazi interni e aree in cui è richiesta una precisione millimetrica. Per i Digital Twin, la scansione laser garantisce che il modello digitale rifletta le dimensioni e le condizioni esatte del bene, supportando attività quali il rilevamento delle interferenze, la pianificazione delle ristrutturazioni e l'analisi strutturale. I limiti della scansione laser includono costi più elevati, la necessità di competenze specialistiche e tempi di configurazione più lunghi rispetto ai droni.

Fotogrammetria

La fotogrammetria integra questi metodi utilizzando fotografie sovrapposte per generare modelli 3D. Sebbene meno precisa della scansione laser, la fotogrammetria è conveniente e può essere eseguita con fotocamere standard, comprese quelle montate sui droni. È particolarmente utile per la mappatura e la visualizzazione su larga scala, fornendo texture realistiche e informazioni contestuali.

Insieme, queste tecnologie formano un kit di strumenti per la cattura della realtà. La scelta del metodo dipende dai requisiti specifici del progetto. Ad esempio, un'ispezione rapida del tetto può essere meglio eseguita dai droni, mentre un piano di ristrutturazione dettagliato per un edificio storico può richiedere la scansione laser. In molti casi, la combinazione dei metodi produce i risultati migliori, utilizzando i droni per una copertura rapida e la scansione laser per la precisione.

Il ruolo della cattura della realtà nei Digital Twin va oltre la creazione iniziale. Le risorse si evolvono nel tempo a causa dell'usura, della manutenzione o delle modifiche. La cattura continua o periodica garantisce che il Digital Twin rimanga un modello vivente, che riflette lo stato attuale della risorsa. Questo aggiornamento dinamico è ciò che rende i Digital Twin potenti strumenti per il processo decisionale, la gestione del rischio e l'ottimizzazione a lungo termine delle risorse.

Da un punto di vista organizzativo, l'adozione delle tecnologie di acquisizione della realtà richiede la considerazione di competenze, costi e flussi di lavoro. I team devono essere formati per utilizzare i droni in modo sicuro, elaborare le nuvole di punti e integrare i dati nei sistemi BIM o di gestione delle strutture. Gli investimenti in attrezzature e software devono essere bilanciati rispetto ai benefici attesi, quali la riduzione dei costi di ispezione, una maggiore sicurezza e decisioni più informate.

In sintesi, i droni, la scansione laser e la fotogrammetria sono fattori abilitanti essenziali dei Digital Twins nell'ambiente costruito (Figura 14). Ciascun metodo offre vantaggi distinti e presenta limitazioni specifiche. Comprendere questi compromessi consente alle organizzazioni di selezionare la tecnologia giusta per il compito giusto, garantendo che i loro Digital Twins siano accurati, affidabili e di valore per tutto il ciclo di vita dell'asset.

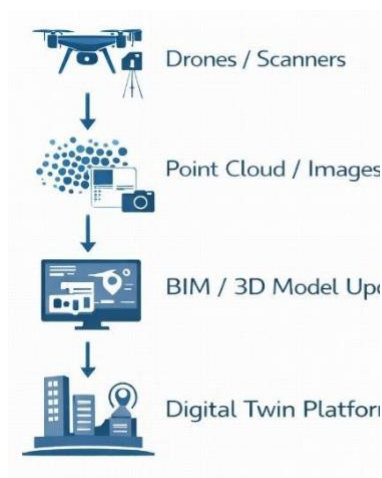


Figura 14: Flusso di lavoro dalla scansione laser e gemello digitale

Criteri	Droni	Scansione laser	Scansione laser	Fotogrammetria
Criteri	Aree estese	Locale / dettagliato	✓ Aree da medie a grandi	✓ Aree da medie a grandi
Copertura	✓ Media	✓ Molto elevata	✓ Elevata	✓ Elevata
Precisione	✓ Molto veloce	✓ Medio	✓ Medio	✓ Media
Velocità	✓ Molto veloce	✓ Mappe 2D/3D	✓ Nubi di punti 3D dense	✓ Modelli 3D con texture
Output dati	✓ Mappe 2D/3D	✓ Modelli as-built, Rilievi	✓ Rilievo di fine lavori, Misurazioni	✓ Mappatura topografica
Uso tipico	✓ Ispezioni, rilievi	✓	✓ Mappatura topografica	✓ Mappatura topografica, modellazioni e 3D modellazione

Figura 15: Confronto tra drone, cattura della realtà al fotogrammetria

Esercizio

Decidete quale tecnologia sia più appropriata per le ispezioni dei tetti e spiegate perché.

Spiegazione dell'esercizio

In questa attività dovrai decidere quale tecnologia sia più appropriata per le ispezioni dei tetti, se i droni o la scansione laser, e spiegare perché.

- Fase 1: Esamina le caratteristiche di entrambe le tecnologie.
 - o Droni: forniscono vedute aeree, un rapido accesso alle aree difficili da raggiungere e immagini in tempo reale.
 - o Scansione laser: offre misurazioni 3D estremamente accurate, una geometria dettagliata e una documentazione precisa.
- Fase 2: Considerate le esigenze specifiche delle ispezioni dei tetti nella vostra organizzazione (ad es. sicurezza, velocità, livello di dettaglio, costo).
- Fase 3: Scegli la tecnologia che meglio si adatta a tali esigenze e spiega il tuo ragionamento.

8. Sfide, rischi e limiti

Nonostante il loro potenziale, i gemelli digitali comportano rischi legati alla tecnologia, alla governance dei dati, alla preparazione organizzativa e alla sicurezza informatica, che richiedono approcci strutturati di mitigazione (Commissione europea, 2020 – Strategia dell'UE sui dati [\[13\]](#)).

I Digital Twin offrono enormi prospettive per l'ambiente costruito, proponendo nuovi modi per gestire le risorse, migliorare l'efficienza e supportare un processo decisionale informato. Tuttavia, la loro adozione non è priva di sfide. Per garantire un'implementazione di successo, le organizzazioni devono riconoscere e affrontare i rischi che accompagnano i progetti di Digital Twin. Questi rischi rientrano in quattro grandi categorie: tecnici, relativi ai dati, organizzativi e legali/di sicurezza. Comprendere ciascuna categoria, insieme al suo potenziale impatto e alle strategie di mitigazione, è essenziale per costruire iniziative di Digital Twin resilienti e sostenibili (Figura 16).

Rischi tecnici

I rischi tecnici derivano dalla complessità dell'integrazione di più sistemi e tecnologie. I Digital Twin dipendono dalla perfetta interazione tra sensori IoT, modelli BIM, piattaforme cloud e strumenti di analisi. Una scarsa integrazione tra questi sistemi può portare a rappresentazioni inaccurate o incomplete dell'asset fisico. Ad esempio, se i dati dei sensori non si sincronizzano con il modello BIM, il Digital Twin potrebbe fornire informazioni fuorvianti. L'impatto di tali errori è elevato, poiché minano la fiducia nel modello e possono portare a decisioni errate. Mitigazione: È fondamentale stabilire standard tecnici chiari e protocolli di interoperabilità. Le organizzazioni dovrebbero adottare standard di settore per lo scambio di dati e investire in test approfonditi prima di scalare i progetti.

Rischi legati ai dati

I dati sono alla base dei Digital Twin, ma rappresentano anche una delle principali fonti di rischio. Una scarsa qualità dei dati, come informazioni mancanti, incoerenti o obsolete, può compromettere l'accuratezza del modello. Senza dati affidabili, anche il Digital Twin più avanzato non riuscirà a fornire valore. L'impatto di una scarsa qualità dei dati è elevato, poiché influisce direttamente sulla credibilità delle informazioni e delle decisioni.

Mitigazione: sono essenziali solidi quadri di governance dei dati. Ciò include regole chiare per la raccolta, la convalida, l'archiviazione e l'accesso ai dati. Le organizzazioni dovrebbero inoltre assegnare la responsabilità della gestione dei dati per garantire la responsabilità e la coerenza.

Rischi organizzativi

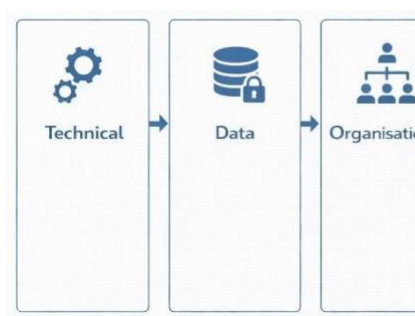
L'adozione del Digital Twin richiede la preparazione dell'organizzazione, e spesso emergono rischi quando le competenze, la cultura o i processi non sono allineati con le nuove tecnologie. Una sfida comune è il divario di competenze: il personale potrebbe non avere esperienza nell'analisi dei dati, nell'integrazione dell'IoT o nei flussi di lavoro BIM. Anche la resistenza al cambiamento può rallentare l'adozione, in particolare se i dipendenti percepiscono i Digital Twin come dirompenti. L'impatto di questi rischi è moderato ma significativo, poiché possono ritardare i progetti e ridurre l'efficacia.

Mitigazione: la formazione e lo sviluppo delle capacità sono strategie chiave. Le organizzazioni dovrebbero investire nell'aggiornamento professionale del personale, favorendo la collaborazione interdisciplinare e promuovendo una cultura dell'innovazione. Anche il sostegno della leadership e una comunicazione chiara sui vantaggi dei Digital Twin possono ridurre la resistenza.

Rischi legali e di sicurezza

I Digital Twins spesso coinvolgono dati sensibili, rendendoli vulnerabili a rischi legali e di sicurezza informatica. Accessi non autorizzati, violazioni dei dati o manipolazioni dolose dei modelli possono avere gravi conseguenze, specialmente nelle infrastrutture critiche. La conformità alle normative sulla protezione dei dati, come il GDPR, aggiunge un ulteriore livello di complessità. L'impatto di questi rischi è elevato, poiché possono minare la fiducia, comportare sanzioni finanziarie e compromettere sicurezza.

Mitigazione: è essenziale implementare controlli di sicurezza rigorosi. Ciò include la crittografia, la gestione degli accessi, audit regolari e un monitoraggio continuo. Anche la conformità legale deve essere integrata nella pianificazione del progetto, garantendo che l'utilizzo dei dati sia in linea con i requisiti normativi.



Categoria di rischio	Esempio di rischio	Impatto	Mitigazione
Tecnico	Integrazione dei punti	Elevato	Standard
Dati	Bassa qualità dei dati	Alta	Governance

Categoria di rischio	Esempio di rischio	Impatto	Mitigazione
Tecnica	Integrazione dei punti	Elevato	Standard
Dati	Bassa qualità dei dati	Alta	Governance

Figura 16. Categorie di
rischio del Digital
Twin

Figura 17. Matrice dei rischi

Esercizio

Classificate i rischi in base alla probabilità nel vostro contesto.

Spiegazione

In questa attività classificherete i rischi relativi ai progetti Digital Twin in base alla loro probabilità nel contesto della vostra organizzazione.

- Fase 1: Esamina le principali categorie di rischio (ad es. rischi tecnici, rischi operativi, rischi organizzativi, rischi finanziari).
- Fase 2: Valuta la probabilità che ciascun rischio si verifichi nella tua organizzazione, sulla base dei sistemi, dei processi e delle risorse attuali.
- Fase 3: Classifica i rischi dal più probabile al meno probabile e spiega il tuo ragionamento. -

9. Requisiti di preparazione organizzativa e competenze

I Digital Twin richiedono nuove competenze in ruoli tecnici, manageriali e strategici, nonché l'impegno della leadership e la gestione del cambiamento (CDBB, 2020 [\[4\]](#); Commissione Europea Digital Europe [\[13\]](#)).

I Digital Twin non sono solo innovazioni tecnologiche, ma trasformazioni organizzative. Il loro successo dipende dalla capacità delle organizzazioni di allineare strategia, processi, competenze e leadership alle esigenze di questo nuovo paradigma. Sebbene l'infrastruttura tecnica sia essenziale, sono spesso i fattori umani e organizzativi a determinare il successo o il fallimento di un progetto di Digital Twin.

I Digital Twin richiedono nuove competenze in ruoli tecnici, manageriali e strategici. Richiedono inoltre l'impegno della leadership e cambiamenti gestionali efficaci. Per strutturare questa complessità, possiamo pensare alla prontezza organizzativa in termini di livelli di capacità.

Strategia e leadership

Al livello più alto, la leadership deve articolare una visione chiara di come i Digital Twin sosterranno gli obiettivi organizzativi. Ciò implica l'allineamento dei progetti con strategie più ampie quali la sostenibilità, l'efficienza o l'innovazione. L'impegno della leadership garantisce l'allocatione delle risorse, la definizione delle priorità e il raggiungimento del consenso culturale. Senza una direzione strategica, le iniziative relative ai Digital Twin rischiano di diventare progetti pilota isolati con un impatto limitato.

Processi e governance

Il secondo livello si concentra sui processi organizzativi e sui quadri di governance. I Digital Twin si basano su flussi di lavoro strutturati per la raccolta, la convalida e l'integrazione dei dati. La governance garantisce che le responsabilità siano chiare, che gli standard siano applicati e che venga mantenuta la conformità alle normative. Processi efficaci supportano anche la scalabilità, consentendo ai Digital Twin di passare da progetti pilota all'adozione a livello aziendale.

Competenze e tecnologia

Alla base, le organizzazioni devono sviluppare le competenze tecniche e umane necessarie per gestire i Digital Twin. Ciò include competenze in BIM, integrazione IoT, analisi dei dati e sistemi di monitoraggio. Altrettanto importanti sono le competenze trasversali come la collaborazione, la risoluzione dei problemi e l'adattabilità. La tecnologia fornisce gli strumenti, ma sono necessarie persone qualificate per interpretare i dati, generare intuizioni e agire di conseguenza.



Figura 18. Livelli di capacità organizzativa

Ruolo	Competenze chiave	Livello
Manager	Strategia, governance	Ingegnere
Ingegnere	BIM, dati	Alto
Operatore	Monitoraggio	Medio

Figura 19. Matrice delle competenze del Digital Twin

La Figura 19 illustra come i diversi ruoli contribuiscano al successo del Digital Twin. I manager devono comprendere la strategia e la governance, assicurando che i progetti siano in linea con gli obiettivi organizzativi. Gli ingegneri necessitano di competenze tecniche di alto livello in BIM e gestione dei dati, poiché sono responsabili della creazione e della manutenzione dell'infrastruttura del Digital Twin. Gli operatori svolgono un ruolo cruciale nel monitoraggio e nella manutenzione dei sistemi, garantendo che i flussi di dati rimangano accurati e affidabili.

Diverse sfide possono ostacolare la preparazione dell'organizzazione:

- Lacune nelle competenze: molte organizzazioni non dispongono di personale con competenze avanzate nell'analisi dei dati o nell'integrazione del BIM.
- Resistenza culturale: i dipendenti potrebbero essere riluttanti ad adottare nuovi flussi di lavoro o a fidarsi dei sistemi digitali.
- Incertezza della leadership: senza una chiara direzione strategica, i progetti potrebbero perdere di vista l'obiettivo o non riuscire a ottenere finanziamenti.
- Frammentazione dei processi: una governance debole può portare a pratiche di gestione dei dati incoerenti e a modelli inaffidabili.

Queste sfide evidenziano l'importanza di un rafforzamento strutturato delle capacità. Programmi di formazione, collaborazione interdisciplinare e coinvolgimento della leadership sono essenziali per superare gli ostacoli.

La preparazione organizzativa non è un requisito una tantum, ma un processo continuo. Man mano che i Digital Twin si evolvono, devono evolversi anche le competenze, i processi e le strategie che li supportano. Il successo dipende dal considerare i Digital Twin non come tecnologie isolate, ma come parte di una più ampia trasformazione organizzativa.

Per studenti e professionisti, la lezione chiave è che l'adozione dei Digital Twin richiede un approccio a più livelli: una leadership forte per stabilire la direzione, una governance per garantire l'affidabilità e competenze per gestire la tecnologia in modo efficace. Rafforzando ogni livello, le organizzazioni possono sviluppare la resilienza e le capacità necessarie per sbloccare il pieno potenziale dei Digital Twin nell'ambiente costruito.

Esercizio

Esegui un'analisi di base delle lacune nelle competenze utilizzando la matrice sopra riportata.

Spiegazione

In questa attività, effettuerete un'analisi di base delle lacune nelle competenze utilizzando la matrice fornita.

- Fase 1: Esaminare le competenze elencate nella matrice (ad esempio, gestione dei dati, competenza BIM, integrazione IoT, analisi, gestione del cambiamento).
- Fase 2: Valuta l'attuale livello di competenza della tua organizzazione per ciascuna competenza (ad es. elevato, moderato, limitato).
- Fase 3: Confronta le capacità attuali con il livello richiesto per un'implementazione di successo del Digital Twin.
- Fase 4: Identifica dove si trovano le lacune maggiori e prendine nota.

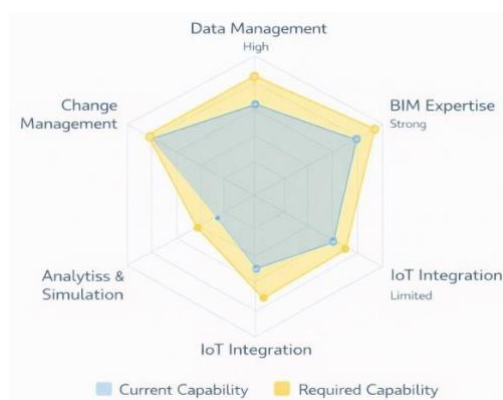


Figura 20. Grafico radar delle lacune nelle competenze

10. Strategie per l'introduzione dei Digital Twin nella pratica e nella formazione

L'introduzione dei Digital Twin è più efficace se affrontata in modo incrementale attraverso progetti pilota, il coinvolgimento delle parti interessate e la formazione continua, in linea con le strategie europee di trasformazione digitale [3]; [13].

I Digital Twin rappresentano una potente innovazione per l'ambiente costruito, ma la loro adozione richiede un'attenta pianificazione e approcci strutturati. Le organizzazioni che tentano di implementare i Digital Twin senza una chiara roadmap spesso devono affrontare sfide quali sistemi frammentati, obiettivi poco chiari o resistenza da parte delle parti interessate. Per evitare queste insidie, è essenziale seguire una strategia per fasi che crei consapevolezza, testi i concetti attraverso progetti pilota, integri i sistemi, scali le soluzioni di successo e, in ultima analisi, ottimizzi le prestazioni.

L'introduzione dei Digital Twins è più efficace se affrontata in modo incrementale. Anziché tentare una implementazione su larga scala fin dall'inizio, le organizzazioni dovrebbero iniziare con piccoli passi gestibili che consentano loro di apprendere, adattarsi e acquisire fiducia. Questo approccio incrementale è in linea con le strategie europee di trasformazione digitale, che sottolineano i progetti pilota, il coinvolgimento delle parti interessate e la formazione continua come fattori chiave di successo (Grieves & Vickers, 2017; Commissione Europea Digital Europe).

La roadmap per l'adozione dei Digital Twin comprende 5 fasi.

1. Sensibilizzazione

La prima fase consiste nel creare consapevolezza tra le parti interessate. Campagne di sensibilizzazione, workshop e dimostrazioni aiutano a spiegare cosa sono i Digital Twin, perché sono importanti e come possono supportare gli obiettivi organizzativi. Questa fase è fondamentale per assicurarsi il sostegno della leadership e ridurre la resistenza al cambiamento.

2. Progetto pilota

Una volta raggiunta la consapevolezza, le organizzazioni dovrebbero avviare progetti pilota su piccola scala. Questi progetti si concentrano su una singola risorsa o un singolo processo, consentendo ai team di sperimentare l'acquisizione, l'integrazione e la visualizzazione dei dati. I progetti pilota forniscono lezioni preziose sulla fattibilità tecnica, la qualità dei dati e la preparazione organizzativa.

3. Integrazione

I progetti pilota di successo aprono la strada all'integrazione. In questa fase, i Digital Twin vengono collegati ai sistemi esistenti, come il BIM, le piattaforme IoT e gli strumenti di gestione delle strutture. L'integrazione garantisce

che i flussi di dati siano coerenti e che il Digital Twin diventi parte delle operazioni quotidiane piuttosto che un esperimento a sé stante.

4. Scalabilità

Dopo l'integrazione, le organizzazioni possono espandere i Digital Twin su più risorse o siti. La scalabilità comporta la replica di approcci di successo, la standardizzazione dei processi e la garanzia dell'interoperabilità tra i sistemi. Questa fase richiede una governance forte e strategie chiare per gestire la complessità.

5. Ottimizzazione

La fase finale si concentra sul miglioramento continuo. Le organizzazioni perfezionano i propri Digital Twin incorporando analisi avanzate, modelli predittivi e approfondimenti basati sull'intelligenza artificiale. L'ottimizzazione garantisce che i Digital Twin offrano il massimo valore, supportando l'efficienza, la sostenibilità e l'innovazione a lungo termine.



Fase	Focus	Azioni chiave
Fase pilota	Apprendimento	DT su piccola scala
Integrazione	Allineamento	Collegamento dei sistemi
Scalabilità	Espansione	Replica

Consapevolezza **Progetto pilota**
Integrazione
Scalabilità **Ottimizzazione**

Figura

21.

Roadmap per
l'adozione del
Digital
Twin

Figura 22. Matrice della

strategia di adozione

La Figura 21 evidenzia la progressione strutturata dall'apprendimento attraverso i progetti pilota, all'allineamento dei sistemi durante l'integrazione, fino all'espansione attraverso la scalabilità. Ogni fase ha un obiettivo specifico e una serie di azioni, garantendo che l'adozione sia gestibile e sostenibile.

La roadmap incrementale sottolinea che l'adozione dei Digital Twin non è un evento isolato, ma un percorso. Ogni fase si basa su quella precedente, consentendo alle organizzazioni di apprendere, adattarsi e rafforzare le proprie capacità. La sensibilizzazione garantisce che le parti interessate comprendano la visione. I progetti pilota forniscono esperienza pratica. L'integrazione inserisce i Digital Twin nei flussi di lavoro. La scalabilità ne amplia la portata. L'ottimizzazione garantisce un miglioramento continuo.

Per studenti e professionisti, la lezione chiave è che gli approcci strutturati riducono il rischio e aumentano le probabilità di successo. Seguendo una roadmap e allineando le strategie di adozione alle priorità organizzative, i Digital Twin possono passare dal concetto alla pratica, fornendo valore reale nell'ambiente costruito.

Esercizio

Delineare una roadmap realistica di un anno per i Digital Twin per un asset selezionato.

Spiegazione

In questa attività, delineerete una roadmap realistica di un anno per l'introduzione di un Digital Twin per un bene selezionato (ad esempio, un edificio, una macchina o un componente infrastrutturale).

- Fase 1: Scegli un asset rilevante per la tua organizzazione.

- Fase 2: Suddividi la roadmap in fasi distribuite nell'arco dell'anno (ad esempio, preparazione, fase pilota, scalabilità, valutazione).
- Fase 3: Definire le azioni chiave in ciascuna fase, quali la raccolta dei dati, l'integrazione tecnologica, la formazione e il coinvolgimento delle parti interessate.
- Fase 4: Assicuratevi che la roadmap sia realistica tenendo conto delle risorse disponibili, delle competenze e della preparazione dell'organizzazione.

11. Esercizi

Scegli la risposta migliore per ogni domanda. Le soluzioni sono riportate alla fine di questa sezione.

1. Qual è la differenza principale tra il BIM e un Digital Twin?
A) I modelli BIM sono sempre in 2D.
B) Il BIM funziona solo durante la costruzione.
C) I Digital Twin integrano i dati operativi in tempo reale provenienti dall'asset fisico.
D) I Digital Twin non utilizzano modelli 3D.
2. Quale tecnologia viene utilizzata principalmente per acquisire la geometria 3D altamente accurata degli edifici?
A) Scansione laser
B) Software per fogli di calcolo
C) Strumenti di elaborazione testi
D) Sistemi di posta elettronica
3. Qual è il ruolo principale dei sensori IoT in un sistema Digital Twin?
A) Creare disegni
B) Per raccogliere dati in tempo reale dalle risorse fisiche
C) Sostituire gli ingegneri
D) Generare permessi di costruzione
4. Cosa significa CDE negli ambienti di costruzione digitale?
A) Central Data Engine
B) Ambiente comune dei dati
C) Motore di progettazione edilizia
D) Scambio digitale tramite computer
5. Quale fase del ciclo di vita ottiene tipicamente il massimo valore a lungo termine dai Digital Twins?
A) Fase di progettazione
B) Fase di costruzione
C) Fase di gestione e manutenzione
D) Fase di approvvigionamento

6. Che cos'è una nuvola di punti?

- A)** Una raccolta di punti spaziali che rappresentano la geometria del mondo reale **B)** Un tipo di archiviazione su cloud
C) Un software BIM
D) Un protocollo di rete

7. Quale organizzazione promuove standard aperti come l'IFC per l'interoperabilità BIM? **A)** buildingSMART International

- B)** NASA
C) Banca Mondiale
D) UNESCO

8. Che cos'è la manutenzione predittiva? **A)** Riparare i sistemi solo dopo un guasto

- B)** Pianificazione della manutenzione in modo casuale
C) Utilizzare l'analisi dei dati per anticipare i guasti prima che si verifichino **D)** Eliminare completamente la manutenzione

9. Quale tecnologia è più adatta per ispezioni aeree su larga scala di edifici o infrastrutture?

- A)** Droni (UAV)
B) Disegno manuale
C) Comunicazione via e-mail
D) Analisi su fogli di calcolo

10. Qual è lo scopo del livello di analisi del Digital Twin? **A)** Analizzare i dati e supportare il processo decisionale

- B)** Per archiviare i materiali fisici
C) Sostituire i modelli BIM
D) Eliminare la raccolta dei dati

Risposte

1) C 2) A 3) B 4) B 5) C 6) A 7) A 8) C 9) A 10) A

12. Riferimenti

- <https://www.iso.org/standard/68078.html>
- <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/>
- https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- <https://www.cdbb.cam.ac.uk/what-we-do/the-gemini-principles>
- <https://ieeexplore.ieee.org/document/8703136>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318315298>
- https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- <https://www.iso.org/standard/84626.html>
- <https://www.iso.org/standard/68078.html>

Argomento 2: Intelligenza e tecnologie di realtà aumentata e per ambienti costruiti più intelligenti

Obiettivi di apprendimento, risultati e glossario

Questo breve corso mira a sviluppare consapevolezza, comprensione e preparazione alle tecnologie digitali avanzate nell'ambiente costruito. Affronta le attuali lacune di conoscenza ed esperienza pratica relative ai Digital Twin, all'IA e alla loro integrazione con il BIM e altri strumenti emergenti (ad esempio, droni, scansione laser, AR).

Obiettivi di apprendimento

- Identificare le tecniche di IA applicabili al BIM, ai gemelli digitali e alla gestione delle risorse.
- Comprendere come l'IA supporti la manutenzione predittiva, la gestione dei rischi e l'ottimizzazione nell'ambiente costruito.
- Riconoscere il ruolo della visione artificiale nel monitoraggio delle costruzioni e delle infrastrutture.
- Comprendere le tecnologie AR e VR e i loro usi pratici nel corso del ciclo di vita delle risorse.
- Valutare il ruolo dell'IA nell'apprendimento, nello sviluppo delle competenze e nel rafforzamento delle capacità organizzative.
- Riflettere sulle implicazioni etiche, giuridiche e organizzative dell'adozione dell'IA.
- Definire strategie realistiche e graduali per l'implementazione dell'IA e del Digital Twin.

Risultati di apprendimento

Dopo aver completato l'Argomento 2, i partecipanti saranno in grado di:

1. Spiegare i concetti chiave e la terminologia relativi all'Intelligenza Artificiale (IA) e descrivere come le tecnologie di IA supportano il processo decisionale basato sui dati nell'ambiente costruito.
2. Identificare le tecniche di IA rilevanti per l'edilizia e la gestione degli asset, tra cui l'analisi predittiva, gli algoritmi di ottimizzazione, l'elaborazione del linguaggio naturale e la visione artificiale.
3. Descrivere come l'IA possa migliorare i flussi di lavoro BIM e Digital Twin, in particolare per il monitoraggio, la manutenzione predittiva e l'ottimizzazione delle prestazioni.
4. Distinguere tra Realtà Aumentata (AR) e Realtà Virtuale (VR) e valutarne le applicazioni nella revisione del progetto, nella guida alla costruzione, nella formazione e nelle attività di manutenzione.
5. Valutare le considerazioni etiche, legali e organizzative associate all'adozione dell'IA, tra cui la governance dei dati, la trasparenza e le strategie di implementazione responsabile.

Glossario

Intelligenza artificiale (IA)	Sistemi informatici in grado di svolgere compiti che normalmente richiedono l'intelligenza umana, come l'apprendimento, il ragionamento, il riconoscimento di modelli e il supporto decisionale.
Apprendimento automatico (ML)	Un sottoinsieme dell'IA in cui i sistemi apprendono modelli dai dati e migliorano le loro prestazioni senza essere esplicitamente programmati.
Apprendimento profondo	Una forma avanzata di apprendimento automatico che utilizza reti neurali a più livelli per analizzare dati complessi come immagini o discorsi.
Reti neurali	Modelli computazionali ispirati al cervello umano che elaborano i dati attraverso nodi interconnessi per identificare modelli e relazioni.
Analisi predittiva	Tecniche di IA che utilizzano dati storici e in tempo reale per prevedere eventi futuri quali guasti alle apparecchiature o ritardi nei progetti.
Algoritmi di ottimizzazione	Metodi matematici utilizzati dall'IA per determinare la soluzione più efficiente tra più alternative.
Elaborazione del linguaggio naturale (NLP)	Tecnologia di IA che consente ai computer di analizzare, comprendere e interpretare il linguaggio umano in forma testuale o vocale.
Visione artificiale	Campo dell'IA che consente alle macchine di interpretare le informazioni visive provenienti da immagini e video.
Analisi dei rischi:	Il processo di identificazione, valutazione e classificazione dei rischi in base alla priorità utilizzando dati e strumenti analitici.
Realtà aumentata (AR)	Tecnologia che sovrappone informazioni digitali all'ambiente reale tramite dispositivi quali smartphone o occhiali intelligenti.
Realtà virtuale (VR)	Tecnologia che immerge gli utenti in un ambiente completamente digitale utilizzando visori e comandi interattivi.
Realtà mista	Una gamma di tecnologie che fondono ambienti reali e virtuali, consentendo l'interazione tra oggetti fisici e digitali.
Flusso di lavoro digitale	Una sequenza strutturata di processi digitali che gestiscono le informazioni nelle diverse fasi del progetto.
Governance dei dati	Politiche e procedure che regolano le modalità di raccolta, archiviazione, accesso e utilizzo dei dati.

Trasparenza degli algoritmi	La capacità di comprendere come un sistema di IA produca i propri risultati o raccomandazioni.
Etica dell'IA	Principi che garantiscono un uso responsabile, equo e trasparente dei sistemi di IA.
Gestione dei rischi dell'IA	Processi utilizzati per identificare, valutare e mitigare i rischi legati ai sistemi di IA.
Apprendimento adattivo	Sistemi educativi che adattano i contenuti e il livello di difficoltà dell'apprendimento in base alle prestazioni e alle esigenze degli studenti.

Introduzione all'argomento 2

Questo modulo offre un'introduzione completa e orientata alla pratica all'Intelligenza Artificiale (IA) e alle Tecnologie Aumentate (AR/VR) applicate all'ambiente costruito. Piuttosto che concentrarsi sulla programmazione software o sulla matematica avanzata, il modulo pone l'accento sulla comprensione concettuale, sulla rilevanza nel mondo reale e sulla preparazione organizzativa.

L'IA e le tecnologie aumentate sono sempre più integrate nel Building Information Modelling (BIM), nei Digital Twin, nelle infrastrutture intelligenti e nelle piattaforme di gestione delle risorse. Il loro valore risiede nel miglioramento del processo decisionale, nella previsione dei rischi, nell'ottimizzazione delle prestazioni e nel potenziamento della comunicazione lungo l'intero ciclo di vita di edifici e infrastrutture.

Il modulo è progettato per rispondere alle sfide comuni nel settore pubblico e nelle organizzazioni professionali, tra cui la scarsa consapevolezza delle capacità dell'IA, l'incertezza sui rischi e l'etica e la difficoltà di tradurre l'innovazione in valore operativo. Spiegazioni narrative, logica visiva, esercizi applicati e risposte modello sono combinati per supportare l'apprendimento e la riflessione.

Ogni parte include:

- Testo esplicativo di base
- Foto/immagini suggerite
- Grafici o diagrammi (descritti)
- Brevi esercizi o spunti di discussione

1.Fondamenti di Intelligenza Artificiale

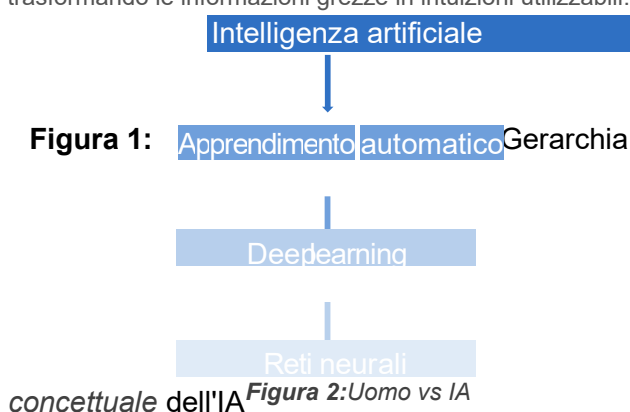
L'Intelligenza Artificiale si riferisce a una famiglia di tecnologie digitali che consentono ai sistemi di analizzare dati, riconoscere modelli e supportare il processo decisionale in modi che simulano determinati aspetti del processo decisionale umano. Nell'ambiente costruito, l'IA non ha lo scopo di sostituire le competenze professionali, ma di potenziare il giudizio umano elaborando grandi volumi di dati in modo efficiente e coerente. [\[1\]](#) [\[2\]](#)

L'importanza dell'IA è cresciuta rapidamente grazie alla digitalizzazione della progettazione, della costruzione e delle operazioni. I modelli BIM, i sensori, i sistemi di monitoraggio e i Digital Twin generano flussi di dati continui che superano la capacità di analisi manuale. L'IA fornisce il livello analitico che trasforma i dati grezzi in informazioni utili.

[3] [4]

È essenziale che i professionisti comprendano l'IA come uno strumento di supporto piuttosto che come un decisore autonomo. La responsabilità, l'interpretazione e la responsabilità etica rimangono sempre a carico degli attori umani. [5] [6]

L'intelligenza artificiale (IA) si riferisce a sistemi informatici in grado di svolgere compiti che solitamente richiedono l'intelligenza umana, come l'apprendimento, il ragionamento, la percezione e il processo decisionale [1] [2]. Fondamentalmente, l'IA si basa sull'apprendimento automatico (ML), in cui i sistemi migliorano attraverso i dati. L'apprendimento può essere supervisionato, con dati etichettati che guidano i risultati, oppure non supervisionato, in cui i modelli vengono scoperti senza etichette predefinite. Approcci più avanzati includono l'apprendimento profondo e le reti neurali, ispirati alla struttura dei sistemi neurali biologici. In definitiva, l'IA consente un processo decisionale basato sui dati, trasformando le informazioni grezze in intuizioni utilizzabili.



Tipo di attività	Competenza umana	Supporto AI
Giudizio progettuale	Alto	Media
Riconoscimento di modelli	Medio	Alto
Analisi ripetitiva	Bassa	Alto
Decisioni etiche	Alta	Basso

Capacità

Questa gerarchia (Figura 1) illustra come il deep learning sia un sottoinsieme del machine learning, che a sua volta è un sottoinsieme dell'intelligenza artificiale. [1] [2]

Nel settore dell'edilizia e della gestione delle strutture, l'IA supporta i professionisti anziché sostituirli. Migliora l'analisi di set di dati complessi come i modelli BIM e i dati dei sensori.

Esercizio 1

Identificate le decisioni quotidiane nel vostro lavoro che potrebbero essere supportate dall'IA.

Spiegazione dell'esercizio

Questo esercizio invita i partecipanti a riflettere sulle loro attività professionali quotidiane e a individuare le decisioni di routine che prendono durante le fasi di progettazione, costruzione, gestione operativa, manutenzione o gestione patrimoniale. Tali decisioni possono basarsi sull'esperienza, sul giudizio tecnico, sull'interpretazione di rapporti, sui dati di monitoraggio o sulla comunicazione con le parti interessate.

I partecipanti dovrebbero elencare esempi di decisioni che prendono personalmente (o osservano nella loro organizzazione) che comportano una valutazione ripetuta delle informazioni, la definizione delle priorità delle azioni o la previsione dei risultati. L'attenzione non è rivolta a sistemi di IA avanzati, ma a opportunità realistiche in cui gli strumenti di IA potrebbero essere d'aiuto elaborando i dati più rapidamente, individuando modelli o generando raccomandazioni. L'esercizio incoraggia i partecipanti a riflettere in modo pratico su dove l'IA potrebbe aggiungere valore senza sostituire la responsabilità professionale.

Esercizio 2

Identificate due attività nella vostra organizzazione che attualmente si basano in larga misura sul giudizio di esperti e che potrebbero essere supportate dall'analisi dell'IA.

Spiegazione dell'esercizio

Esempi includono la valutazione delle prestazioni energetiche, la diagnosi dei guasti nei sistemi degli edifici, la definizione delle priorità delle azioni di manutenzione o l'analisi dei dati di ispezione. L'IA può supportare una valutazione più rapida e coerente, mentre le decisioni finali rimangono di competenza umana.

2. Tecniche di IA rilevanti per l'ambiente costruito

Comprendere i metodi di IA a livello concettuale consente ai professionisti di identificare casi d'uso appropriati senza bisogno di competenze tecniche di implementazione. La scelta della tecnica giusta dipende dalla disponibilità dei dati, dalla maturità organizzativa e dal contesto decisionale [\[7\]](#) [\[8\]](#) [\[9\]](#). Le tecniche chiave sono:

- Analisi predittiva: utilizza dati storici e in tempo reale per prevedere eventi futuri come guasti alle apparecchiature, ritardi o domanda di energia.
- Algoritmi di ottimizzazione: identificano la soluzione migliore tra molte opzioni per migliorare l'efficienza nella pianificazione, nell'allocazione delle risorse o nell'uso dell'energia.
- Elaborazione del linguaggio naturale (NLP): consente all'IA di analizzare ed estrarre informazioni utili da documenti di testo quali rapporti, contratti e registri di manutenzione.
- Visione artificiale: consente all'IA di interpretare immagini e video per rilevare difetti, monitorare i progressi e migliorare la sicurezza nell'edilizia e nelle infrastrutture.

Esempi pratici

Questi esempi mostrano come l'analisi predittiva, gli algoritmi di ottimizzazione e l'NLP si traducano in applicazioni pratiche nell'ambiente costruito. La previsione dei ritardi migliora la gestione dei progetti, l'ottimizzazione dei layout migliora la sostenibilità e la classificazione automatizzata semplifica la gestione delle informazioni, favorendo insieme l'efficienza e un processo decisionale più intelligente (Figura 3).

1. Previsione dei ritardi sulla base dei dati storici dei progetti

- Tecnica: analisi predittiva
- Spiegazione: analizzando le tempistiche dei progetti passati, l'allocazione delle risorse e le cause dei ritardi, i modelli predittivi possono prevedere i potenziali rischi nei progetti attuali. Ad esempio, se i dati storici mostrano che l'installazione degli impianti di climatizzazione subisce spesso ritardi a causa di problemi nella catena di approvvigionamento, l'analisi predittiva può segnalarlo in anticipo.
- Valore: Consente una pianificazione proattiva, una migliore gestione delle risorse e una riduzione dei costi aggiuntivi del progetto.

2. Ottimizzazione della disposizione degli edifici per il rendimento energetico

- Tecnica: algoritmi di ottimizzazione
- Spiegazione: gli algoritmi possono simulare diversi layout e configurazioni degli edifici per ridurre al minimo il consumo energetico. Ad esempio, possono ottimizzare la posizione delle finestre per sfruttare la luce naturale, la suddivisione in zone dell'impianto HVAC per garantire l'efficienza o l'orientamento delle stanze per ridurre i carichi di riscaldamento/raffreddamento.
- Valore: supporta la progettazione sostenibile, riduce i costi operativi e migliora il comfort degli occupanti.

3. Classificazione automatizzata dei documenti

- **Tecnica:** Elaborazione del linguaggio naturale (NLP)
- **Spiegazione:** L'NLP è in grado di classificare automaticamente grandi volumi di documenti quali registri di manutenzione, rapporti di conformità o corrispondenza relativa ai progetti. Ad esempio, può distinguere tra rapporti sulla sicurezza, documenti finanziari e manuali tecnici senza necessità di selezione manuale.
- **Valore:** fa risparmiare tempo, riduce gli errori umani e rende i dati non strutturati ricercabili e utilizzabili.

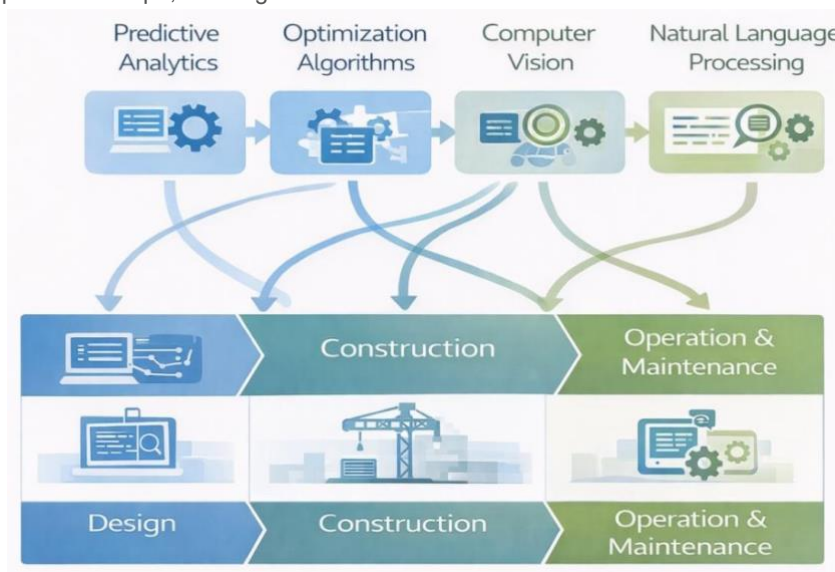


Figura 3: Mappatura delle tecniche di IA alle fasi del ciclo di vita delle costruzioni

Esercizio

Abbinare una tecnica di IA a una sfida reale nel settore dell'edilizia, delle infrastrutture o della gestione delle strutture.

Spiegazione dell'esercizio

Analisi predittiva per la previsione dei guasti alle attrezzature; ottimizzazione per alternative progettuali efficienti dal punto di vista energetico; visione artificiale per il monitoraggio della sicurezza in cantiere; NLP per l'analisi dei rapporti di manutenzione e dei reclami. [\[7\]](#) [\[8\]](#) [\[9\]](#)

3. Flussi di lavoro BIM e Digital Twin abilitati dall'IA

Il BIM e i Digital Twin forniscono un ambiente digitale strutturato all'interno del quale l'IA può operare in modo significativo. Sebbene l'IA sia in grado di analizzare i dati in modo indipendente, i suoi risultati acquisiscono valore quando sono collegati al contesto spaziale, funzionale e semantico. [\[3\]](#) [\[4\]](#)

Nei flussi di lavoro abilitati al BIM, l'IA può automatizzare i controlli, identificare le incongruenze e supportare decisioni di progettazione basate sulle prestazioni. I Digital Twin estendono queste capacità alla fase operativa integrando dati in tempo reale, consentendo il monitoraggio continuo e l'apprendimento nel tempo. [\[3\]](#) [\[4\]](#)

Un fattore chiave di successo è la qualità dei dati e la coerenza dei modelli. L'IA amplifica sia i punti di forza che le debolezze delle pratiche digitali esistenti (Figura 4).

L'IA migliora il BIM automatizzando i controlli ed estraendo informazioni dai modelli:

- Il rilevamento automatico delle interferenze utilizza l'IA per identificare rapidamente i conflitti tra gli elementi edilizi nei modelli BIM, riducendo gli errori di progettazione prima dell'inizio della costruzione.
- Il controllo di conformità basato su regole applica l'IA per verificare automaticamente che i progetti soddisfino gli standard normativi e i requisiti del progetto.
- L'ottimizzazione della progettazione sfrutta algoritmi di IA per esplorare molteplici alternative progettuali e raccomandare layout che migliorino le prestazioni, l'efficienza o la sostenibilità.
- Nel loro insieme, questi esempi mostrano come l'IA migliori il BIM semplificando i controlli, garantendo la conformità e migliorando i risultati di progettazione.



Figura 4: Flusso di lavoro BIM abilitato all'IA – Digital Twin

Utilizzo del BIM	Tradizionale	Potenziato dall'IA
Rilevamento delle interferenze	Revisione manuale	Automazione + predittivo
Analisi energetica	Simulazione statica	Previsione e ottimizzazione
Stima dei costi	Media storica	Previsione basata su ML

Figura 5: Funzioni di IA nelle diverse applicazioni del BIM

Esercizio

Identifica le potenziali fonti di dati per un Digital Twin nella tua organizzazione.

Spiegazione dell'esercizio

Un Digital Twin richiede dati sia strutturati che in tempo reale per rappresentare l'asset fisico e le sue prestazioni nel tempo. Nella nostra organizzazione, le potenziali fonti di dati per un Digital Twin potrebbero includere:

1. Documentazione BIM e di progettazione
2. Dati di monitoraggio dei sensori e dell'IoT
3. Registri di gestione e manutenzione delle strutture

4. Dati operativi e di utilizzo

5. Dati ambientali ed esterni

6. Dati visivi e basati su rilevamenti

4. Manutenzione predittiva e analisi dei rischi

La manutenzione predittiva rappresenta una delle applicazioni di IA più mature e preziose nell'ambiente costruito. Anziché reagire ai guasti o seguire programmi rigidi, l'IA analizza i modelli nei dati operativi per prevedere quando è effettivamente necessario un intervento. [7] [8]

Questo approccio migliora la sicurezza, riduce i tempi di inattività e ottimizza i budget di manutenzione, aspetto particolarmente importante per gli edifici pubblici e le infrastrutture con risorse limitate.

L'analisi dei rischi offre vantaggi simili, poiché l'IA è in grado di integrare più fonti di dati per evidenziare i rischi emergenti e supportare le azioni preventive (Figura 6). La manutenzione tradizionale reagisce ai guasti. L'IA consente la previsione.

[7] [8]

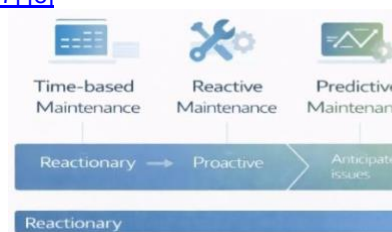


Figura 6: Evoluzione manutenzione

Aspetto	Reattiva	Preventivo	Predittiva
Tempi di inattività	Elevato	Medio	Basso
Efficienza in termini di costi	Bassa	Media	Alta
Utilizzo dei dati	Minimo	Moderato	Elevato

Figura 7: Confronto tra strategie di della manutenzione

L'analisi dei rischi per i supporti di IA è la seguente:

- La modellazione di scenari utilizza l'IA per simulare diverse situazioni future, aiutando le organizzazioni ad anticipare potenziali rischi ed esiti prima che si verifichino.
- La valutazione del rischio basata sulla probabilità applica metodi statistici per stimare la probabilità di rischi specifici, consentendo decisioni basate sui dati riguardo alle strategie di mitigazione.

Insieme, questi approcci rafforzano l'analisi dei rischi combinando la previsione con probabilità quantificabili.

Esercizio

Elenca tre tipi di dati necessari per implementare la manutenzione predittiva in un edificio pubblico.

Spiegazione dell'esercizio

Dati dei sensori (temperatura, vibrazioni, consumo energetico), registrazioni storiche di manutenzione e programmi operativi o di occupazione.

- Dati dei sensori: letture continue provenienti dai sistemi dell'edificio, quali temperatura, vibrazioni, umidità e consumo energetico. Questi forniscono informazioni in tempo reale sulle prestazioni delle apparecchiature e consentono di rilevare tempestivamente eventuali anomalie.
- Registri storici di manutenzione: registri di assistenza passati, cronologie delle riparazioni e programmi di sostituzione. Questi dati aiutano a identificare i problemi ricorrenti e supportano gli algoritmi predittivi mostrando i modelli di guasto.

- Programmi operativi e di occupazione: informazioni su come e quando vengono utilizzati gli spazi, compresi i picchi di occupazione e le ore di funzionamento delle apparecchiature. Questi dati contestuali garantiscono che le previsioni di manutenzione siano in linea con l'utilizzo effettivo dell'edificio.

5. La visione artificiale nell'edilizia e nelle infrastrutture

Per le PMI che operano con margini finanziari limitati, la tecnologia immersiva deve essere valutata come un investimento. La visione artificiale applica tecniche di intelligenza artificiale a immagini e video raccolti da telecamere, droni o scanner. Nei progetti di edilizia e infrastrutture, ciò consente il monitoraggio automatizzato di avanzamento, qualità e sicurezza. [\[8\]](#)

Rispetto alle ispezioni manuali, la visione artificiale può fornire osservazioni più frequenti, oggettive e scalabili. Tuttavia, la convalida umana rimane essenziale, in particolare per le decisioni critiche per la sicurezza. [\[8\]](#) [\[9\]](#) Che cos'è la visione artificiale? [\[8\]](#) [\[9\]](#)

La visione artificiale consente alle macchine di interpretare immagini e video. [\[8\]](#) [\[9\]](#)

Le principali applicazioni sono:

- Il monitoraggio della sicurezza utilizza la visione artificiale per rilevare automaticamente pericoli o comportamenti non sicuri nei cantieri edili, migliorando la protezione dei lavoratori.
- Il monitoraggio dei progressi tramite droni applica la visione artificiale per analizzare immagini e video aerei, fornendo aggiornamenti in tempo reale sull'avanzamento del progetto.
- Il rilevamento dei difetti sfrutta la visione artificiale per identificare difetti nei materiali o nei lavori di costruzione, garantendo il controllo della qualità e riducendo costose rilavorazioni.

Nel loro insieme, queste applicazioni dimostrano come la visione artificiale trasformi i dati visivi in informazioni utili per progetti edilizi più sicuri, efficienti e di qualità superiore.



- **Test di responsabilità**

Figura 8: Flusso di lavoro dell'analisi delle immagini dei droni

I vantaggi sono i seguenti:

- Maggiore sicurezza: l'IA è in grado di rilevare in tempo reale condizioni e comportamenti non sicuri in cantiere, contribuendo a prevenire gli incidenti e a ridurre i rischi.
- Report oggettivi sullo stato di avanzamento: l'IA fornisce un monitoraggio coerente e basato sui dati dello stato di avanzamento dei lavori, riducendo la dipendenza da valutazioni umane soggettive.
- Controllo qualità: l'IA supporta il rilevamento automatico di difetti e non conformità, migliorando la qualità della costruzione e riducendo le rilavorazioni.

Esercizio 1

Discutere le considerazioni etiche relative al monitoraggio video.

Spiegazione dell'esercizio

Il monitoraggio video che utilizza la visione artificiale basata sull'IA può migliorare significativamente la sicurezza, il controllo della qualità e il monitoraggio dei progressi nei progetti di costruzione e infrastrutturali. Tuttavia, solleva anche importanti questioni etiche e legali che devono essere affrontate prima dell'implementazione.

1. Privacy e protezione dei dati personali
2. Limitazione delle finalità e rischio di uso improprio
3. Trasparenza e fiducia dei lavoratori
4. Rischi di parzialità e discriminazione
5. Responsabilità e controllo umano
6. Sicurezza e archiviazione dei dati

Esercizio 2

Individua un'attività nel settore delle costruzioni o delle infrastrutture in cui la visione artificiale potrebbe migliorare i risultati.

Spiegazione dell'esercizio

Esempi includono il monitoraggio della conformità dei DPI, l'individuazione di difetti o crepe sulle superfici, il monitoraggio dello stato di avanzamento dei lavori o la valutazione delle condizioni di sicurezza in cantiere.

6. Concetti di realtà aumentata e realtà virtuale

La realtà aumentata (AR) e la realtà virtuale (VR) migliorano la comprensione presentando le informazioni digitali in modo immersivo o contestuale. L'AR sovrappone contenuti digitali al mondo reale, mentre la VR crea ambienti simulati completamente immersivi. [\[10\]](#) [\[11\]](#)

Queste tecnologie migliorano la comunicazione, riducono le incomprensioni e supportano l'apprendimento esperienziale, particolarmente prezioso in ambienti complessi o pericolosi.

La realtà virtuale (VR) si riferisce a una tecnologia digitale che crea un ambiente completamente immersivo e generato dal computer in cui gli utenti sono completamente separati dal mondo fisico reale e collocati in uno spazio virtuale simulato tramite dispositivi quali visori VR, controller e sensori di movimento.

Nella VR, l'utente prova un senso di presenza, ovvero si sente come se fosse fisicamente "all'interno" dell'ambiente virtuale. A differenza della realtà aumentata (AR), che sovrappone informazioni digitali al mondo reale, la VR sostituisce interamente il mondo reale con un ambiente simulato. Ciò consente agli utenti di esplorare, interagire e svolgere attività in un ambiente controllato e sicuro.

Gli ambienti VR possono rappresentare interni di edifici realistici, cantieri, sistemi infrastrutturali o scenari pericolosi. La tecnologia supporta la formazione interattiva, la revisione dei progetti e la simulazione, consentendo agli utenti di muoversi attraverso spazi virtuali, esaminare oggetti in 3D e mettere in pratica il processo decisionale senza rischi nel mondo reale.

Nel settore dell'ambiente costruito, la VR è ampiamente utilizzata per la visualizzazione del progetto, il coinvolgimento delle parti interessate, la pianificazione della costruzione e la formazione sulla sicurezza, poiché aiuta gli utenti a comprendere informazioni spaziali complesse e le condizioni del progetto prima che inizi la costruzione fisica o l'operatività.

La realtà aumentata (AR) si riferisce a una tecnologia digitale che migliora l'ambiente fisico reale sovrapponendo informazioni generate al computer, come modelli 3D, testo, grafica, simboli o dati dei sensori, direttamente sulla visione che l'utente ha del mondo reale attraverso dispositivi quali smartphone, tablet, occhiali intelligenti o visori AR.

A differenza della realtà virtuale (VR), che sostituisce interamente l'ambiente fisico, l'AR mantiene l'ambientazione del mondo reale e aggiunge un ulteriore livello digitale di informazioni. Ciò significa che gli utenti rimangono consapevoli di ciò che li circonda mentre ricevono contemporaneamente una guida digitale e un supporto di visualizzazione. L'AR è quindi considerata una tecnologia chiave all'interno del continuum della "realtà mista", posizionata tra il mondo reale e gli ambienti completamente virtuali (Figura 9).

Nel contesto dell'ambiente costruito, l'AR consente ai professionisti di visualizzare le informazioni BIM o del Digital Twin direttamente in cantiere. Ad esempio, l'AR può mostrare gli impianti nascosti dell'edificio, come tubi, cavi o condotti di ventilazione dietro pareti e soffitti, aiutando ingegneri e tecnici a localizzare le risorse e a eseguire la manutenzione in modo più efficiente. L'AR può anche supportare le squadre di costruzione sovrapponendo le istruzioni di installazione o i marcatori di allineamento strutturale al sito fisico, riducendo gli errori e migliorando il coordinamento.

Nel complesso, l'AR migliora il processo decisionale fornendo informazioni contestuali in tempo reale e aumentando la comprensione di sistemi spaziali complessi, rendendola particolarmente preziosa per la gestione della costruzione, l'ispezione, la gestione delle strutture e i flussi di lavoro di manutenzione.



Ambiente	Fonde elementi digitali con il mondo reale	Un mondo digitale completamente immersivo
Dispositivo	Occhiali intelligenti	Cuffie VR
Utilizzo	Migliora l'esperienza del mondo reale	Immersione virtuale totale

Figura 9: Confronto tra AR e VR

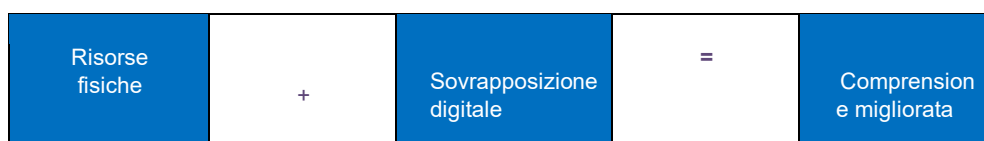


Figura 10: Sovrapposizione di informazioni in realtà aumentata

Idea dimostrativa: visualizzazione in realtà aumentata degli impianti dell'edificio

Grafico A: Visualizzazione AR – Quali servizi di edificio possono essere visualizzati

Tipo di servizio di edificio	Esempi	Valore/vantaggio della realtà aumentata
Sistemi HVAC	Condotti, bocchette, unità di trattamento aria	Aiuta a individuare i percorsi di ventilazione nascosti
Impianti idraulici	Tubazioni dell'acqua, scarichi, valvole	Riduce i tempi di individuazione e riparazione delle perdite
Impianti elettrici	Passerelle portacavi, cablaggio, quadri elettrici	Migliora la sicurezza e riduce gli errori di installazione
Protezione antincendio	Sprinkler, allarmi antincendio, rilevatori di fumo	Supporta le ispezioni e i controlli di conformità
Elementi strutturali	Travi, pilastri, solai	Supporta la pianificazione sicura di perforazioni e ristrutturazioni
Locali tecnici	Caldaie, pompe, refrigeratori	Aiuta i tecnici a trovare i componenti più rapidamente

Tabella B: Flusso di lavoro della dimostrazione AR (passo dopo passo)

Fase	Azione nella dimostrazione	Output / Risultato
1	Selezionare una stanza o un corridoio	L'ambiente reale è definito

2	Carica il modello BIM/MEP	I servizi di costruzione digitale diventano disponibili
3	Attivare il visualizzatore AR	Il sistema AR avvia il tracciamento spaziale
4	Allinea il modello alla realtà (marker QR o punti di riferimento)	Il modello digitale corrisponde alla posizione fisica
5	Sovrapporre i servizi (condotti, tubi, cavi)	I sistemi nascosti diventano visibili
6	Interagisci con gli oggetti (clicca per visualizzare i dati)	Vengono visualizzati i metadati (ID, dimensioni, materiale)
7	Discutere casi d'uso pratici	Rafforzamento dei risultati di apprendimento

Grafico C: Confronto tra manutenzione tradizionale e manutenzione basata sulla realtà aumentata

Attività di manutenzione	Approccio tradizionale	Approccio supportato dalla realtà aumentata
Localizzazione di tubi/cavi	Disegni manuali + metodo per tentativi	Sovrapposizione istantanea delle posizioni dei servizi
Pianificazione delle ispezioni	Visite in loco + accesso fisico	Guida all'ispezione visiva tramite AR
Interventi di riparazione	Possibile demolizione non necessaria	Danni ridotti e riparazioni più rapide
Formazione dei tecnici	Spiegazioni in aula + manuali	Apprendimento interattivo in ambiente reale
Gestione della sicurezza	Controlli visivi e segnaletica	Visualizzazione di avvisi in realtà aumentata e delle zone di pericolo
Aggiornamenti della documentazione	Reportistica manuale	Aggiornamenti digitali collegati al modello BIM/DT

Esercizio

Decidi se l'AR o la VR sono più adatte alla formazione sulla sicurezza e spiega la tua scelta.

Spiegazione dell'esercizio

La VR è generalmente più adatta alla formazione sulla sicurezza perché consente simulazioni immersive di scenari pericolosi senza rischi reali.

La realtà virtuale (VR) è generalmente più adatta alla formazione sulla sicurezza rispetto alla realtà aumentata (AR).

7. Applicazioni AR/VR nel ciclo di vita delle risorse

Per contestualizzare i quadri teorici, finanziari e procedurali stabiliti nelle sezioni precedenti, le applicazioni AR e VR differiscono tra progettazione, costruzione e operazioni. Durante la progettazione, la VR supporta il coinvolgimento delle parti interessate e la convalida del progetto. Nella costruzione, l'AR può guidare l'installazione e ridurre gli errori. Nelle operazioni, sia l'AR che la VR supportano la formazione, la manutenzione e i test di scenario.

L'adozione dovrebbe essere allineata alle esigenze e alla maturità dell'organizzazione, piuttosto che alla sola disponibilità della tecnologia. [\[31\]\[12\]](#)

Fase di progettazione

- Revisioni progettuali immersive: la VR consente ai team di progetto di esplorare e valutare il progetto dell'edificio in un ambiente 3D realistico, migliorando la comprensione spaziale e l'individuazione precoce dei problemi di progettazione.
- Coinvolgimento delle parti interessate: la VR aiuta le parti interessate non tecniche a comprendere il progetto proposto attraverso tour virtuali, favorendo una comunicazione più chiara e decisioni di approvazione più rapide.

Costruzione e operazioni

- Guida all'installazione in loco: la realtà aumentata (AR) sovrappone le istruzioni basate sul BIM al sito fisico per aiutare i lavoratori a installare i componenti con precisione e ridurre gli errori.
- Simulazioni di manutenzione: la realtà virtuale (VR) consente ai tecnici di esercitarsi virtualmente nelle procedure di manutenzione, migliorando la preparazione e riducendo i rischi prima di lavorare sulle attrezzature reali.
- Formazione sulla sicurezza: la realtà virtuale (VR) offre scenari di pericolo immersivi in cui il personale può esercitarsi in sicurezza a riconoscere i rischi e a rispondere alle emergenze senza esporsi al mondo reale.



Figura 11: Scenario di manutenzione assistita da AR

Esercizio 1

Identifica un caso d'uso di AR/VR rilevante per il tuo ruolo.

Spiegazione dell'esercizio

Un caso d'uso di AR/VR altamente rilevante per il mio ruolo è la realtà virtuale (VR) per la revisione del progetto da parte degli stakeholder e la comunicazione relativa al progetto.

Esercizio 2

Individua un'applicazione AR o VR rilevante per la fase attuale del tuo progetto.

Spiegazione dell'esercizio

AR per la guida all'installazione in loco, VR per le revisioni del progetto con le parti interessate o simulazioni VR per la formazione degli operatori.

Un'applicazione AR/VR rilevante per la fase attuale del mio progetto è la realtà aumentata (AR) per la guida all'installazione in loco durante la costruzione.

8. IA per l'apprendimento e lo sviluppo delle competenze

L'IA supporta anche l'apprendimento organizzativo consentendo percorsi di formazione personalizzati e adattivi. Le piattaforme di apprendimento possono analizzare il comportamento degli utenti, adattare la difficoltà dei contenuti e raccomandare una formazione mirata. In un panorama digitale in rapida evoluzione, l'apprendimento continuo è essenziale per mantenere la competenza professionale e la resilienza organizzativa.

L'IA supporta le piattaforme di apprendimento adattivo:

- Valutando i progressi degli studenti: l'IA analizza continuamente le prestazioni e il coinvolgimento degli studenti per identificare punti di forza, punti deboli e lacune di apprendimento.
- Raccomandando contenuti su misura: l'IA suggerisce materiali didattici ed esercizi personalizzati in base alle esigenze, al ritmo e ai progressi dello studente.

I vantaggi per le organizzazioni sono:

- Aggiornamento continuo delle competenze: l'IA consente ai dipendenti di sviluppare regolarmente nuove competenze attraverso un apprendimento personalizzato e continuo, in linea con le esigenze organizzative in evoluzione.
- Investimenti mirati nella formazione: l'IA aiuta le organizzazioni a concentrare le risorse formative sulle lacune di competenze più critiche, migliorando l'efficienza e l'impatto.
- Supporto per i formatori: l'IA assiste i formatori monitorando le prestazioni degli studenti, automatizzando il feedback e aiutando a progettare percorsi formativi più efficaci.

 Traditional	 AI-Driven
Dati Set di dati statici Processo Regole predefinite Affetto Ritmo fisso	Processo Dati in tempo reale Adattabilità Apprendimento automatico Utilizzo Incentrato sullo studente

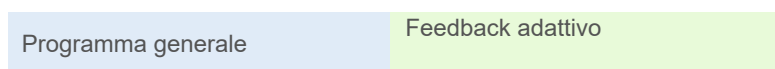


Figura 12: Modelli di apprendimento tradizionali vs. modelli basati sull'IA

Riflessione: in che modo l'IA potrebbe supportare la formazione nella vostra organizzazione?

Esercizio

Individua una lacuna nelle competenze della tua organizzazione che potrebbe essere colmata attraverso l'apprendimento supportato dall'IA.

Spiegazione dell'esercizio

Competenze digitali relative al BIM, capacità di interpretazione dei dati o comprensione delle piattaforme di gestione delle risorse.

Una lacuna significativa nelle competenze della nostra organizzazione è la capacità del personale di interpretare e utilizzare il BIM e i dati digitali per il processo decisionale.

9. Considerazioni etiche, legali e organizzative

L'adozione responsabile dell'IA richiede attenzione all'etica, alla protezione dei dati, alla trasparenza e alla gestione del cambiamento organizzativo. I sistemi di IA possono introdurre pregiudizi, oscurare la logica decisionale o sollevare preoccupazioni relative alla privacy se non adeguatamente governati. [\[1\]](#) [\[3\]](#) [\[5\]](#) [\[6\]](#) [\[13\]](#)

Quadri di governance chiari, standard e il coinvolgimento delle parti interessate sono essenziali per garantire fiducia e accettazione. [\[5\]](#) [\[6\]](#) [\[13\]](#)

Questioni chiave

- Privacy e proprietà dei dati: le organizzazioni devono garantire che i dati personali e operativi utilizzati dai sistemi di IA siano raccolti, archiviati e condivisi in modo lecito, sicuro e con chiare responsabilità in materia di proprietà e diritti di accesso.
- Trasparenza degli algoritmi: i processi decisionali dell'IA dovrebbero essere comprensibili e spiegabili, in modo che gli utenti possano fidarsi dei risultati e verificare come si è giunti alle conclusioni.
- Pregiudizi e responsabilità: i sistemi di IA devono essere monitorati per prevenire esiti ingiusti o discriminatori, e deve essere assegnata una chiara responsabilità in modo che la responsabilità rimanga a carico dei decisori umani

Preparazione organizzativa

- Strutture di governance: le organizzazioni devono stabilire politiche, ruoli e procedure di conformità legale chiari per garantire un uso responsabile dell'IA, compresi i quadri di riferimento per la protezione dei dati e la responsabilità.
- Competenze e cultura: il personale deve possedere le competenze digitali necessarie e beneficiare di una cultura organizzativa aperta che sostenga l'innovazione e la fiducia nel processo decisionale supportato dall'IA.
- Gestione del cambiamento: l'adozione di successo dell'IA richiede una pianificazione strutturata per gestire la resistenza, comunicare i benefici e integrare le nuove tecnologie nei flussi di lavoro quotidiani.

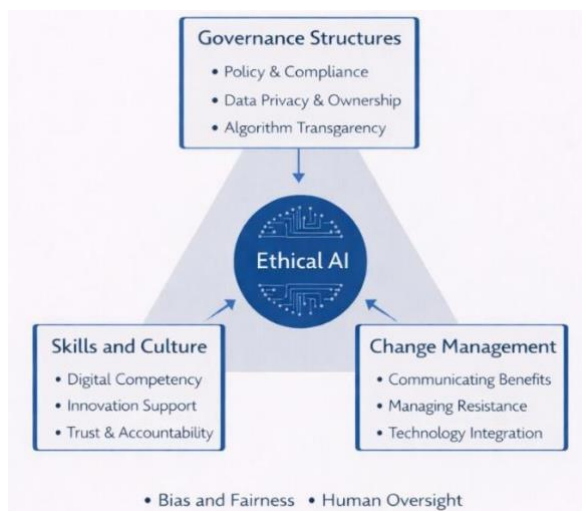


Figura 13: Quadro etico dell'IA per l'ambiente costruito

Discussione: quali rischi derivano da una governance inadeguata dell'IA?

Esercizio

Identificate un rischio etico, legale o organizzativo legato all'adozione dell'IA.

Spiegazione dell'esercizio

Rischi relativi alla privacy dei dati, mancanza di trasparenza nelle decisioni automatizzate, eccessiva dipendenza dalla tecnologia o resistenza da parte del personale.

Uno dei principali rischi legati all'adozione dell'IA è l'uso improprio o la gestione scorretta dei dati personali e operativi, che porta a violazioni della privacy e alla perdita di fiducia.

10. Strategie di adozione e tendenze future

L'adozione di successo dell'IA e del Digital Twin segue un approccio graduale, che inizia con progetti pilota, prosegue con l'integrazione e infine si estende a tutta l'organizzazione. Aspettative irrealistiche e soluzioni eccessivamente complesse spesso portano al fallimento. [\[1\]](#) [\[3\]](#) [\[4\]](#)

Le tendenze future includono una maggiore integrazione dell'IA negli strumenti software standard, una maggiore automazione delle attività di routine e una maggiore enfasi sui quadri etici e normativi. [\[5\]](#) [\[6\]](#) [\[13\]](#) [\[14\]](#) [\[15\]](#) [\[16\]](#)

Le strategie di adozione sono:

- Iniziare con progetti pilota: avviare l'adozione dell'IA su piccola scala per testarne la fattibilità, misurarne i benefici e ridurre i rischi prima di procedere a un'implementazione più ampia.
- Concentrarsi sulla qualità dei dati: assicurarsi che i dati raccolti siano accurati, coerenti e affidabili, poiché le prestazioni dell'IA dipendono fortemente da set di dati di alta qualità.
- Creare team interdisciplinari: combinare le competenze di ingegneria, IT, scienza dei dati e operazioni per garantire che le soluzioni di IA soddisfino le reali esigenze tecniche e organizzative [\[17\]](#).

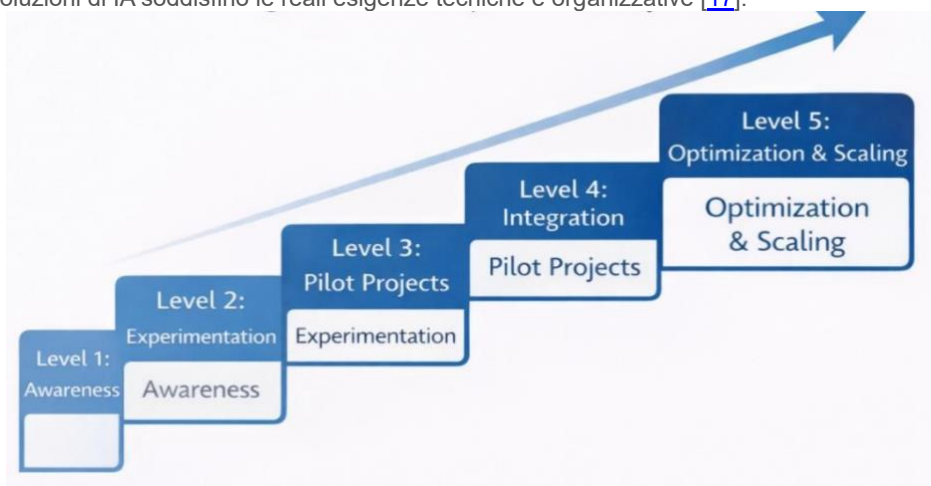


Figura 14: Modello di maturità dell'adozione dell'IA



Figura 15: Evoluzione tecnologica prevista

Esercizio 1

Sviluppare una semplice roadmap per l'adozione dell'IA nella propria organizzazione.

Spiegazione dell'esercizio

Caso d'uso di esempio: manutenzione predittiva per gli impianti HVAC negli edifici comunali.

Progetto pilota: un edificio pubblico dotato di contatori energetici e sensori di temperatura.

Scalabilità: espansione a scuole e ospedali dopo il raggiungimento di KPI positivi.

Esercizio 2

Definisci un'azione concreta che la tua organizzazione potrebbe intraprendere durante la fase pilota dell'adozione dell'IA

Spiegazione dell'esercizio

Implementare un Digital Twin su piccola scala incentrato sul monitoraggio energetico per un singolo edificio pubblico e utilizzare i risultati per orientare le decisioni relative a un'implementazione più ampia. [\[3\]](#) [\[4\]](#)

Un'azione concreta che la nostra organizzazione potrebbe intraprendere durante la fase pilota dell'adozione dell'IA è sviluppare un progetto pilota di Digital Twin su piccola scala per il monitoraggio energetico e il rilevamento delle anomalie in un edificio pubblico.

11. Esercizi

Parte A: Analisi individuale della comprensione (a scelta multipla)

Seleziona la risposta più appropriata per ciascuna delle seguenti domande in base al contenuto del modulo.

Qual è il ruolo principale dell'Intelligenza Artificiale (IA) nell'ambiente costruito?

- A) Sostituire ingegneri e architetti
- B) Analizzare grandi set di dati e supportare il processo decisionale
- C) Eliminare la necessità dei modelli BIM
- D) Automatizzare tutti i processi di costruzione

2. Quale tecnica di IA viene comunemente utilizzata per prevedere i guasti alle apparecchiature?

- A) Analisi predittiva
- B) Elaborazione testi
- C) Formattazione dei fogli di calcolo
- D) Automazione delle e-mail

3. Cosa permette l'elaborazione del linguaggio naturale (NLP) ai sistemi di IA?

- A) Interpretare e analizzare il linguaggio umano in forma scritta o parlata
- B) Costruire infrastrutture fisiche
- C) Generare modelli geometrici 3D
- D) Sostituire i sistemi di database

4. Qual è lo scopo principale della visione artificiale nei progetti di costruzione?

- A) Progettare strutture edilizie
- B) Analizzare immagini e video per monitorare la sicurezza, lo stato di avanzamento o i difetti C)
- C) Per redigere relazioni tecniche
- D) Sostituire i responsabili della sicurezza

5. Quale tecnologia crea un ambiente digitale completamente immersivo per gli utenti?

- A) Realtà aumentata (AR)
- B) Realtà virtuale (VR)
- C) Progettazione assistita da computer (CAD)
- D) Modellazione su foglio di calcolo

6. Qual è il principale vantaggio della realtà aumentata (AR) nel settore edile?

- A) Sostituisce le attività di costruzione fisiche
- B) Sovrappone le informazioni digitali all'ambiente reale
- C) Conserva la documentazione di progetto
- D) Elimina la necessità dei modelli BIM

7. Che cos'è la manutenzione predittiva?

- A) Manutenzione eseguita dopo un guasto alle apparecchiature

- B) Manutenzione programmata in modo casuale
- C) Manutenzione basata sull'analisi AI che prevede potenziali guasti
- D) Manutenzione eseguita solo una volta all'anno

8. Perché la qualità dei dati è importante per i sistemi di IA?

- A) I sistemi di IA funzionano indipendentemente dai dati
- B) Le prestazioni dell'IA dipendono da dati accurati e affidabili
- C) La qualità dei dati conta solo in fase di progettazione
- D) La qualità dei dati influisce solo sui rendiconti finanziari

9. Qual è la questione etica fondamentale nell'implementazione dell'IA?

- A) L'aumento del consumo di elettricità
- B) La privacy dei dati e la parzialità degli algoritmi
- C) Mancanza di materiali da costruzione
- D) Riduzione della documentazione di progetto

10. Qual è l'approccio consigliato per introdurre le tecnologie di IA nelle organizzazioni?

- A) Implementazione immediata su larga scala
- B) Evitare i test pilota
- C) Iniziare con piccoli progetti pilota e scalare gradualmente
- D) Sostituire immediatamente tutti i sistemi esistenti

Risposte

Q1: B Q2: A Q3: A Q4: B Q5: B Q6: B Q7: C Q8: B Q9: B Q10: C

12. Riferimenti

1. [\(NIST, 2023\)](#)
2. [\(ISO/IEC, 2023\)](#)
3. [Grieves, M. & Vickers, J. \(2017\). Digital Twin: mitigare comportamenti emergenti imprevedibili e indesiderati nei sistemi complessi.](#)
4. [Kritzinger, W. et al. \(2018\). Digital Twin nella produzione: una revisione della letteratura per categorie. IFAC PapersOnLine.](#)
5. [Unione Europea \(2016\). Regolamento \(UE\) 2016/679 \(GDPR\).](#)
6. [Commissione europea \(2020\). Una strategia europea per i dati.](#)
7. [ISO \(2014\). ISO 55000: Gestione delle risorse — Panoramica, principi e terminologia.](#)

-
8. [McKinsey Global Institute \(2017\). Reinventare l'edilizia: un percorso verso una maggiore produttività. 9. Forum economico mondiale, 2018](#)
 10. [Milgram, P. & Kishino, F. \(1994\). Una tassonomia delle visualizzazioni in realtà mista.](#)
 11. [Whyte, J. \(2013\). Applicazioni industriali della realtà virtuale nell'architettura e nell'edilizia.](#)
 12. [NIST \(2023\). Quadro di riferimento per la gestione dei rischi dell'IA \(AI RMF 1.0\).](#)
 13. [Unione Europea \(2024\). Legge sull'intelligenza artificiale \(AI Act\).](#)
 14. [ISO \(2018\). ISO 19650: Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative agli edifici e alle opere di ingegneria civile.](#)
 15. [ISO \(2021\). ISO 23247: Sistemi di automazione e integrazione — Quadro di riferimento del Digital Twin per la produzione.](#)
 16. [ISO/IEC \(2023\). ISO/IEC 23894: Intelligenza artificiale — Linee guida sulla gestione dei rischi.](#)
 17. [World Economic Forum \(2018\). Plasmare il futuro dell'edilizia: una svolta nella mentalità e nella tecnologia.](#)