



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



A G E N Z I A D E L D E M A N I O

TWIN HANDBOOK

**CONVENZIONE ATTUATIVA
DI COOPERAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA**

TRA

AGENZIA DEL DEMANIO
Struttura per la Progettazione

E

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA “LA SAPIENZA”
Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell’Architettura

VERSIONE	0.1
DATA	11/06/2024



SOMMARIO

1	Introduzione	4
2	Principi e fattori abilitanti di un Digital Twin	6
2.1	Acquisizione dei dati	6
2.2	Key Performance Indicators (KPI)	9
2.3	Capabilities	10
2.3.1	Tecnologie abilitanti	12
2.3.2	Soluzioni tecnologiche	13
3	Struttura metodologica	14
3.1	categorie di intervento	14
3.2	fasi	15
3.2.1	Fase di progettazione	16
3.2.2	Fase di esecuzione	17
3.2.3	Fase di esercizio	18
3.3	obiettivi	19
3.3.1	Efficienza energetica	19
3.3.2	Sostenibilità ambientale	20
3.3.3	Sostenibilità economica	20
3.3.4	Fruizione e valorizzazione	21
3.3.5	Safety & security	22
3.3.6	Gestione urbana	23
4	Flusso di lavoro	24
5	Twin Toolkit	27
5.1	Definizioni	28
5.1.1	Struttura metodologica	28
5.1.2	Capabilities	30



5.1.3	Glossario.....	30
5.1.4	Acronimi	30
5.1.5	Tecnologie.....	30
5.2	Database.....	30
5.2.1	Database dei dati di Input	30
5.2.2	Database dei KPI	31
5.2.3	Database delle capabilities, delle tecnologie abilitanti e delle soluzioni tecnologiche 31	
5.3	User Interface	31
6	Casi studio.....	33
7	Bibliografia	35



1 INTRODUZIONE

Il settore delle costruzioni rappresenta uno dei principali ambiti di intervento a livello mondiale per il raggiungimento di una crescita sostenibile, smart e inclusiva e per la transizione verso un'economia efficiente nell'uso delle risorse e a basse emissioni di carbonio (Casini, 2022).

La necessità di questa transizione è riconosciuta a livello mondiale dalle più alte istituzioni. La Commissione Europea, all'interno del suo Green Deal, sottolinea le sfide ambientali legate all'impatto negativo delle attività umane. L'insostenibilità dell'attuale modello di sviluppo è, poi, chiaramente espressa negli Obiettivi dell'Agenda 2030 dell'ONU per lo Sviluppo Sostenibile (Sustainable Development Goals o SDG). L'Intergovernmental Panel on Climate Change riconosce che la scienza, la tecnologia e l'innovazione, anche se costituiscono un focus esplicito solo dell'SDG 9 *“Costruire una infrastruttura resiliente e promuovere l'innovazione ed una industrializzazione equa, responsabile e sostenibile”*, sono un fattore abilitante per la maggior parte degli SDG (UNCTAD 2019). La ricerca di sinergie tra innovazione e cambiamento tecnologico per la mitigazione del cambiamento climatico può aiutare a garantire un'efficace mitigazione climatica a lungo termine. Si parla, pertanto, sempre più di Twin Transition (Transizione Doppia o Transizione Gemellare) come simbiosi tra Transizione Ecologica (Green Transition) e Transizione Digitale (Digital Transition). Richiesta dal PNRR, consiste nella modernizzazione dei processi produttivi attraverso lo sviluppo di soluzioni volte a rendere la società e le sue industrie più sostenibili.

In questo contesto, il Digital Twin si propone come tecnologia abilitante per la digitalizzazione del settore AECO (Architecture, Engineering, Construction and Operation).

Un Digital Twin è una rappresentazione virtuale di entità e processi del mondo reale, sincronizzati con una frequenza e una fedeltà specificate.

La tecnologia dei Gemelli Digitali sta prendendo sempre più piede nel settore dell'ambiente costruito. Tuttavia, nonostante il crescente interesse per questa tecnologia, ad oggi mancano ancora dei chiari riferimenti per la sua adozione su larga scala nel settore AECO.

Emerge, quindi, la necessità di creare un allineamento sulle metodologie da seguire per la progettazione e realizzazione di piattaforme per il Digital Twin per la gestione dell'ambiente costruito.



In risposta a questa esigenza, l'Agenzia del Demanio ha stipulato una convenzione attuativa di cooperazione tecnico-scientifica con Sapienza Università di Roma. Questa collaborazione ha l'obiettivo di sviluppare una Twin Strategy finalizzata a guidare il settore delle costruzioni e i diversi soggetti che a questo fanno riferimento (stazioni appaltanti, gestori di patrimoni immobiliari, organizzazioni pubbliche e private, imprese etc.), nella transizione verso approcci digitali per la gestione di procedure complesse in ambito edilizio e infrastrutturale.

In questo contesto, il presente Twin Handbook vuole essere uno strumento operativo di supporto ai diversi soggetti che operano nel settore e che sono coinvolti nella definizione e implementazione di strumenti e metodi data driven orientati al Digital Twin nell'ambito dei processi di pianificazione, progettazione, realizzazione, gestione, monitoraggio e fruizione dell'ambiente costruito.



2 PRINCIPI E FATTORI ABILITANTI DI UN DIGITAL TWIN

“Un Digital Twin è una replica virtuale vivente di un gemello fisico, che può essere un prodotto, un bene, un componente, un processo o un sistema. Attraverso il supporto di tecnologie come l’Intelligenza Artificiale, il Machine Learning e l’Internet of Things, viene creato un flusso di dati tra i gemelli digitali e fisici per garantire che i gemelli digitali siano continuamente aggiornati e adattati ai cambiamenti nei gemelli fisici. Ciò consente di condividere insights, supportare il processo decisionale e abilitare la simulazione, la previsione, il monitoraggio, il controllo e l’ottimizzazione delle prestazioni del gemello fisico durante tutto il suo ciclo di vita” (AlBalkhy et al., 2024).

In questo capitolo vengono descritti i principi, i fattori abilitanti e i componenti chiave che sono alla base della tecnologia del Digital Twin.

2.1 ACQUISIZIONE DEI DATI

Il flusso bi-direzionale di dati tra componente fisica e componente virtuale è ciò che caratterizza la tecnologia dei gemelli digitali.

L’acquisizione dei dati è, quindi, un componente fondamentale del Digital Twin, in quanto è responsabile della raccolta di dati da fonti di varia natura che vengono, poi, elaborati e integrati nel sistema per fornire una rappresentazione più accurata del mondo reale (Piras et al., 2024).

Ne consegue che la capacità di acquisire dati e informazioni sul gemello fisico e trasferirli in tempo utile al gemello digitale sia un fattore abilitante chiave per realizzare un Digital Twin efficace.

La qualità dei dati raccolti è cruciale per consentire decisioni informate e per ottenere insights (Thomas and Bowman, 2021). Al fine di garantire una rappresentazione accurata e fedele della realtà fisica, il Digital Twin deve poter acquisire dati da diverse fonti. I dati provenienti da una sola fonte, quale che essa sia, hanno spesso una portata limitata e possono essere incompleti o imperfetti. Per ricavare informazioni utili e affidabili sono necessarie numerose fonti di dati (Sacks et al., 2020). I dati in sé e per sé hanno, infatti, poco valore. Devono, invece, essere interpretati, elaborati e confrontati con altri dati per consentire la deduzione e l’induzione di informazioni utili (Floridi, 2013).



Possibili fonti di dati possono includere sensori, sistemi di controllo, database e interazioni umane. La varietà di fonti di dati porta con sé delle sfide tecniche.

Dati provenienti da fonti diverse possono essere basati su diversi tipi di misurazioni. Questo richiede che il sistema sia in grado di effettuare delle trasformazioni su dati grezzi prima di poterli rendere fruibili. Le moderne piattaforme di data integration e analytics consentono di gestire dati di qualunque tipo e possono essere integrate da sistemi di estrazione, trasformazione e caricamento di dati (ETL, Extraction, Transformation and Loading) che operano in tempo quasi reale, consentendo quindi di alimentare un Digital Twin con tutte le necessarie informazioni.

Varietà di fonti di dati può significare, inoltre, varietà dei formati di dato. Ruolo fondamentale per garantire l'interoperabilità tra i dati di diverse fonti è svolto dall'uso di protocolli di comunicazione standard, che devono essere aperti e non proprietari.

Il superamento di queste sfide tecniche consente al Digital Twin di avere una base di informazioni più ampia e, quindi, di generare una rappresentazione della realtà più fedele e accurata.

I dati acquisiti da un Digital Twin possono essere di vari tipi:

- dati statici: set di dati persistenti che non mutano nel tempo, come le caratteristiche fisiche e tecniche del sistema, le informazioni sulla progettazione, le specifiche dei materiali, i rapporti di ispezione e informazioni sulla gestione delle risorse;
- dati storici: dati acquisiti nel corso del tempo e utilizzati per analisi retrospettive e predittive;
- dati dinamici: dati che si aggiornano in real time (o in near-real time), come quelli provenienti dai sensori IoT, che riflettono lo stato corrente del sistema;
- dati di contesto: dati che riguardano le operazioni in corso e le condizioni ambientali;
- dati di interazione: dati che descrivono come operatori e sistemi interagiscono tra loro.

Il tipo di dati che un Digital Twin deve acquisire varia in funzione della fase di processo e dell'obiettivo che si vuole raggiungere.

In fase di progettazione, i dati di input includono modelli CAD/BIM, dettagli architettonici, strutturali e impiantistici, specifiche dei materiali e dei componenti, nonché dati geospaziali e informazioni sul contesto. Altri dati di input fondamentali in fase di progettazione sono i requisiti previsti dai regolamenti e dalle normative tecniche vigenti, al fine di assicurare la



conformità del progetto. Il Digital Twin può, inoltre, essere alimentato da set di dati simulati e da set di dati storici provenienti da progetti simili. Questo consente di effettuare simulazioni di scenari what-if e supportare il processo decisionale nella scelta dell'opzione di progetto migliore.

In fase di esecuzione, flussi di dati video, provenienti da telecamere installate in cantiere ed elaborati tramite algoritmi di computer vision, possono consentire il monitoraggio continuo dell'avanzamento dei lavori nonché essere usati per implementare azioni e strategie finalizzate alla sicurezza dei lavoratori.

In fase di esercizio, un flusso di dati dinamici provenienti da sensori IoT consente di rilevare tempestivamente anomalie rispetto alle normali condizioni operative e assicurare la gestione e il monitoraggio ottimali del sistema; al contempo, fornire al Digital Twin set di dati storici permette di effettuare interventi di manutenzione predittiva.

Il processo di acquisizione dei dati richiede al Digital Twin la capacità di gestire e archiviare un notevole volume di dati. Questo è legato alla necessità di conservare sia file di grandi dimensioni (modelli CAD/BIM di edifici e infrastrutture, nuvole di punti, flussi di dati video, etc) sia dati IoT acquisiti con alta frequenza di aggiornamento e mantenuti nei database ai fini della loro storicizzazione (ad esempio per creare dei dataset di addestramento dei modelli di Machine Learning).

La quantità di dati da acquisire varia, inoltre, in base alla complessità degli obiettivi stabiliti e alla scala di progetto, che può andare dal singolo edificio a intere città.

Per rispondere alle diverse esigenze, il Digital Twin deve garantire la scalabilità sia dal punto di vista dell'hardware e dell'infrastruttura, sia della capacità di gestire crescenti volumi di dati e complessità computazionale.

Questo requisito può essere oggi soddisfatto sia grazie ai progressi nelle tecnologie di archiviazione e gestione dei dati on-premise, sia dall'utilizzo del cloud computing con le sue caratteristiche di estrema scalabilità.

Lo scambio continuo di informazioni tra gemello fisico e gemello digitale, abilitato dall'acquisizione dei dati, consente al Digital Twin di creare un ciclo di feed-back, fondamentale per implementare strategie di miglioramento continuo basate sul modello di Deming PDCA (Plan-Do-Check-Act) (Deming, 1982).



2.2 KEY PERFORMANCE INDICATORS (KPI)

I Key Performance Indicators (KPI), o indicatori chiave di prestazione, sono metriche fondamentali che misurano l'efficacia e l'efficienza di un processo, di un sistema o di un progetto.

Nel contesto della realizzazione di un gemello digitale dell'ambiente costruito, I KPI consentono di quantificare i benefici ottenuti dall'implementazione del Digital Twin rispetto agli obiettivi stabiliti. Sono, pertanto, cruciali per valutare l'efficacia dell'architettura di Digital Twin proposta e per monitorare il corretto funzionamento del sistema.

Ove possibile, i KPI devono essere derivati da parametri già utilizzati in regolamenti e normative tecniche vigenti, protocolli di certificazioni energetico ambientali e BAT (Best Available Techniques o Migliori Tecniche Disponibili).

La corretta definizione dei KPI risulta fondamentale nell'ottica del miglioramento continuo dei processi. Con riferimento al ciclo di Deming Plan-Do-Check-Act:

- In fase di progettazione del Digital Twin (Plan) devono essere identificati i KPI e si possono stabilire dei target di performance di riferimento;
- Quando la piattaforma di Digital Twin è messa in funzione (Do) si iniziano a raccogliere i dati che consentono di valutare come il sistema sta performando;
- Una volta raccolti i dati, questi vengono analizzati attraverso i KPI e confrontati con i target di risultato attesi per verificare la performance del Digital Twin (Check);
- In funzione dei livelli di performance ottenuti rispetto ai diversi KPI vengono definite le necessarie azioni correttive o strategie di miglioramento per rendere più efficace ed efficiente il funzionamento del sistema.

Implementare e monitorare i KPI nei Digital Twin richiede una combinazione di tecnologie avanzate, come sensori IoT per la raccolta dei dati, piattaforme di big data per l'analisi e strumenti di visualizzazione per la presentazione dei risultati.

Questo permette di ottenere un monitoraggio continuo e dettagliato delle prestazioni dell'edificio, facilitando decisioni informate e migliorando le operazioni complessive.

In definitiva, i KPI sono strumenti essenziali che garantiscono che il Digital Twin dell'ambiente costruito funzioni in modo efficiente, sostenibile e sicuro, contribuendo a una gestione più intelligente e ottimizzata degli edifici e delle infrastrutture.

2.3 CAPABILITIES

Il Digital Twin Consortium, organismo globale che ha lo scopo di stabilire e promuovere gli standard e le best practice per lo sviluppo del Digital Twin, definisce il termine “capability” come la capacità di eseguire determinate azioni o ottenere determinati risultati, indipendentemente dalla specifica tecnologia utilizzata.

Ogni Digital Twin deve possedere diverse capabilities per essere in grado di soddisfare l’obiettivo per cui è stato pensato.

Il Digital Twin Consortium ha creato uno strumento denominato “Digital Twin Capabilities Periodic Table”, che ha lo scopo di aiutare chi deve sviluppare un Digital Twin ad individuare quali siano i requisiti di capabilities che questo deve soddisfare per raggiungere gli obiettivi preposti.

Le capabilities sono organizzate all’interno della tavola periodica in sei raggruppamenti logici, sulla base di caratteristiche e applicazioni comuni:

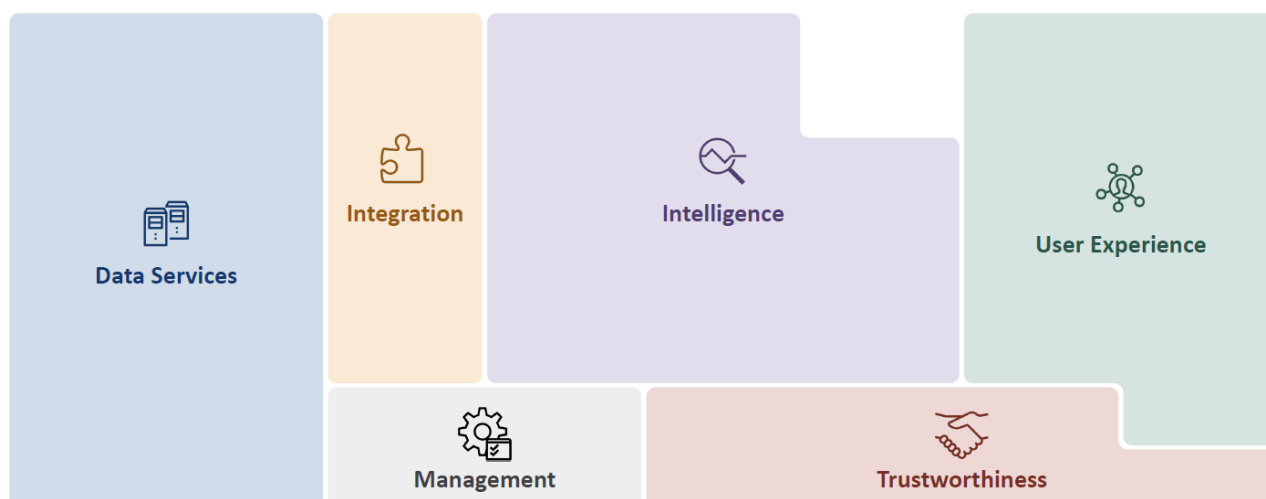


Figura 1: I sei raggruppamenti concettuali della Digital Twin Capabilities Periodic Table

- 1) **Data Services**: funzionalità che abilitano l’acquisizione e la gestione dei dati, stabilendo la connessione tra realtà fisica e virtuale;

- 2) Integration: funzionalità che abilitano la comunicazione di dati tra digital twin e altri sistemi e applicazioni;
- 3) Intelligence: funzionalità che predispongono un ambiente per lo sviluppo e l'implementazione di soluzioni industriali per il digital twin attraverso, ad esempio, servizi di integrazione e analisi dei dati e l'impiego di Intelligenza Artificiale;
- 4) UX (User Experience): funzionalità che abilitano l'utente all'interazione con il digital twin e alla visualizzazione dei suoi dati;
- 5) Management: funzionalità che abilitano la gestione del sistema e dell'ecosistema;
- 6) Trustworthiness: funzionalità che abilitano la sicurezza, la privacy, la protezione, l'affidabilità e la resilienza.

1 Data Acquisition & Ingestion	9 Synthetic Data Generation	17 Enterprise System Integration	23 Edge AI & Intelligence	29 Prediction		39 Basic Visualization	45 Dashboards
2 Data Streaming	10 Ontology Management	18 Eng. System Integration	24 Command & Control	30 Machine Learning ML		40 Advanced Visualization	46 Continuous Intelligence
3 Data Transformation	11 Digital Twin (DT) Model Repository	19 OT/IoT System Integration	25 Orchestration	31 Artificial Intelligence AI	35 Prescriptive Recommendations	41 Real-time Monitoring	47 Business Intelligence
4 Data Contextualization	12 DT Instance Repository	20 Digital Twin Integration	26 Alerts & Notifications	32 Federated Learning	36 Business Rules	42 Entity Relationship Visualization	48 BPM & Workflow
5 Batch Processing	13 Temporal Data Store	21 Collab Platform Integration	27 Reporting	33 Simulation	37 Distributed Ledger & Smart Contracts	43 Augmented Reality AR	49 Gaming Engine Visualization
6 Real-time Processing	14 Data Storage & Archive Services	22 API Services	28 Data Analysis & Analytics	34 Mathematical Analytics	38 Composition	44 Virtual Reality VR	50 3D Rendering
7 Data PubSub Push	15 Simulation Model Repository	52 Device Management	54 Event Logging	56 Data Encryption	58 Security	60 Safety	51 Gamification
8 Data Aggregation	16 AI Model Repository	53 System Monitoring	54 Data Governance	57 Device Security	59 Privacy	61 Reliability	62 Resilience

Figura 2: La Digital Twin Capabilities Periodic Table

L'individuazione dei requisiti di capability che il Digital Twin deve soddisfare per raggiungere gli obiettivi stabiliti è un passaggio fondamentale per poter identificare le componenti tecnologiche per la realizzazione dell'architettura di sistema.



2.3.1 Tecnologie abilitanti

Si definiscono abilitanti quelle tecnologie che devono essere necessariamente integrate all'interno del sistema al fine di assicurarne il corretto funzionamento, abilitarne le funzionalità e consentire il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Le principali tecnologie abilitanti di un Digital Twin sono l'Internet of Things (IoT), il Cloud Computing e l'Edge Computing, il 5G, il Building Information Modelling (BIM), l'Intelligenza Artificiale (AI) e il Machine Learning (ML), i Big Data e l'Advanced Analytics.

Internet of Things (IoT)

Lo sviluppo della tecnologia IoT ha permesso la creazione di ambienti smart, in grado di generare una quantità senza precedenti di dati rilevati e trasmessi dai sensori. Questa tecnologia è alla base del Digital Twin in quanto abilita la sincronizzazione delle informazioni tra gemello reale e gemello virtuale.

Cloud Computing e Edge Computing

Il Digital Twin si fonda sullo scambio continuo di un gran numero di dati tra ambiente reale e virtuale e sull'analisi ed elaborazione delle informazioni acquisite dal sistema.

Il Cloud Computing offre potenza di calcolo e storage scalabili, essenziali per gestire grandi volumi di dati e operazioni di simulazione complesse.

L'Edge Computing consente di elaborare i dati in prossimità della fonte, riducendo i tempi di latenza e migliorando la reattività del sistema.

5G

La quinta generazione della telefonia mobile (5th Generation o 5G) consente di ottenere una maggiore efficienza e versatilità della rete. Permette di ottimizzare l'uso delle risorse di rete mediante la definizione di sottoreti virtuali indipendenti per ogni tipologia del servizio (slicing); consente una gestione dinamica della banda disponibile tramite sistemi automatizzati; permette una maggiore velocità di trasmissione dei dati e garantisce tempi di risposta in "tempo reale".

Building Information Modelling (BIM)

Il Building Information Modelling permette di avere in un unico modello, oltre ai dati geometrici propri di una rappresentazione tridimensionale, tutte le informazioni relative ad un edificio e



ai suoi componenti, dalla localizzazione geografica alle specifiche dei materiali, dai dati relativi a tempi e costi a quelli riguardanti l'impatto ambientale.

Il BIM rappresenta un componente fondante del Digital Twin per l'ambiente costruito in quanto costituisce la fedele replica digitale del gemello fisico, completa di tutte le informazioni necessarie a descriverlo.

L'importanza dell'utilizzo di modelli per la visualizzazione tridimensionale nel Digital Twin è legata alle abilità cognitive dell'essere umano: queste sono significativamente più sviluppate per la comprensione e interpretazione delle informazioni spaziali in forma visiva rispetto a quella testuale-descrittiva. La presenza di un modello 3D nel Digital Twin facilita notevolmente la contestualizzazione delle informazioni, rendendo ad esempio evidente l'esatto posizionamento dei dispositivi IoT negli ambienti e la configurazione spaziale di questi.

Intelligenza Artificiale e Machine Learning

Gli algoritmi di Intelligenza Artificiale e Machine Learning, opportunamente addestrati su set di dati storici, permettono l'analisi di grandi quantità di dati per identificare pattern. Questo consente di abilitare la previsione e l'ottimizzazione delle risorse per una migliore gestione dell'ambiente costruito.

Big Data e Advanced Analytics

Il crescente incremento della potenza computazionale, reso possibile anche grazie all'avvento del Cloud, ha permesso di aumentare esponenzialmente la capacità di processare dati e di eseguire avanzate operazioni di analytics. Le tecnologie di Big Data permettono di raccogliere, archiviare e analizzare grandissimi volumi di dati provenienti da diverse fonti, mentre gli strumenti di analytics avanzati supportano l'estrazione di insights utili per la gestione e l'ottimizzazione dell'ambiente costruito.

2.3.2 Soluzioni tecnologiche

Una soluzione tecnologica è una combinazione di hardware, software e servizi progettata per implementare una determinata tecnologia per uno scopo specifico.

Una singola tecnologia può essere tradotta in molteplici soluzioni tecnologiche. La scelta di una soluzione tecnologica piuttosto che un'altra può derivare da diversi fattori, tra cui il tipo di distribuzione (proprietaria o Open Source), le opzioni di licenza e i relativi costi associati e le eventuali capacità di programmazione richieste per l'utilizzo.

3 STRUTTURA METODOLOGICA

Il presente Twin Handbook rappresenta uno strumento operativo di supporto alla progettazione e realizzazione di piattaforme per la creazione di Digital Twin per l'ambiente costruito, con particolare riferimento a edifici, impianti e sistemi urbani.

La tecnologia dei gemelli digitali pone al centro la gestione digitale del ciclo di vita delle opere architettoniche e urbanistiche, attraverso processi basati su sistemi di information management e intelligenza artificiale a supporto dei processi decisionali. In particolare, sfruttando le sue capacità di simulazione, controllo e monitoraggio, gestione, ottimizzazione e automazione, l'uso del Digital Twin mira a garantire un efficiente ed efficace perseguimento di obiettivi di efficienza energetica, sostenibilità ambientale, sostenibilità economica, fruizione e valorizzazione, safety & security e gestione urbana.

Al fine di rendere i contenuti del presente manuale applicabili e replicabili nei diversi contesti, questo documento fa riferimento, strumentalmente, a una struttura metodologica articolata in tre categorie di intervento (nuova costruzione, rigenerazione dell'esistente, trasformazione), tre fasi (progettazione, esecuzione e esercizio) e sei obiettivi (efficienza energetica, sostenibilità ambientale, sostenibilità economica, fruizione e valorizzazione, safety & security e gestione urbana).

L'inquadramento dello specifico caso d'uso all'interno di questa struttura metodologica risulta fondamentale per la definizione degli input, dei KPI, delle capabilities e delle tecnologie abilitanti che dovranno caratterizzare il Digital Twin che ci si propone di realizzare.

3.1 CATEGORIE DI INTERVENTO

La struttura metodologica cui fa riferimento il presente Twin Handbook prevede, come primo passaggio, l'inquadramento del caso d'uso all'interno di una delle seguenti categorie di intervento:

1. **Nuova costruzione:** questa categoria include gli interventi edilizi e urbanistici di nuova realizzazione;
2. **Rigenerazione dell'esistente:** ricadono in questa categoria tutti quegli interventi edilizi e urbanistici effettuati sull'esistente mantenendo invariata la destinazione d'uso;



3. **Trasformazione:** appartengono a questa categoria gli interventi di trasformazione edilizia e urbanistica del territorio che comportano un cambio di destinazione d'uso dell'esistente.

La definizione della categoria di intervento a cui appartiene il caso d'uso per cui si vuole sviluppare un Digital Twin risulta fondamentale in quanto ha un impatto sul tipo di dati che dovranno alimentare il Digital Twin stesso. Ad esempio, nel caso di interventi sull'esistente (categorie 2 e 3) si potranno utilizzare dati storici dell'edificio o della porzione di territorio su cui si interviene; diversamente, nel caso di una nuova costruzione (categoria 1) questi dati non saranno disponibili e si dovrà far riferimento a dati raccolti su casi d'uso analoghi.

3.2 FASI

Il Digital Twin, attraverso la gestione dei dati ottenuti in tempo reale dalla connessione tra ambiente fisico e virtuale, ha il potenziale di offrire moltissimi vantaggi all'industria dell'ambiente costruito, favorendo il miglioramento dei processi decisionali basati sui dati lungo l'intero ciclo di vita degli asset (Delgado et al., 2021; AlBalkhy et al., 2024).

Nell'ambito di progetti architettonici e urbanistici, questa tecnologia può, infatti, portare beneficio a diversi processi durante le fasi di progettazione, costruzione e gestione e può svolgere un ruolo cruciale nella gestione e nel trasferimento di informazioni durante tutte le fasi del ciclo di vita di un progetto (Moretti et al., 2022; Shahzad et al., 2022).

Un Digital Twin può, ad esempio, facilitare l'analisi di fattibilità di un progetto, assicurando l'allineamento con gli obiettivi prefissati, agevolare il monitoraggio dell'avanzamento dei lavori secondo il cronoprogramma stabilito, controllare le prestazioni di un edificio garantendone una gestione efficace (Piras et al., 2024).

Dati di input, KPI e tecnologie abilitanti di un Digital Twin variano in funzione della fase del processo. Una volta definita la categoria di intervento è necessario, quindi, identificare per quale fase si vuole realizzare il Digital Twin.

La struttura metodologica alla base del presente Twin Handbook fa riferimento alle tre fasi principali del processo edilizio:

1. Progettazione
2. Esecuzione
3. Esercizio



3.2.1 Fase di progettazione

La struttura metodologica inquadra all'interno di questa fase i Digital Twin che vengono realizzati a supporto del processo di pianificazione e progettazione urbanistica, architettonica e edilizia.

La principale caratteristica che differenzia il Digital Twin in fase di progettazione da quelli in fase di esecuzione e di esercizio è il fatto che entrambi i gemelli appartengono al mondo digitale. In questa fase, infatti, il gemello fisico ancora non esiste, ma è costituito dal progetto e dal processo di progettazione. Questo rende meno intuitivo il concetto di Digital Twin in fase di progettazione (Abou-Ibrahim et al., 2022).

La complessità e l'unicità di ogni progetto, nonché la natura frammentata, iterativa ed esploratoria del processo di design rendono complesso pianificare, programmare e controllare la fase di progettazione. Tuttavia, l'uso del Digital Twin può supportare il monitoraggio e il controllo di questo processo. Guardare, infatti, alla progettazione dal punto di vista della generazione delle informazioni può aiutare a razionalizzare il processo stesso e a standardizzare e automatizzare le attività che lo compongono. Le informazioni sul processo di progettazione possono essere acquisite e analizzate mediante l'introduzione di KPI di riferimento, che possono essere utilizzati come sensori per rivelare le dinamiche di questo processo, aumentando la consapevolezza dei progettisti, migliorando la trasparenza del processo e aiutando i responsabili di progetto a gestire meglio l'avanzamento della progettazione e la condivisione delle informazioni (Abou-Ibrahim et al., 2022).

Il Digital Twin in fase di progettazione può facilitare il processo decisionale grazie alla sua capacità di presentare analisi "what-if" basate sui dati. Queste consentono di testare e valutare le diverse ipotesi progettuali rispetto a dati contestuali o previsti, scartando le opzioni che non rispecchiano gli intenti progettuali, che non soddisfano i criteri stabiliti dai clienti o che non risultano conformi alle normative vigenti (Shahzad et al., 2022). Dati storici di progetti che presentano caratteristiche simili possono costituire una preziosa fonte di input per le analisi effettuate dal Digital Twin.

Il Digital Twin permette, quindi, di migliorare la qualità della progettazione e di ridurre, conseguentemente, il numero di richieste di chiarimenti e informazioni da parte dei vari stakeholder e, soprattutto, il numero di modifiche al progetto in corso d'opera.



I principali obiettivi per cui può essere realizzato un Digital Twin in fase di progettazione includono (Piras et al., 2024):

- la simulazione e l'analisi di scenari what-if;
- il miglioramento e l'ottimizzazione della progettazione;
- l'analisi dell'impatto ambientale;
- l'analisi a livello di singolo asset, distretto o città;
- la progettazione basata su dati, informazioni ed ecosistemi connessi;
- il miglioramento dell'efficienza operativa dell'ambiente costruito (flussi di traffico, affollamento, energia, etc.).

3.2.2 Fase di esecuzione

La seconda fase prevista dalla struttura metodologica è la fase di esecuzione, ovvero quella in cui viene realizzato il progetto architettonico o urbanistico. In questa fase il gemello fisico è costituito dal cantiere.

Il gemello digitale è alimentato dalle tecnologie di rilevamento presenti in cantiere quali sensori integrati all'interno di macchinari o telecamere che, attraverso algoritmi di Computer Vision, permettono di trasmettere al Digital Twin informazioni aggiornate in tempo reale su ciò che accade on-site.

I Digital Twin a supporto della fase di cantiere possono avere molteplici applicazioni, che includono il monitoraggio continuo dell'avanzamento dei lavori, il tracciamento automatico delle risorse, la gestione della logistica, la manutenzione predittiva dei macchinari, la safety e la security, il coordinamento delle squadre di cantiere.

Attraverso uno scambio continuo di dati con il gemello fisico, il Digital Twin è in grado di riflettere fedelmente le condizioni in cui si trova il cantiere in ogni momento, consentendo di avere informazioni sui materiali, sui macchinari e persino sui lavoratori; permette, in questo modo, di abilitare il monitoraggio continuo e in tempo reale dello stato di avanzamento dei lavori (Shahzad et al., 2022).

L'uso del Digital Twin permette di migliorare notevolmente la logistica di cantiere, favorendo la gestione delle forniture in modalità just in time. Grazie al tracciamento automatico delle risorse, il Digital Twin può fungere da sistema di supporto alle decisioni per assicurare che le risorse siano disponibili in cantiere quando necessario, consentendo di eliminare i ritardi e ridurre i costi operativi (Ammar et al., 2022). Ad esempio, un Digital Twin permette di identificare per



tempo quali risorse devono essere rifornite e, al contrario, evitare che vengano consegnati materiali non ancora necessari che occuperebbero inutilmente spazio in cantiere.

L'implementazione di algoritmi di Machine Learning per la manutenzione predittiva dei macchinari consente di evitare guasti imprevisti che comporterebbero ritardi nelle lavorazioni. Le tecnologie di rilevamento indossabili, abbinate alle tecnologie di visualizzazione, all'IoT e all'intelligenza artificiale, possono creare opportunità per una gestione proattiva della sicurezza per rilevare e risolvere problemi prima che si verifichino incidenti o infortuni; l'uso dei Digital Twin può, in questo modo, portare grandi vantaggi dal punto di vista della safety, consentendo potenzialmente di raggiungere l'obiettivo di un cantiere con zero incidenti (Ammar et al., 2022). L'uso del Digital Twin può favorire la comunicazione, il coordinamento, la cooperazione e la collaborazione (modello delle Quattro C) tra le diverse squadre di cantiere. In particolare, per promuovere dei team di lavoro ad alte prestazioni, la collaborazione risulta fondamentale in quanto rappresenta il mutuo coinvolgimento delle parti in uno sforzo comune. Il Digital Twin, fornendo una piattaforma accessibile in grado di mettere in relazione informazioni provenienti da diverse fonti e parti interessate, può consentire ai diversi attori coinvolti in un cantiere di prevedere scenari per generare previsioni e adottare le misure preventive necessarie nel ciclo di vita del progetto di costruzione (Ammar et al., 2022).

3.2.3 Fase di esercizio

Un Digital Twin in fase di esercizio può contribuire a migliorare la gestione e il monitoraggio dell'ambiente costruito sotto diversi aspetti.

Le possibili applicazioni in questa fase includono l'efficienza energetica e la sostenibilità ambientale, la manutenzione predittiva, il miglioramento delle strategie di safety and security, la riduzione dei costi di gestione (Piras et al., 2024).

Il flusso continuo di dati provenienti dal gemello fisico e analizzato dal gemello digitale può servire come base di supporto per prendere decisioni informate e per fare analisi predittive relative ai consumi energetici o al benessere termo-igrometrico degli occupanti (Ammar et al., 2022).

La storicizzazione dei dati di monitoraggio degli impianti e dei relativi interventi di manutenzione permette, attraverso l'uso di algoritmi di Intelligenza Artificiale e Machine Learning, di prevedere guasti e anomalie dei sistemi e di intervenire preventivamente, al fine di mantenere la continuità operativa e ridurre i costi di gestione.



La capacità del Digital Twin di effettuare simulazioni e analisi di scenari what-if può essere applicata all'ambito della sicurezza per testare virtualmente diverse strategie finalizzate alla gestione efficace delle emergenze, evitando così complesse e costose esercitazioni.

In fase di esercizio il Digital Twin può, inoltre, supportare il processo decisionale relativo alla gestione degli spazi.

I dati raccolti in fase di esercizio possono costituire la base per le analisi di scenari what-if effettuate da Digital Twin a supporto della fase di progettazione per gli edifici futuri.

3.3 OBIETTIVI

I Digital Twin possono essere sviluppati per diversi scopi. Le principali applicazioni per l'ambiente costruito possono essere riassunte nei seguenti sei obiettivi:

1. Efficienza energetica
2. Sostenibilità ambientale
3. Sostenibilità economica
4. Fruizione e valorizzazione
5. Safety & security
6. Gestione urbana

3.3.1 Efficienza energetica

L'efficienza energetica rappresenta uno dei principali campi di applicazione del Digital Twin per l'ambiente costruito.

L'uso della tecnologia dei gemelli digitali per il miglioramento delle prestazioni energetiche è stato riscontrato in diversi studi che interessano tutte le fasi del ciclo di vita del progetto.

In fase di progettazione, un Digital Twin consente di effettuare simulazioni avanzate testando diversi parametri quali energia, temperatura, illuminazione, qualità dell'aria interna. Questo permette di valutare le opzioni progettuali migliori dal punto di vista dell'efficienza energetica.

In fase di esercizio, il flusso di dati bidirezionale consente di monitorare il sistema edificio-impianto misurandone il consumo di energia, facendo analisi di performance energetica e simulando scenari what-if al fine di identificare opportunità di miglioramento dal punto di vista dell'efficienza energetica, con una conseguente riduzione dell'impronta di carbonio e dei costi di gestione.



3.3.2 Sostenibilità ambientale

L'urgente necessità di affrontare il cambiamento climatico e la spinta verso un'economia a basse emissioni di carbonio stanno ponendo il settore delle costruzioni davanti alla sfida di adottare nuovi approcci costruttivi e utilizzare materiali più sostenibili (Ammar et al., 2022).

La costruzione, quale attività intrinsecamente intensiva in termini di risorse e con impatti ambientali notevoli, è infatti al centro di un crescente interesse dal punto di vista della sostenibilità ambientale.

Al fine di ridurre l'impronta ecologica risulta essenziale, quindi, adottare pratiche sostenibili durante tutto il ciclo di vita dell'edificio, dalla progettazione alla fase di gestione e monitoraggio.

Tuttavia, risulta notevolmente complesso effettuare una valutazione completa del ciclo di vita (LCA) senza fare ricorso a sofisticati strumenti automatizzati e a un sistema strutturato di gestione dei dati. Il Digital Twin, in virtù della sua abilità di gestire sistemi di elevata complessità, si presenta come una soluzione intrinsecamente idonea.

I Digital Twin permettono di raccogliere grandi quantità di dati relative a un edificio durante tutto il suo ciclo di vita. In fase di esercizio, consentono di monitorare in tempo reale, attraverso l'uso di dispositivi IoT, i consumi idrici ed energetici di un edificio, nonché la percentuale di rifiuti riciclati. Questi dati vengono analizzati dal gemello digitale che li utilizza all'interno di simulazioni finalizzate a migliorare la sostenibilità.

I Digital Twin degli edifici nella loro fase operativa possono servire come input per le fasi di pianificazione e progettazione di progetti futuri, per ottenere una progettazione più sostenibile (Ammar et al., 2022).

3.3.3 Sostenibilità economica

L'industria delle costruzioni è caratterizzata da un uso intensivo di risorse energetiche, manodopera e capitale. Durante il ciclo di vita degli edifici pubblici, circa l'85% dei costi deriva dalle operazioni di gestione e manutenzione (Tao et al., 2019). Emerge quindi la necessità di adottare nuove tecnologie digitali non solo per garantire gli obiettivi di sostenibilità ambientale ed efficienza energetica ma anche per risolvere il problema del controllo dei costi di gestione, trovando la soluzione ottimale tra benefici economici, sociali e ambientali (Liu et al., 2021).



I Digital Twin, attraverso simulazioni e analisi di tipo "what-if", consentono di prevedere lo stato futuro degli edifici aiutando a prevedere ed evitare costi imprevisti, a identificare le inefficienze degli impianti e a stimare con maggiore precisione quando siano necessari interventi di manutenzione.

In fase di esecuzione dell'opera, il Digital Twin può servire da sistema di supporto alle decisioni per assicurare che i materiali siano disponibili in cantiere quando necessari. Il Digital Twin consente, così, di eliminare i ritardi e ridurre i costi operativi basandosi su dati real-time che mostrano dove vengono utilizzati i materiali, quando è necessario ordinarne altri e in che quantità (Ammar et al., 2022).

Attraverso l'uso del Digital Twin è possibile avere una rappresentazione accurata e aggiornata dello stato del progetto, che può essere utilizzata per monitorare l'avanzamento dei lavori, identificare potenziali problemi e prendere decisioni informate. Questa tecnologia ha, quindi, il potenziale per rivoluzionare il settore edile riducendo i tempi di costruzione, migliorando la sicurezza e aumentando l'efficienza complessiva (Pal et al., 2023).

3.3.4 Fruizione e valorizzazione

I Digital Twin possono contribuire a valorizzare l'ambiente costruito e a migliorarne la fruizione da parte degli utenti.

Un Digital Twin può servire, ad esempio, a ottimizzare il processo di gestione degli spazi. Assicurare che gli ambienti siano utilizzati al meglio, evitando aree sottoutilizzate, può consentire di evitare costi inutili. Attraverso l'integrazione di tecniche di advanced analytics e di tecnologie avanzate quali la Computer Vision, il Digital Twin permette di monitorare l'affollamento e di raccogliere dati su come gli spazi sono utilizzati. L'analisi di questi dati permette di ottenere metriche relative al tasso di occupazione, come la media e il picco, che possono essere sfruttate da algoritmi di Intelligenza Artificiale per la definizione di strategie di ottimizzazione degli spazi. In aggiunta, analizzando il modo in cui gli spazi vengono utilizzati, si possono ottenere informazioni sulla percezione soggettiva del comfort degli occupanti dell'edificio.

Un'altra applicazione molto diffusa del Digital Twin è la manutenzione predittiva. Basandosi sull'analisi dei dati storici relativi alle manutenzioni, questa consente di ottimizzare i programmi di manutenzione, prevedendo e prevenendo i guasti. Attraverso la manutenzione predittiva è possibile, infatti, rilevare precocemente i segnali di malfunzionamento degli



impianti e delle infrastrutture, permettendo interventi tempestivi che prevengono guasti maggiori che potrebbero causare interruzioni significative. Questo permette di aumentare la vita utile e l'affidabilità degli impianti e di mantenere l'operatività dell'edificio, riducendo i tempi di inattività e i costi associati.

Il Digital Twin consente una gestione avanzata degli edifici in grado di aumentarne sia l'efficienza operativa sia l'attrattiva. Attraverso la simulazione e l'analisi di vari scenari di utilizzo, permette di identificare le opportunità di rinnovamento volte ad accrescere il valore immobiliare e culturale nel lungo termine.

Il Digital Twin supporta il processo decisionale basato sui dati: consente di intraprendere azioni strategiche di miglioramento e ristrutturazioni finalizzate a incrementare sia l'estetica sia la funzionalità degli spazi, rendendoli più invitanti e adatti alle esigenze degli utenti.

3.3.5 Safety & security

Il Digital Twin, grazie alla sua capacità di controllare le azioni e di fornire informazioni in tempo reale a tutte le parti interessate e a coloro che sono incaricati di prendere le decisioni, può svolgere un ruolo significativo nel migliorare le condizioni di sicurezza e prevenire i rischi negli edifici, nelle città e nei cantieri (Teisserenc et al., 2021).

Il Digital Twin può facilitare la gestione della sicurezza nel mondo delle costruzioni principalmente in tre modi: promuovendo una progettazione e pianificazione orientate alla sicurezza al fine di prevenire i rischi; prevedendo in modo proattivo i rischi attraverso il monitoraggio e il controllo e avvisando dei pericoli; facilitando il miglioramento continuo (J. Teizer et al., 2022).

In fase di cantiere un Digital Twin consente di tracciare i materiali pericolosi per garantire che siano adeguatamente immagazzinati. Il sistema può, inoltre, monitorarli per inviare segnali di allarme tempestivi per prevenire eventuali disastri in cantiere (Ammar et al., 2022).

Il Digital Twin può anche essere usato per edifici complessi con grandi afflussi di persone per migliorare la gestione della sicurezza interna: inserendo sensori all'interno degli edifici, si possono eseguire diverse simulazioni di pericolo, come intrusioni illegali, sovraffollamento e incendi (Ammar et al., 2022).



Le conoscenze sulla sicurezza acquisite da diversi progetti possono essere inserite nel Digital Twin di un progetto futuro o in corso per eseguire simulazioni di sicurezza e identificare potenziali pericoli prima che si verifichino (Ammar et al., 2022).

La gestione informatizzata della sicurezza garantisce un ambiente sicuro e protetto. Tecnologie avanzate come sensori, videocamere e sistemi di controllo degli accessi consentono di monitorare e controllare in tempo reale tutte le attività all'interno e attorno a un edificio. Questo approccio consente una risposta rapida e coordinata a qualsiasi incidente, prevenendo situazioni di rischio e minimizzando le potenziali minacce.

3.3.6 Gestione urbana

I Digital Twin possono avere diverse applicazioni e casi d'uso nello sviluppo delle smart city, con molti vantaggi attesi. Ad esempio, i dati raccolti dai sensori IoT e incorporati nei servizi centrali all'interno di una città possono aiutare a creare algoritmi di intelligenza artificiale all'avanguardia, che possono essere utilizzati per applicazioni di gestione della città tramite Digital Twin (Wagner et al, 2019; Kaur et al., 2019).

Ciò può comportare una migliore gestione del traffico e una riduzione della congestione e delle emissioni di carbonio, contribuendo allo sviluppo di città sostenibili (Fuller et al., 2020). Una rete di città intelligente può includere edifici, strade, servizi pubblici, logistica, persone e reti elettriche, che possono tutti trarre vantaggio dalle applicazioni del processo decisionale basato sui dati utilizzando i gemelli digitali (Shahzad, 2022).

4 FLUSSO DI LAVORO

L'industria delle costruzioni ha iniziato a considerare i Digital Twin come un fattore abilitante per la sua trasformazione digitale, in grado di migliorare gli scarsi risultati del settore nel campo della digitalizzazione (Brilakis et al., 2019). Tuttavia, la ricerca e l'applicazione di questa tecnologia nell'ambiente costruito è ancora agli albori rispetto ad altri settori (AlBalkhy et al., 2024). Infatti, nonostante il crescente interesse per la tecnologia dei gemelli digitali, ad oggi ancora non sono state definite delle linee guida o degli standard di riferimento per il settore delle costruzioni. Emerge, quindi, la necessità di creare un allineamento sulle metodologie da seguire per la progettazione e realizzazione di piattaforme per il Digital Twin per la gestione dell'ambiente costruito.

In questo contesto, il presente Twin Handbook vuole essere uno strumento operativo di supporto ai diversi soggetti che operano in questo settore (progettisti, stazioni appaltanti, operatori economici, gestori di patrimoni immobiliari, facility manager, etc.) che sono coinvolti nella definizione e implementazione di strumenti e metodi data driven orientati al Digital Twin nell'ambito dei processi di pianificazione, progettazione, realizzazione, gestione, monitoraggio e fruizione dell'ambiente costruito.

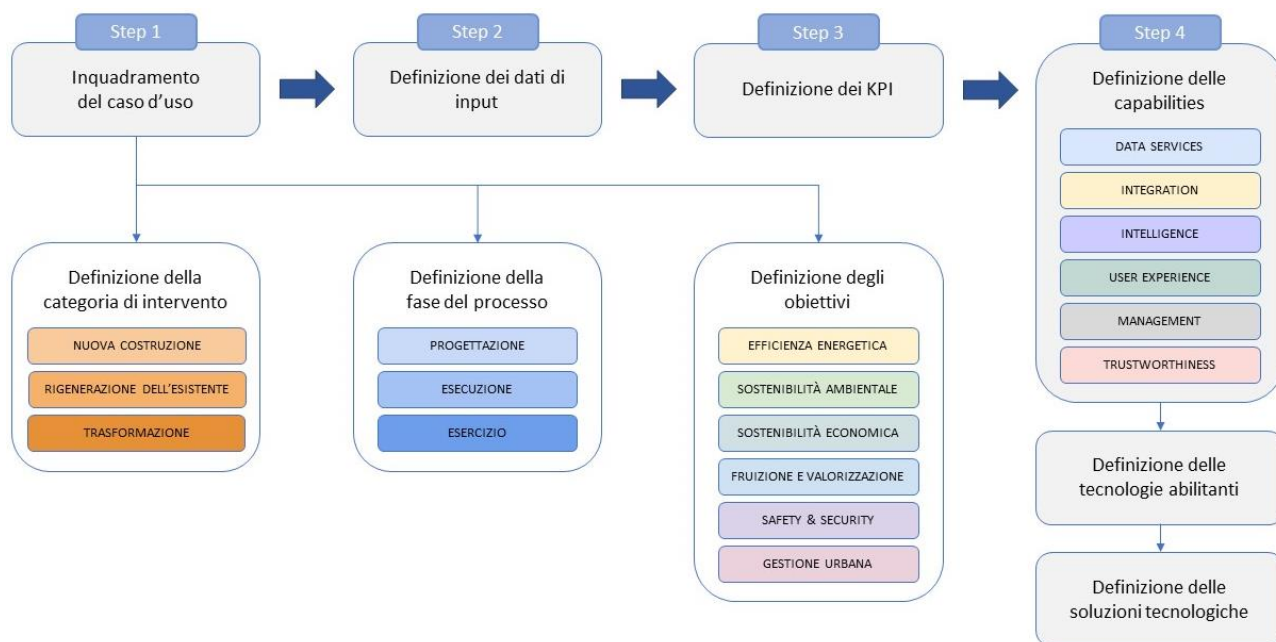


Figura 3: Schema del flusso di lavoro per la definizione di un'architettura di sistema di un Digital Twin



È stato, pertanto, definito un flusso di lavoro articolato in quattro step che, partendo dalla struttura metodologica esposta nel capitolo precedente, permette di definire i requisiti che un Digital Twin deve soddisfare in funzione dello specifico caso d'uso. Questo permette di identificare le componenti tecnologiche che costituiranno l'architettura di sistema del gemello digitale.

Step 1 – Inquadramento del caso d'uso all'interno della struttura metodologica

I Digital Twin possono essere realizzati per diversi scopi e durante diversi momenti del ciclo di vita di un progetto. Le funzionalità e i requisiti del Digital Twin variano in base all'obiettivo per cui lo si vuole realizzare e alla fase in cui ci si trova.

Il primo step del flusso di lavoro proposto consiste, quindi, nell'inquadrare all'interno della struttura metodologica il caso d'uso, definendone la categoria di intervento, la fase del processo e gli obiettivi.

Step 2 – Definizione dei dati di input

Un Digital Twin nell'ambiente costruito può essere definito come una rappresentazione basata su un modello 3D di un bene fisico (il gemello fisico) che può essere creata per servire uno scopo specifico nel ciclo di vita di un progetto; il gemello digitale contiene i dati necessari a simulare le caratteristiche realistiche del gemello fisico per lo specifico caso d'uso (Brilakis et al., 2019). Questa definizione sottolinea come i dati di input che devono alimentare un Digital Twin siano intrinsecamente legati al caso d'uso. Per questo motivo, una volta che il caso d'uso è stato definito e inquadrato all'interno della struttura metodologica, il flusso di lavoro proposto prevede come step successivo la definizione di quali dati di input il Digital Twin dovrà acquisire. Tali dati, in base alle esigenze, possono essere acquisiti secondo una modalità di flusso continuo o discontinuo, possono essere di varia natura e possono provenire da diverse fonti (dati provenienti da sensori IoT, dati geometrici, specifiche, abachi, report finanziari, documenti di processo, etc.).

Step 3 – Definizione dei Key Performance Indicators (KPI)

Il terzo step prevede la definizione di Key Performance Indicators (KPI) o indicatori chiave di prestazione, metriche fondamentali che permettono di misurare e valutare l'efficienza e l'efficacia dell'architettura di Digital Twin rispetto agli obiettivi stabiliti. Ove possibile, i KPI vengono derivati da parametri presenti in regolamenti e normative tecniche vigenti, protocolli



di certificazioni energetico ambientali e BAT (Best Available Techniques o Migliori Tecniche Disponibili).

Step 4 – Definizione delle Capabilities, delle tecnologie abilitanti e delle soluzioni tecnologiche

Definiti il caso d'uso del Digital Twin, i dati di input che devono alimentarlo e le metriche per valutarne la performance (KPI), si può procedere all'identificazione delle componenti tecnologiche per la realizzazione dell'architettura di sistema.

Per fare questo bisogna, innanzitutto, individuare le funzionalità necessarie al Digital Twin per il raggiungimento degli obiettivi stabiliti. L'individuazione dei requisiti di capability che il sistema deve soddisfare è un passaggio fondamentale per la successiva scelta delle tecnologie e soluzioni tecnologiche da adottare.

Facendo riferimento alla *Digital Twin Capabilities Periodic Table* sviluppata dal Digital Twin Consortium si procede, come prima cosa, alla definizione di quali capability il Digital Twin debba possedere in funzione dello specifico caso d'uso. Le capabilities sono raggruppate nelle seguenti categorie: Data Services, Integration, Intelligence, User Experience, Management e Trustworthiness.

Una volta completata questa analisi si procede, per ciascuna capability identificata, all'individuazione di quali tecnologie abilitanti debbano essere integrate nell'architettura di sistema dello specifico Digital Twin.

L'ultimo passaggio consiste, infine, nell'individuazione delle soluzioni tecnologiche ritenute più idonee per la realizzazione della piattaforma di Digital Twin in funzione del caso d'uso specifico.



5 TWIN TOOLKIT

A corredo del presente manuale è stato sviluppato uno strumento, chiamato Twin Toolkit, che consente di seguire il flusso di lavoro descritto nel capitolo precedente partendo da una base di riferimento. Questo strumento è stato pensato per dare supporto a chiunque voglia realizzare un Digital Twin per la gestione data-driven dell'ambiente costruito e ha, pertanto, come potenziali fruitori le pubbliche amministrazioni e gli enti pubblici, le stazioni appaltanti e gli operatori economici, i professionisti del settore e le organizzazioni private, le università, i centri di ricerca e le organizzazioni non governative.

Il Twin Toolkit consiste in una matrice di riferimenti teorico-metodologici e operativi e di requisiti tecnici per la definizione di un'architettura di sistema finalizzata alla realizzazione di piattaforme di Digital Twin. Queste piattaforme devono essere in grado di abilitare capacità (capabilities) di simulazione, controllo e monitoraggio, gestione, ottimizzazione, automazione, etc. in funzione dei diversi riferimenti della struttura metodologica (categorie di intervento, fasi di processo e obiettivi).

Il Twin Toolkit è stato sviluppato su base Excel ed è costituito da una cartella di lavoro composta da più fogli. Il primo di questi, il Sommario, presenta la struttura del documento e riporta i collegamenti ipertestuali ai singoli fogli, al fine di facilitare la fruizione della cartella di lavoro e la navigazione all'interno della stessa.

In base alla loro funzione, i fogli di lavoro sono organizzati in tre categorie: Definizioni, Database e User Interface.

5.1 DEFINIZIONI

5.1.1 Struttura metodologica

In questo foglio sono riportati i riferimenti alla struttura metodologica illustrata nel capitolo 3: categorie di intervento, fasi di processo e obiettivi.

Per una più puntuale definizione dei Digital Twin si è deciso di identificare, per ciascuno dei sei obiettivi definiti nella struttura metodologica, dei sotto-obiettivi, per un totale di 20:



Figura 4: Definizione dei 20 sotto-obiettivi

Dalla combinazione delle 3 categorie di intervento, delle 3 fasi di processo e dei 20 obiettivi risultano **180** possibili **casi d'uso**.



CATEGORIA DI INTERVENTO	FASE	OBBIETTIVO
Nuova costruzione	Progettazione	Efficienza Gestione energetica dell'edificio energetica:
Rigenerazione dell'esistente	Esecuzione	Efficienza Gestione di microgrid energetiche energetica:
Trasformazione	Esercizio	Efficienza Gestione della qualità ambientale energetica:
		Sostenibilità Gestione ambientale di un edificio ambientale:
		Sostenibilità Gestione ambientale di un complesso di edifici ambientale:
		Sostenibilità Gestione sostenibile delle infrastrutture ambientale:
		Sostenibilità What-if analysis economica:
		Sostenibilità Gestione e ottimizzazione delle risorse economica:
		Sostenibilità Monitoraggio continuo economica:
		Fruizione e valorizzazione: Gestione e ottimizzazione degli spazi di un edificio
		Fruizione e valorizzazione: Manutenzione predittiva
		Fruizione e valorizzazione: Valorizzazione
		Safety & security: Gestione e monitoraggio delle situazioni critiche
		Safety & security: Gestione remota degli interventi
		Safety & security: Gestione informatizzata della security
		Gestione urbana: Gestione energetica e ambientale
		Gestione urbana: Gestione dei flussi e traffico
		Gestione urbana: Pianificazione urbana e rifunionalizzazione
		Gestione urbana: Gestione sociale e antropologica
		Gestione urbana: Valorizzazione

Figura 5: La struttura metodologica del Twin Toolkit



5.1.2 Capabilities

In questo foglio sono riportate tutte le capabilities definite nella *Digital Twin Capabilities Periodic Table* emanata dal Digital Twin Consortium, organizzate secondo i sei raggruppamenti concettuali: Data Services, Integration, Intelligence, User Experience (UX), Management e Trustworthiness.

5.1.3 Glossario

Questo foglio riporta le definizioni del Digital Twin Consortium delle diverse capabilities individuate nella *Digital Twin Capabilities Periodic Table*.

Per ciascuna capability viene indicato il raggruppamento concettuale di appartenenza, la funzionalità che permette di abilitare e lo scopo per cui è stata pensata.

5.1.4 Acronimi

Sono riportati tutti gli acronimi che compaiono all'interno del Twin Toolkit.

5.1.5 Tecnologie

Questo foglio contiene una panoramica delle tecnologie e delle relative soluzioni tecnologiche che, in base al caso d'uso, possono essere adottate in funzione di ciascuna capability.

5.2 DATABASE

I fogli appartenenti a questa categoria costituiscono il database dello strumento.

Questi fogli contengono, infatti, tutte le informazioni che vengono restituite all'interno dell'interfaccia utente e sono, quindi, necessarie al corretto funzionamento del Twin Toolkit.

5.2.1 Database dei dati di Input

Il foglio *Data_Input* consiste in una matrice all'interno della quale sono stati inseriti, per ciascuno dei 180 possibili casi d'uso, i sei principali dati di input che risulta necessario acquisire per alimentare la piattaforma di Digital Twin secondo modalità di flusso continuo o discontinuo.

Questi dati, di natura quantitativa, possono provenire da varie fonti quali sensori IoT, fogli di lavoro, documenti di processo, certificazioni, bollette etc.

In corrispondenza di ciascun dato di input sono state riportate le relative unità di misura.



5.2.2 Database dei KPI

Analogamente a quanto contenuto nel foglio *Data_Input*, il foglio *Data_KPI* contiene una matrice che riporta, per i 180 casi d'uso possibili, i sei principali Key Performance Indicators (KPI) necessari a valutare l'efficacia dell'architettura di Digital Twin proposta.

Ove possibile, i KPI individuati (quantitativi e semiquantitativi), sono stati derivati da parametri già utilizzati in regolamenti e normative tecniche vigenti, protocolli di certificazioni energetico ambientali, e BAT (Best Available Techniques o Migliori Tecniche Disponibili).

Per ogni KPI sono stati individuati i relativi indicatori di riferimento.

5.2.3 Database delle capabilities, delle tecnologie abilitanti e delle soluzioni tecnologiche

I fogli *Data_Data Services*, *Data_Integration*, *Data_Intelligence*, *Data_UX*, *Data_Management* e *Data_Trustworthiness* costituiscono il database relativo alle capabilities, alle tecnologie abilitanti e alle soluzioni tecnologiche.

Per ogni gruppo concettuale di capability (Data Services, Integration, Intelligence, User Experience, Management e Trustworthiness) è stata creata una matrice che riporta, per i 180 casi d'uso, le principali capabilities che il Digital Twin deve possedere in funzione della sua categoria di intervento, della fase di processo a cui si riferisce e dello specifico obiettivo.

L'identificazione delle singole capabilities permette di definire in dettaglio le tecnologie che devono essere integrate nell'architettura di sistema al fine di abilitare le specifiche funzionalità del Digital Twin che si vuole realizzare.

Pertanto, in relazione a ciascuna capability sono state individuate e inserite nella matrice le tecnologie abilitanti e le corrispondenti soluzioni tecnologiche ritenute funzionali al caso d'uso.

I fogli *Data_Data Services*, *Data_Integration*, *Data_Intelligence*, *Data_UX*, *Data_Management* e *Data_Trustworthiness*, pur costituendo la base informativa su cui si fonda il documento, non sono destinati all'utilizzo diretto da parte dell'utente finale e sono stati, pertanto, disposti per ultimi nell'ordine dei fogli della cartella di lavoro.

5.3 USER INTERFACE

Costituisce l'interfaccia utente ed è strutturata nei seguenti fogli di lavoro: *Matrice*, *Input*, *KPI*, *Data Services*, *Integration*, *Intelligence*, *User Experience (UX)*, *Management* e *Trustworthiness*.



Il foglio *Matrice* permette di scegliere il caso d'uso e di inquadrarlo nella struttura metodologica di riferimento, selezionando da dei menù a tendina la categoria di intervento, la fase e l'obiettivo di interesse.

In risposta alla selezione effettuata nel foglio *Matrice*, i dati contenuti nei fogli *Input*, *KPI*, *Data Services*, *Integration*, *Intelligence*, *User Experience (UX)*, *Management* e *Trustworthiness* si aggiornano dinamicamente, per restituire esclusivamente le informazioni che si riferiscono al caso d'uso di interesse. Questi fogli contengono, infatti, delle tabelle i cui contenuti sono alimentati dal database, descritto nel paragrafo precedente, che viene opportunamente filtrato.

Nello specifico:

- Il foglio *Input* restituisce una tabella con i sei principali dati di input che risulta necessario acquisire per alimentare la piattaforma di Digital e le relative unità di misura;
- Il foglio KPI restituisce una tabella con i sei principali Key Performance Indicators (KPI) necessari a valutare l'efficacia dell'architettura di Digital Twin proposta e i relativi indicatori di riferimento;
- I fogli *Data_Data Services*, *Data_Integration*, *Data_Intelligence*, *Data_UX*, *Data_Management* e *Data_Trustworthiness* riportano in tabella, ciascuno per il gruppo di capabilities a cui si riferisce, le capabilities, le tecnologie abilitanti e le soluzioni tecnologiche da integrare nell'architettura di sistema del Digital Twin.

In funzione del caso d'uso scelto, quindi, il Twin Toolkit restituisce all'utente otto tabelle che identificano i dati di input, i KPI, le capabilities, le tecnologie abilitanti e le soluzioni tecnologiche che devono essere integrate nello specifico Digital Twin. Questo set di informazioni forma la base di partenza per lo sviluppo di una piattaforma di Digital Twin per la gestione dell'ambiente costruito; consente, infatti, a un team di tecnici di elaborare un progetto esecutivo definito in tutte le singole tecnologie, open source e/o proprietarie, maggiormente compatibili ed efficaci con l'obiettivo individuato.

6 CASI STUDIO

I Digital Twin possono essere sviluppati per vari scopi, possono interessare diverse fasi di processo e operare a scale differenti.

Nell'Allegato 1 "Casi Studio" sono presentati sette casi studio che coprono diverse scale di progetto (dalla porzione di edificio fino alla scala urbana) e interessano varie categorie di intervento, fasi e obiettivi.

Questi casi studio permettono, quindi, di avere una panoramica di come può essere applicato il flusso di lavoro proposto nel presente manuale in funzione delle diverse combinazioni della struttura metodologica. Permettono, inoltre, di sperimentare e validare l'uso del Twin Toolkit ai fini della sua applicabilità e replicabilità nei vari contesti.

Le seguente tabella schematizza i casi studio analizzati, indicandone per ciascuno la scala di progetto, la categoria di intervento, la fase e gli obiettivi.

CASI STUDIO	SCALA	CATEGORIA DI INTERVENTO	FASE	OBIETTIVO
CASO STUDIO 1: Ex Palazzo degli Esami	Edificio	Trasformazione	Progettazione	Efficienza energetica: Gestione energetica dell'edificio
				Efficienza energetica: Gestione della qualità ambientale
				Sostenibilità ambientale: Gestione ambientale di un edificio
				Fruizione e valorizzazione: Gestione e ottimizzazione degli spazi di un edificio
				Fruizione e valorizzazione: Manutenzione predittiva
				Fruizione e valorizzazione: Valorizzazione
				Safety & security: Gestione e informatizzata della security
				Gestione urbana: Gestione dei flussi e traffico
CASO STUDIO 2: Palazzo San Felice	Edificio	Trasformazione	Esecuzione	Fruizione e valorizzazione: Valorizzazione
CASO STUDIO 3: Reparto operatorio	Porzione di edificio	Rigenerazione dell'esistente	Esercizio	Efficienza energetica: Gestione energetica dell'edificio
				Efficienza energetica: Gestione della qualità ambientale
				Fruizione e valorizzazione: Gestione e ottimizzazione degli spazi di un edificio
				Fruizione e valorizzazione: Manutenzione predittiva
				Safety & security: Gestione e monitoraggio delle situazioni critiche
				Safety & security: Gestione informatizzata della security

CASO STUDIO 4: Reparto degenze	Porzione di edificio	Rigenerazione dell'esistente	Esercizio	Efficienza energetica: Gestione energetica dell'edificio
				Efficienza energetica: Gestione della qualità ambientale
				Fruizione e valorizzazione: Gestione e ottimizzazione degli spazi di un edificio
				Fruizione e valorizzazione: Manutenzione predittiva
				Safety & security: Gestione e monitoraggio delle situazioni critiche
				Safety & security: Gestione informatizzata della security
CASO STUDIO 5: Sede del Servizio Patrimonio - Palazzo del Quirinale	Porzione di edificio	Rigenerazione dell'esistente	Esercizio	Efficienza energetica: Gestione energetica dell'edificio
				Efficienza energetica: Gestione della qualità ambientale
				Fruizione e valorizzazione: Gestione e ottimizzazione degli spazi di un edificio
				Safety & security: Gestione e monitoraggio delle situazioni critiche
CASO STUDIO 6: Castel Porziano	Complesso di edifici	Rigenerazione dell'esistente	Esercizio	Sostenibilità ambientale: Gestione ambientale di un complesso di edifici
				Safety & security: Gestione e monitoraggio delle situazioni critiche
				Gestione urbana: Gestione energetica e ambientale
CASO STUDIO 7: Tirana	Urbana	Rigenerazione dell'esistente	Esercizio	Gestione urbana: Gestione energetica e ambientale
				Gestione urbana: Gestione dei flussi e traffico
				Gestione urbana: Pianificazione urbana e rifunionalizzazione

Figura 6: Tabella riassuntiva dei casi studio analizzati nell'Allegato 1

7 BIBLIOGRAFIA

H. Abou-Ibrahim, E. Lappalainen & O. Seppänen (2022). Digital Twin of a Design Process: An Exploratory Study. Proceedings of the 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC30), 1198–1209. doi.org/10.24928/2022/0238

W. AlBalkhy, D. Karmaoui, L. Ducoulombier, Z. Lafhaj, T. Linner, (2024). Digital twins in the built environment: Definition, applications, and challenges. Automation in Construction. 162, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105368>.

Brilakis, I., Pan, Y., Borrmann, A., Mayer, H.-G., Rhein, F., Vos, C., et al. (2019). Built Environment Digital Twinning. International Workshop on Built Environment Digital Twinning Presented by TUM Institute for Advanced Study and Siemens AG. Available at: https://publications.cms.bgu.tum.de/reports/2020_Brilakis_BuiltEnvDT.pdf

M. Casini, Chapter 1 - Toward a new building era, Editor(s): Marco Casini, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Construction 4.0, Woodhead Publishing, 2022, Pages 3-60, ISBN 9780128217979, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821797-9.00011-8>.

CDBB. Monthly Paper: On the Governance of City Digital Twins; Centre for Digital Built Britain: Cambridge, UK, 2019. Available

online: <https://www.cdbb.cam.ac.uk/news/monthly-paper-governance-city-digital-twins> J.M.D. Delgado, L. Oyedele, Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing, Adv. Eng. Inform. 49 (2021) 1–27, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332>.

W. E. Deming (1982). Out of the Crisis, The Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, MA, USA

L. Floridi (2013). The Philosophy of Information. Oxford University Press, Oxford, UK. <https://books.google.co.uk/books?id=l8RoAgAAQBAJ>

Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; Barlow, C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. IEEE Access 2020, 8, 108952–108971.

N. Moretti, X. Xie, J. Garcia, J. Chang, A. K. Parlikad, (2022). Digital Twin based built environment asset management services development. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1101. 092023. 10.1088/1755-1315/1101/9/092023.

B. Teisserenc, S. Sepasgozar, Project data categorization, adoption factors, and non-functional requirements for Blockchain based digital Twins in the construction industry 4.0, Buildings 11 (2021) 1–51, <https://doi.org/10.3390/buildings11120626>.

J. Teizer, K.W. Johansen, C. Schultz, The concept of digital twin for construction safety, in: F. Jazizadeh, T. Shealy, M.J. Garvin (Eds.), Construction Research Congress 2022: Computer Applications, Automation, and Data AnalyticsV, 2022, pp. 1156–1165, <https://doi.org/10.1061/9780784483961.121>.



Kaur, M.J.; Mishra, V.P.; Maheshwari, P. The Convergence of Digital Twin, IoT, and Machine Learning: Transforming Data into Action. In *Digital Twin Technologies and Smart Cities; Internet of Things*; Springer: Singapore, 2019; pp. 3–17.

A. Pal, J. J. Lin, S.H. Hsieh, M. Golparvar-Fard (2023). Automated vision-based construction progress monitoring in built environment through digital twin Developments in the Built Environment, Volume 16, 100247

G. Piras, S. Agostinelli, F. Muzi. Digital Twin Framework for Built Environment: A Review of Key Enablers. *Energies* 2024, 17, 436, <https://doi.org/10.3390/en17020436>

M. Shahzad, M.T. Shafiq, D. Douglas, M. Kassem, Digital Twins in built environments: an investigation of the characteristics, applications, and challenges, *Buildings* 12 (2022) 1–19, <https://doi.org/10.3390/buildings12020120>.

E. Thomas and J. Bowman (2021). *Harnessing the Data Advantage in Construction*. San Rafael, CA: AUTODESK and FMI, 110.

Wagner, R.; Schleich, B.; Haefner, B.; Kuhnle, A.; Wartzack, S.; Lanza, G. Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products. *Procedia CIRP* 2019, 84, 88–93.