



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**SCUOLA DI SCIENZE**

*Dipartimento di Informatica - Scienza e Ingegneria – DISI*

**CORSO DI LAUREA IN INFORMATICA PER IL MANAGEMENT**

**GEMELLI DIGITALI URBANI: POTENZIALITÀ E  
CONTROVERSIE DI UNA TECNOLOGIA  
"DISRUPTIVE"**

**TESI DI LAUREA**

in

**STORIA E POLITICHE DEL DIGITALE**

**CANDIDATO:**  
Mattia Galletti

**RELATORE:**  
Prof. Mattia Frapporti

Anno Accademico 2023/2024

Sessione III



# Abstract

Come possono le città utilizzare le nuove tecnologie per prevedere e modellare il loro futuro? La risposta a questa domanda ruota attorno alla tecnologia del Digital Twin e alle sue modalità di utilizzo. I “gemelli digitali urbani” sono considerati una delle innovazioni più significative e promettenti nel panorama della gestione delle città. Queste repliche virtuali di processi, oggetti o sistemi fisici, infatti, offrono la possibilità di simulare, prevedere e ottimizzare le operazioni in tempo reale, intervenendo in ambiti cruciali quali la pianificazione urbanistica, la gestione dei servizi pubblici, la sicurezza e la gestione ambientale, facilitando un’organizzazione delle risorse e delle infrastrutture più efficiente ed efficace.

Come accade spesso per le tecnologie, tuttavia, anche l’applicazione del DT può rappresentare un campo di tensione politica. Il DT, infatti, può certo essere implementato per superare sfide legate all’efficienza operativa e alla sostenibilità ambientale ed economica. E tuttavia, anche queste opzioni apparentemente oggettive comportano almeno due questioni cruciali da considerare. Anzitutto occorre interrogarsi sulla governance dei dati. Di quali dati occorre un DT? Li utilizza tutelando i diritti alla privacy dei cittadini che (più o meno consapevoli) li forniscono? Sono dati focalizzati alla mera dimensione contingente del problema o vengono poi “messi a valore” per ulteriori obiettivi? La seconda questione, conseguente alla prima, concerne chi implementa il DT. Sono attori pubblici o privati? La cittadinanza può avere un controllo sulla direzione di utilizzo del DT o la “subisce” soltanto?

Per rispondere a questi e altri quesiti la tesi si svilupperà in primo luogo su un’analisi del DT come strumento che vede le sue applicazioni non soltanto all’ambito urbano ma in molteplici campi; in secondo luogo si concentrerà sull’applicazione del DT ad alcune Smart City a livello globale; infine, indagherà il modello di DT di Bologna, che offre spunti importanti per pensare alla possibilità di considerare i DT in modo differente.



# Indice

|                                                                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUZIONE.....</b>                                                                                                       | <b>1</b>  |
| <br>                                                                                                                           |           |
| <b>1 IL DIGITAL TWIN .....</b>                                                                                                 | <b>6</b>  |
| <br>                                                                                                                           |           |
| 1.1 FONDAMENTI DEI DIGITAL TWIN .....                                                                                          | 6         |
| 1.1.1 <i>Definizione e origine .....</i>                                                                                       | <i>7</i>  |
| 1.1.2 <i>Differenze tra Digital Twin e altri modelli digitali, e lo sviluppo dato dalle nuove tecnologie “disruptive”.....</i> | <i>12</i> |
| 1.2 EVOLUZIONE STORICA .....                                                                                                   | 17        |
| 1.3 LE DINAMICHE DEL CAPITALISMO DIGITALE: PRIVACY, SICUREZZA E INTEROPERABILITÀ DEI DATI .....                                | 22        |
| 1.4 CASI DI STUDIO: APPLICAZIONI PRATICHE DEI DIGITAL TWIN NEL MONDO REALE .....                                               | 25        |
| <i>Caso di Studio 1: Il Gemello Digitale di Notre Dame.....</i>                                                                | <i>26</i> |
| <i>Caso di studio 2: Gemelli Digitali e Gestione dei Rifiuti Elettronici.....</i>                                              | <i>27</i> |
| <i>Caso di studio 3: Overlay Digital Twin e Applicazioni nelle città .....</i>                                                 | <i>28</i> |
| <br>                                                                                                                           |           |
| <b>2 IL GEMELLO DIGITALE URBANO.....</b>                                                                                       | <b>31</b> |
| <br>                                                                                                                           |           |
| 2.1 LA SMART CITY .....                                                                                                        | 32        |
| 2.2 DATI UTILI PER GLI URBAN DIGITAL TWIN .....                                                                                | 35        |
| 2.3 FUNZIONAMENTO E STRUTTURA DEI DIGITAL TWIN URBANI .....                                                                    | 37        |
| 2.4 SHANGHAI DIGITAL TWIN: IL GEMELLO DIGITALE DI UNA MEGALOPOLI.....                                                          | 40        |
| 2.5 HELSINKI DIGITAL TWIN: UN GEMELLO DIGITALE PER LA SOSTENIBILITÀ .....                                                      | 44        |
| 2.6 ZURIGO DIGITAL TWIN: UN MODELLO INNOVATIVO PER LA PIANIFICAZIONE URBANA .....                                              | 47        |

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3 IL GEMELLO DIGITALE DI BOLOGNA .....</b>                                      | <b>53</b> |
| 3.1 “CIVIC DIGITAL TWIN”: UN MODELLO CIVICO TRA INNOVAZIONE E SFIDE .....          | 54        |
| 3.2 AMBITI DI APPLICAZIONE E SVILUPPO DEL DIGITAL TWIN DI BOLOGNA .....            | 62        |
| 3.3 IL CASO DELLA TORRE GARISENDA: UN DIGITAL TWIN PER IL PATRIMONIO STORICO ..... | 66        |
| <br><b>CONCLUSIONI .....</b>                                                       | <b>71</b> |
| <br><b>APPENDICE .....</b>                                                         | <b>74</b> |
| <br><b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                                                      | <b>84</b> |

# Indice delle Figure

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1: CONFRONTO TRA UN MODELLO DI SIMULAZIONE TRADIZIONALE E UN DIGITAL TWIN ..... | 13 |
| FIGURA 2: FASI DELL'EVOLUZIONE DEL DIGITAL TWIN .....                                  | 18 |
| FIGURA 3: NOTRE DAME: DISTRUZIONE E RICOSTRUZIONE DIGITALE .....                       | 26 |
| FIGURA 4: RAPPRESENTAZIONE VIRTUALE DI SHANGHAI. ....                                  | 41 |
| FIGURA 5: SIMULAZIONE DEL VENTO TRA EDIFICI CON DIGITAL TWIN .....                     | 46 |
| FIGURA 6: URBAN DIGITAL TWIN DI ZURIGO: APPLICAZIONI .....                             | 49 |
| FIGURA 7: STRUTTURA DELLA GOVERNANCE OPERATIVA DEL CDT DI BOLOGNA .....                | 56 |
| FIGURA 8: IL GEMELLO DIGITALE DELLA TORRE GARISENDA.....                               | 68 |

# Introduzione

Negli ultimi anni, il rapido sviluppo delle tecnologie digitali ha aperto mondi nuovi e inedite possibilità anche per la gestione delle città. Tra le innovazioni più promettenti in questo contesto emergono i Digital Twin: strumenti capaci di creare una replica virtuale dinamica della città basata su dati in tempo reale. L'utilizzo di queste tecnologie non si limita alla semplice rappresentazione digitale dell'ambiente urbano, ma consente di simulare scenari futuri, prevedere criticità e supportare le decisioni amministrative in modo più informato ed efficace. Tutto questo sta avendo impatti profondi nei più intimi ingranaggi del tessuto cittadino. Non si tratta soltanto di rilevare la potenzialità nei DT in ambiti quali la promozione di una viabilità più fluida, o l'ottimizzazione delle risorse nei servizi pubblici, per fare solo i due esempi più lampanti. Va inteso piuttosto l'applicabilità del DT anche in ambiti che possono promuovere processi di cittadinanza attiva o la governance democratica. O almeno, questo è vero se le potenzialità di un DT sono gestite da un attore che ha nel pubblico servizio la sua ragion d'essere. Detta molto direttamente, se un DT è indirizzato verso il servizio alla comunità piuttosto che nella pur legittima direzione di produrre profitto a chi lo implementa. Ciò introduce il tema trainante di questo elaborato: come tutte le tecnologie, anche il DT non è un oggetto inerte. Il suo utilizzo può intraprendere una o l'altra direzione a seconda di chi lo promuove. Come per qualsiasi altra tecnologia, allora, per costruire una lettura completa e sufficientemente ampia, anche l'analisi del DT impone un approccio politico. Del resto, oggi più che mai prima è emerso quanto sia politico l'utilizzo dei "dati" o l'implementazione di determinati algoritmi. Imprescindibile tenere in considerazione questi elementi per cogliere appieno le sfide dei DT.

L'obiettivo di questa tesi è allora quello di analizzare il ruolo dei Digital Twin nella gestione urbana, evidenziando il loro potenziale nel migliorare la sostenibilità e l'efficienza, ma anche la partecipazione civica. Se da un lato il concetto di Smart City ha già introdotto l'uso di tecnologie digitali per ottimizzare servizi e infrastrutture urbane, i Digital Twin rappresentano un ulteriore passo avanti, capace di rivoluzionare la gestione delle città attraverso l'integrazione e l'analisi di grandi quantità di dati provenienti da

sensori IoT, sistemi di intelligenza artificiale e modelli predittivi. Questo approccio non solo potenzialmente migliora la qualità della vita dei cittadini, ma consente anche una gestione più resiliente delle risorse urbane, rispondendo alle sfide poste dall'urbanizzazione e dal cambiamento climatico.

Al contempo il DT può anche essere indirizzato verso forme volte all'implementazione e all'aumento della partecipazione della cittadinanza. Processi di "cittadinanza attiva" possono infatti essere sviluppati proprio grazie ai DT, purché l'indirizzo dello sviluppo di questi ultimi vada in quella direzione. Qui entra in gioco la sfida politica posta dal DT. Se l'utilizzo di questa tecnologia "disruptive" introduce notevoli potenzialità di miglioramento della vita collettiva, la direzione di questo miglioramento cambia a seconda di come viene implementata. Una domanda può chiarire questo ragionamento: qual è la merce di scambio che un DT richiede per funzionare in un contesto urbano (così come in un qualsiasi altro contesto)? La risposta è complessa, ma può essere semplificata in una sola parola: i dati. Un DT si alimenta di dati. Solo grazie a una enorme quantità di dati prodotta in tempo reale, un DT può restituire risposte complete e contingenti. È questa enorme necessità di dati a porre il problema politico. A chi vanno questi dati? Come vengono utilizzati? La cittadinanza è consapevole dell'estrazione di dati da parte del DT? Le soluzioni proposte dal DT tutelano la privacy e i diritti di proprietà dei soggetti che abitano l'urbano? L'importanza di questa serie di domande si riflette immediatamente se proviamo ad applicare uno sguardo globale sugli usi del DT. Metropoli come Shanghai, Helsinki e Zurigo utilizzano modelli di Digital Twin per ottimizzare la mobilità, migliorare la gestione ambientale e pianificare in modo più efficiente le infrastrutture urbane. Chi ha sviluppato in quelle città i modelli di "gemello digitale"? I dati che lo alimentano confluiscono in data center a gestione pubblica o finiscono nelle mani di aziende private che offrono servizi alle municipalità in cambio di un compenso? E, se fosse il secondo caso, le norme tutelano sufficientemente i processi legati alla governance dei dati, alla sicurezza informatica e alla necessità di garantire che l'innovazione tecnologica non comprometta la privacy e i diritti fondamentali dei cittadini?

Per rispondere agli spunti offerti da quesiti come quelli fin qui promossi, è apparso particolarmente significativo in questo lavoro dedicare ampio spazio al progetto del "Civic Digital Twin" di Bologna. Questo modello, infatti, si differenzia da altre

esperienze di DT proprio per il suo approccio inclusivo e partecipativo, che pone al centro non solo le potenzialità di soluzioni “just in time” offerte da questa nuova tecnologia, ma anche il coinvolgimento attivo della cittadinanza nel processo decisionale. Il progetto bolognese, in altri termini, dimostra come il Digital Twin possa trasformarsi in uno strumento di amministrazione pubblica, capace di supportare la pianificazione strategica e migliorare la comunicazione tra istituzioni e cittadini. Da fine in sé, si potrebbe dire, nel caso bolognese il DT diventa un mezzo, uno strumento utile alla cittadinanza e, in fondo, alla stessa funzione democratica. Certo, rimangono alcune criticità che verranno rilevate. E tuttavia, più che sondarne il funzionamento dei più piccoli dettagli, l’obiettivo di questo lavoro è mostrare come anche i DT funzionino in uno o nell’altro modo a seconda di precise scelte politiche che possono indirizzare l’applicazione di importanti tecnologie in modi totalmente differenti: perfino opposti.

La struttura della tesi è articolata in tre capitoli: il primo capitolo introduce il concetto di Digital Twin partendo dalla sua definizione e dalle sue origini storiche, risalenti agli studi di Michael Grieves e alle prime applicazioni nel settore aerospaziale. Vengono analizzati il funzionamento dei Digital Twin e il modo in cui essi combinano dati provenienti dal mondo fisico con modelli digitali avanzati. Inoltre, vengono illustrate le principali classificazioni dei DT, differenziando tra modelli passivi, predittivi, reattivi e autonomi. Un’attenzione particolare è dedicata alle tecnologie abilitanti, come l’Internet of Things e l’Intelligenza Artificiale che rendono possibile l’implementazione di sistemi sempre più sofisticati e interattivi. Il capitolo si conclude con un confronto tra i Digital Twin e altri modelli digitali tradizionali, evidenziando come i DT rappresentino un’evoluzione importante rispetto alle simulazioni statiche utilizzate in passato. Infine, vengono presentati alcuni casi di studio significativi che mostrano come i Digital Twin siano già stati applicati con successo in diversi settori.

Il secondo capitolo vira più specificatamente verso l’oggetto di questa tesi, vale a dire l’applicazione dei Digital Twin nelle città, analizzando il loro ruolo nel miglioramento della gestione urbana e nell’ottimizzazione delle risorse. Dopo un’introduzione al concetto di Smart City e alle sue implicazioni per la governance urbana, si analizzano le caratteristiche specifiche degli Urban Digital Twin (UDT), evidenziando il loro funzionamento e la loro architettura. Il capitolo approfondisce il modo in cui i Digital

Twin urbani vengono alimentati da dati provenienti da sensori, sistemi di intelligenza artificiale e piattaforme di Big Data, rendendo possibile il monitoraggio in tempo reale di fenomeni urbani complessi. Vengono poi illustrati tre casi di studio internazionali: Shanghai, che ha implementato un UDT su larga scala per ottimizzare la mobilità e la gestione delle infrastrutture; Helsinki, che utilizza questa tecnologia per promuovere la sostenibilità e la riduzione delle emissioni di carbonio; e Zurigo, che ha sviluppato un modello innovativo per migliorare la pianificazione urbana. Infine, viene sollevata la questione critica della governance dei dati urbani, evidenziando i rischi legati alla sorveglianza digitale e alla concentrazione del potere nelle mani di pochi attori privati.

Infine, il terzo capitolo si concentra sull'applicazione concreta della tecnologia sul territorio bolognese, descrivendo il progetto Civic Digital Twin (CDT) e le sue implicazioni per il futuro della città. A differenza di altre esperienze internazionali, il modello bolognese si distingue per la sua forte impronta civica e partecipativa. Il progetto del Civic Digital Twin è guidato da un consorzio pubblico che include il Comune di Bologna, l'Università di Bologna, il CINECA e la Fondazione Bruno Kessler, con l'obiettivo di creare uno strumento che non sia solo tecnologico, ma anche un'infrastruttura civica a disposizione della comunità. Il capitolo esplora le diverse applicazioni del CDT tra cui la gestione della mobilità, la pianificazione urbana e la tutela ambientale, con particolare attenzione alla raccolta e all'utilizzo dei dati in modo etico e trasparente. Un caso di studio significativo è rappresentato dal monitoraggio della Torre Garisenda per il quale il Digital Twin viene utilizzato per prevedere eventuali criticità strutturali e pianificare interventi di restauro basati su simulazioni avanzate. Infine, viene introdotta l'intervista a Raffaele Laudani, assessore all'urbanistica del Comune di Bologna, che fornisce una visione critica sulle implicazioni politiche e sociali dei Digital Twin, sottolineando l'importanza di una governance pubblica dei dati e del coinvolgimento attivo dei cittadini nel processo decisionale.

L'adozione dei Digital Twin in ambito urbano rappresenta una delle sfide più interessanti per la trasformazione digitale delle città contemporanee. Se implementati in una determinata direzione, questi strumenti possono favorire una gestione più intelligente e sostenibile degli spazi urbani, garantendo al contempo una maggiore trasparenza e partecipazione. Qui sta il punto e la sfida. Per utilizzare le parole di Laudani, un DT può

essere semplicemente una sorta di Smart City più evoluta o, al contrario, condurre verso una “città della conoscenza”<sup>1</sup>. Vale la pena di chiudere questa introduzione approfondendo questa differenza. Quello di Smart City è “un concetto legato ai processi di digitalizzazione delle città da almeno 15-20 anni” ma, per anticipare subito un assunto di Laudani, “non ha prodotto risultati significativi” perché “presuppone che l’implementazione di nuove tecnologie generi automaticamente effetti positivi” esponendo “eccessivamente le città agli investimenti privati, con il rischio che il modello delle Smart Cities si trasformi in un ulteriore strumento del capitalismo estrattivo”. Al contrario, dice Laudani, il DT può essere pensato per agevolare “un approccio che integra le trasformazioni fisiche della città con politiche di empowerment, promozione e abilitazione dei cittadini, oltre alla capacità di attrarre investimenti nel settore della ricerca”. Il DT deve essere dunque “non solo uno strumento innovativo” ma rappresentare “una strategia e un dispositivo di governo della rivoluzione digitale nella nostra città”. Tra l’una e l’altra opzione passa tutta la differenza del mondo. In questo elaborato vedremo di mostrare ampiamente le caratteristiche dell’una e dell’altra prospettiva, mantenendo una attenzione costante alle questioni legate alla protezione dei dati e alla sicurezza informatica.

---

<sup>1</sup> Intervista a Raffaele Laudani, Assessore del Comune di Bologna, realizzata in data 27/02/2025, via Google Meet. Trascrizione integrale disponibile in Appendice. Da ora in poi i riferimenti dell'intervista a Laudani devo considerarsi sempre gli stessi.

# Capitolo 1

## Il Digital Twin

### Introduzione

Per comprendere a pieno il potenziale e lo sviluppo dei Digital Twin nel contesto urbano è essenziale innanzitutto esaminarne i fondamenti. In questo primo capitolo, pertanto, vengono gettate le basi per un'analisi approfondita di questa nuova tecnologia se non del tutto emergente in termini assoluti, con una portata enorme di innovazione potenziale se applicata all'ambito urbano. Di seguito vedremo un'analisi dettagliata del Digital Twin partendo dalla sua definizione, per poi esplorare le origini e le evoluzioni che hanno marcato il suo sviluppo attraverso gli anni. Verranno illustrate le classificazioni e la differenza rispetto ad altri modelli digitali evidenziando come essi rappresentino una fusione avanzata tra realtà fisica e realtà virtuale grazie all'integrazione di tecnologie dirompenti come l'Internet of Things (IoT)<sup>2</sup> e l'intelligenza artificiale (AI). Si discuterà di questa innovazione anche in materia di privacy e sicurezza per la gestione dei dati e, infine, verrà approfondito il rapporto tra i Digital Twin e le piattaforme attraverso la lente dei Big Data, comprendendo come la proprietà e la gestione dei dati influenzino anche le dinamiche urbane. Concluderemo il capitolo presentando alcuni casi di studio significativi, nei quali i Digital Twin sono stati utilizzati con successo fornendo così un contesto pratico che evidenzia l'efficacia di questa tecnologia.

### 1.1 Fondamenti dei Digital Twin

In questa prima parte del capitolo la tesi si dedica a esplorare i concetti fondamentali che stanno alla base dei gemelli digitali. Questa disamina ci permetterà di comprendere

---

<sup>2</sup> Il termine “Internet of Things”, abbreviato “IoT” si riferisce all'estensione di Internet al mondo degli oggetti e dei luoghi fisici. L'IoT abilita la connessione di dispositivi fisici tramite sensori e software integrati che permettono la raccolta e lo scambio di dati. Questi dispositivi, spesso chiamati “smart” o “connessi” possono interagire tra loro e con gli esseri umani, supportando decisioni e azioni automatizzate in contesti vari: dalla gestione domestica alla produzione industriale, fino al controllo urbano.

meglio il valore aggiunto e le potenzialità di questa tecnologia innovativa, come pure le sue specifiche applicazioni e i benefici derivanti dal suo uso.

### 1.1.1 Definizione e origine

Il Digital Twin (DT) può essere definito come "una rappresentazione virtuale di un sistema fisico (e del suo ambiente e processi associati) che viene aggiornata attraverso lo scambio di informazioni tra il sistema fisico e quello virtuale"<sup>3</sup>. Questa rappresentazione non si limita solo a oggetti fisici tangibili, ma anche ad elementi concettuali che possono essere digitalizzati, creando un modello software che simula il comportamento dell'oggetto nel suo contesto reale, incorporando tutte le variabili ambientali e le leggi fisiche che influenzano l'oggetto reale. La relazione tra l'oggetto fisico e il suo gemello digitale si basa dunque sulla scelta accurata delle proprietà che meglio rappresentano l'oggetto reale e il suo comportamento nel contesto in cui opera. Per esempio, nella simulazione di un satellite, le leggi della fisica e le interazioni con altri corpi celesti sono elementi cruciali del modello DT.

Indispensabile aggiungere a questa definizione preliminare che la modellazione attraverso il DT offre vantaggi significativi anche nelle fasi di progettazione, test e operatività<sup>4</sup>. Questo avviene perché il modello DT fornisce una descrizione dettagliata e accurata che può essere sfruttata per prevedere il comportamento dell'oggetto, sia in condizioni di utilizzo normale, sia in scenari particolari. La capacità di anticipare comportamenti inaspettati durante la fase preparatoria aggiunge un ulteriore livello di valore al DT, specie se applicato nella gestione urbana: decisioni rapide e basate su dati concreti sono spesso necessarie.

Il concetto “Digital Twin” è stato introdotto per la prima volta dal Professor Michael Grieves nel 2003 durante una conferenza presso l’Università del Michigan. Il lavoro di Grieves sviluppato in collaborazione con John Vickers mirava a superare l'approccio

---

<sup>3</sup> VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>

<sup>4</sup> Crespi, N., Drobot, A. T., & Minerva, R. (2023). The digital twin: What and why?. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 3-20). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_1)

tradizionale per la gestione dei dati del prodotto prevalentemente cartaceo e manuale, introducendo un modello completamente digitale. L'intento era quello di rendere questo modello un elemento centrale nella gestione del ciclo di vita del prodotto stesso. Grieves descrisse per la prima volta il Digital Twin articolandolo in tre componenti fondamentali<sup>5</sup>:

- Una realtà fisica nello spazio reale.
- Una rappresentazione virtuale nello spazio virtuale.
- Le connessioni di dati e di informazioni che legano la realtà fisica alla rappresentazione virtuale.

Vale la pena di approfondire punto per punto queste componenti. Soffermandoci inizialmente sul termine “realtà fisica”, questo è stato scelto per rappresentare l'oggetto di modellazione nel modo più ampio possibile. La realtà fisica non si limita solo all'oggetto tangibile che viene modellato, ma include l'intero sistema di cui fa parte comprendendo sia gli aspetti già noti che quelli ancora da scoprire o analizzare.

La realtà fisica, a sua volta, si articola in tre elementi principali che permettono una comprensione e una modellazione più specifica e dettagliata:

- Il sistema fisico: si riferisce all'oggetto o agli oggetti specifici che sono il focus del Digital Twin. Il sistema fisico è l'entità principale da cui vengono raccolti i dati. Generalmente, il sistema fisico è un oggetto artificiale (ad esempio, una macchina o un intero impianto di produzione); tuttavia, con l'espansione del concetto di Gemello Digitale in altri settori come la sanità e l'agricoltura il sistema fisico può essere anche un elemento naturale o il corpo umano.
- L'ambiente fisico: ovvero il contesto in cui il sistema fisico opera. Questo può includere le condizioni climatiche, la posizione geografica e altri fattori esterni che influenzano il comportamento e le prestazioni del sistema fisico. L'ambiente fisico è cruciale per comprendere come variabili esterne impattino sul sistema. Nel caso di un Digital Twin di una stanza in un grande edificio, il sistema fisico è

---

<sup>5</sup> VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>

la stanza stessa, mentre l'ambiente fisico comprende le stanze adiacenti, il sistema di ventilazione e altri fattori come il clima esterno.

- I processi fisici: le operazioni, le reazioni o i comportamenti che avvengono all'interno del sistema fisico e nell'interconnessione tra il sistema e l'ambiente fisico. La trasformazione di materiali, i flussi energetici o le reazioni chimiche sono esempi di processi fisici.

Definita nel dettaglio il concetto di “realtà fisica”, spostiamoci sulla “rappresentazione virtuale”. In questa tesi si adotta il termine “rappresentazione virtuale” per enfatizzare che ciò che si crea nello spazio virtuale è un'idealizzazione della realtà fisica. La rappresentazione virtuale, quindi, non è una copia esatta, ma una versione semplificata e astratta del reale, costruita con l'obiettivo di facilitare analisi e simulazioni. Questa astrazione si realizza attraverso:

- Modelli di dati: strutture di dati che organizzano le informazioni descrittive dell'oggetto studiato.
- Modelli di comportamento: utilizzando formule matematiche e algoritmi computazionali per descrivere le interazioni tra le variabili di interesse.

Questi modelli sono spesso basati su principi fisici e quando le relazioni fisiche esatte non sono note si possono impiegare modelli derivati dai dati. La realtà viene quindi trasformata in una serie di valori assegnati alle variabili del modello basati sui dati raccolti. Questo processo di interpretazione che trasforma i dati reali in informazioni utilizzabili nel modello virtuale è cruciale e deve essere gestito con cura per mantenere la coerenza con il livello di astrazione scelto che a sua volta influenza l'accuratezza delle simulazioni e delle previsioni.

L'ultima componente, cruciale, della definizione di Digital Twin è l'interconnessione tra la realtà fisica e la rappresentazione virtuale che permette uno scambio bidirezionale di dati e informazioni. Questa connessione è indispensabile per il concetto e per il funzionamento del Digital Twin e si articola in due direzioni principali:

- **Da fisico a virtuale (Physical-to-Virtual):** i dati sono raccolti dalla realtà fisica e utilizzati per aggiornare e migliorare la rappresentazione virtuale.
- **Da virtuale a fisico (Virtual-to-Physical):** le informazioni dal modello virtuale sono utilizzate per influenzare e ottimizzare il sistema fisico.

La connessione fisico-virtuale si sviluppa pertanto attraverso un processo strutturato in tre fasi principali:

1. **Raccolta dati:** Questa fase include la misurazione diretta di elementi fisici, spesso facilitata dall'uso di tecnologie come l'Internet of Things e sensori intelligenti, ma anche attraverso metodi manuali come ispezioni visive.
2. **Interpretazione dei dati:** I dati raccolti vengono trasformati in un formato che rispecchia il livello di astrazione del modello virtuale. Questa fase include passaggi come l'elaborazione e il filtraggio dei dati e la conversione delle misure in parametri utilizzabili dal modello.
3. **Aggiornamento dello stato virtuale:** Utilizzando i dati interpretati, gli stati della rappresentazione virtuale vengono aggiornati per riflettere più fedelmente la realtà fisica.

La connessione virtuale-fisica chiude il ciclo del Digital Twin, permettendo di trasformare le intuizioni e decisioni generate nel mondo virtuale in azioni concrete nel mondo fisico. Questo meccanismo bidirezionale non solo mantiene aggiornato il Digital Twin ma permette anche un ciclo continuo di miglioramento e ottimizzazione del sistema, dove ogni fase di interazione produce dati che alimentano la successiva, in un processo di evoluzione e adattamento costante.

Terminata l'analisi dei componenti fondamentali del Digital Twin, possiamo ora passare alla classificazione di questi sistemi basata sulle loro funzioni specifiche. Un Digital Twin può essere distinto in varie categorie basate sul grado di intelligenza comportamentale

richiesto per soddisfare gli scopi specifici della sua applicazione. Esistono quattro principali classificazioni<sup>6</sup>:

- DT Passivo: questo tipo di Gemello Digitale è dedicato principalmente alla rappresentazione accurata dello stato di un oggetto fisico utilizzando monitoraggio e simulazioni digitali per riflettere le condizioni attuali all'interno di un ambiente specificamente definito. Le simulazioni, che sono centrali in questo approccio possono beneficiare dell'integrazione di tecnologie avanzate come l'intelligenza artificiale e il machine learning consentendo una modellazione più precisa e una rappresentazione dettagliata dei vincoli ambientali.
- DT Predittivo: utilizza dati esistenti e tecnologie di apprendimento non solo per prevedere gli stati futuri di un oggetto fisico, ma anche per emettere avvisi quando necessario. È progettato per interagire efficacemente sia con gli umani che con sistemi di gestione. Il Digital Twin Predittivo si distingue per la sua capacità di anticipare condizioni critiche o eventi imminenti, sfruttando un ampio arsenale di strumenti analitici, statistici e di intelligenza artificiale. Questo gli permette di proporre interventi proattivi e politiche di gestione per mitigare rischi o potenziali problemi rendendolo uno strumento essenziale per la pianificazione e la prevenzione.
- DT Reattivo: si avvale del ragionamento avanzato e della rappresentazione della conoscenza per analizzare la situazione corrente e futura di un oggetto fisico, permettendo di formulare e attuare politiche per neutralizzare gli effetti negativi. È progettato per offrire una visione chiara delle problematiche emergenti aiutando a prepararsi per reagire. Esso reagisce prontamente ai mutamenti ambientali applicando politiche preimpostate per conformarsi alle nuove situazioni e lavora proattivamente per evitare guasti o per preservare l'efficienza operativa dell'oggetto fisico.

---

<sup>6</sup> Minerva, R., Crespi, N., Farahbakhsh, R., & Awan, F. (2023). Artificial intelligence and the digital twin: An essential combination. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 299-336). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_12)

- DT Autonomo: quest'ultima tipologia rappresenta il livello più avanzato nella classificazione. È progettato per operare in totale indipendenza. È capace di analizzare completamente la situazione attuale e le possibili evoluzioni future, elaborando e attuando autonomamente strategie per conseguire i suoi obiettivi in un ambiente dinamico senza alcun intervento umano. Il Digital Twin Autonomo non solo comprende e valuta la propria condizione, ma decide proattivamente le azioni da intraprendere e si adatta continuamente per soddisfare gli obiettivi stabiliti. Sfrutta tecniche sofisticate di intelligenza artificiale per gestire e implementare da solo le politiche e le azioni necessarie.

In queste quattro categorie rientrano allora tutte le diverse tipologie di DT. Il grado di differenza tra una e l'altra, e la loro articolazione danno l'idea della validità di questo modello, e la molteplicità di ambiti cui può essere applicato. Il grado di innovazione che promette è decisamente elevato e ciò risulta ancor più evidente se ci inoltriamo in un confronto tra il DT e gli altri modelli digitali, come faremo nel prossimo paragrafo.

### 1.1.2 Differenze tra Digital Twin e altri modelli digitali, e lo sviluppo dato dalle nuove tecnologie “disruptive”

La distinzione tra il Digital Twin e altri modelli digitali emerge chiaramente dall'analisi delle definizioni trovate nella letteratura accademica<sup>7</sup>, dove si nota l'uso di qualificatori specifici per chiarire le differenze tra queste tecnologie. Questa sezione della tesi mira a definire criteri chiari e ben definiti per identificare un Digital Twin.

“Le descrizioni dei Digital Twin che si trovano nei testi accademici spesso presentano somiglianze con gli approcci tradizionali alla modellazione digitale, come il Computer-Aided Design (CAD), il Computer-Aided Engineering (CAE) e il Product Lifecycle Management (PLM)”<sup>8</sup>. Tali somiglianze possono portare a confusione tra i professionisti del settore, i quali potrebbero trovarsi in difficoltà nel distinguere un vero Digital Twin da gli strumenti digitali convenzionali. Nonostante questi strumenti possano essere

---

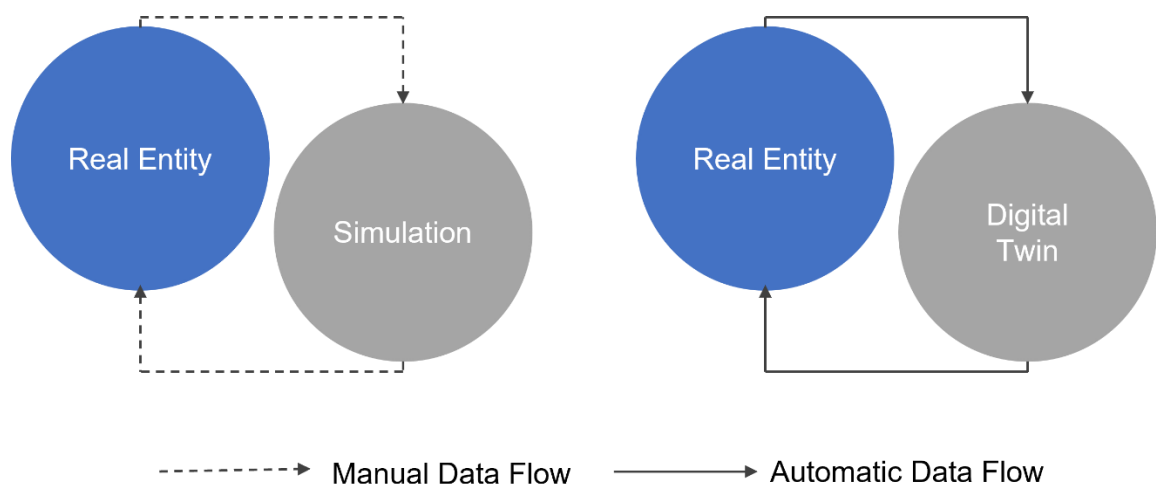
<sup>7</sup> Cfr. [https://github.com/evanderhorn/DSS\\_DT\\_Public](https://github.com/evanderhorn/DSS_DT_Public).

<sup>8</sup> VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>

integrati all'interno di un Digital Twin è essenziale stabilire chiaramente quando il loro uso risponde effettivamente ai requisiti di un Digital Twin.

Nello studio della letteratura emergono due aspetti distintivi:

- Il Digital Twin è la rappresentazione di una specifica istanza fisica e non di una classe generale o di una serie di sistemi.
- Il Digital Twin è caratterizzato dalla sua capacità di aggiornarsi dinamicamente nel tempo per rispecchiare i cambiamenti nello stato del sistema fisico che rappresenta<sup>9</sup>.



*Figura 1: Confronto tra un modello di simulazione tradizionale e un Digital Twin*

La Figura 1 fornisce una chiara rappresentazione delle differenze tra una simulazione tradizionale e il funzionamento di un Digital Twin. Nella parte sinistra, osserviamo come l'entità reale sia collegata a una semplice simulazione che non prevede un aggiornamento dinamico con il sistema fisico. Questo tipo di simulazione può utilizzare dati statici e non è capace di adattarsi e rispondere alle variazioni in tempo reale dell'entità fisica. Al contrario, nella parte destra dell'immagine il Digital Twin rappresenta un'evoluzione

---

<sup>9</sup> Ivi, p. 6.

tecnologica significativa: l'entità reale è continuamente connessa al suo gemello digitale attraverso un flusso bidirezionale di dati. Questa interazione dinamica permette al Digital Twin di aggiornarsi in tempo reale riflettendo qualsiasi cambiamento nell'entità fisica e permettendo analisi predittive e decisioni operative basate su dati attuali.

Diverse fonti suggeriscono che questa interconnessione tra le due entità (fisica e virtuale) debba essere continua, online e bidirezionale. Ciononostante, tali restrizioni possono non essere sempre praticabili o necessarie. Ad esempio, un Digital Twin utilizzato per la manutenzione predittiva potrebbe funzionare efficacemente anche in scenari in cui l'interazione non avviene in tempo reale.

Sottolineata questa sottile critica alle ipotesi generalizzanti, la tesi adatterà l'approccio di una interconnessione "continua, online e bidirezionale" specificamente per i casi di Digital Twin applicati alla gestione urbana, dove la tempestività dell'informazione e la sua reciproca trasmissione si rivelano non solo vantaggiose, ma spesso indispensabili per il monitoraggio efficace e l'ottimizzazione delle risorse cittadine.

Avendo ora delineato le distinzioni fondamentali tra i Digital Twin e i tradizionali modelli di simulazione è essenziale esplorare le tecnologie abilitanti che permettono ai Digital Twin di definirsi tali. Tra queste, l'Internet of Things e l'intelligenza artificiale giocano ruoli cruciali.

Negli ultimi anni i progressi tecnologici hanno portato alla trasformazione di numerosi sistemi fisici in sistemi cibernetico-fisici, ovvero, strutture in cui il mondo reale si integra strettamente con il mondo digitale attraverso reti di sensori e piattaforme di elaborazione avanzate. L'Internet of Things è il principale motore di questa trasformazione fornendo soluzioni che permettono agli oggetti di acquisire, trasmettere ed elaborare dati in modo autonomo e intelligente<sup>10</sup>.

L'IoT ha avuto in effetti un impatto significativo su molteplici settori, influenzando in modo profondo la vita quotidiana e il mondo industriale. In soli due decenni, questa tecnologia si è diffusa in una vasta gamma di applicazioni, tra cui le case intelligenti, i

---

<sup>10</sup> Fortino, G., & Savaglio, C. (2023). Integration of digital twins & Internet of Things. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 205-225). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_8)

veicoli connessi o le fabbriche automatizzate. Attualmente il numero di dispositivi IoT attivi nel mondo è in costante crescita e il mercato ha raggiunto un valore vicino al trilione di dollari, mostrando una notevole resilienza anche di fronte a crisi globali, come la pandemia da COVID-19. Il riconoscimento del valore dell'IoT è ormai unanime tra aziende e istituzioni; le quali investono risorse ingenti nello sviluppo di tecnologie abilitanti come il 5G, il Wi-Fi 6 e la realtà aumentata.

Il Digital Twin ha tratto beneficio ed espansione proprio da questa tecnologia, che ha promosso un'accelerazione notevole nel suo miglioramento. Va detto, tuttavia, che l'interazione tra IoT e Digital Twin non è unidirezionale: se da un lato l'IoT fornisce ai DT dati essenziali per la loro evoluzione, dall'altro i DT migliorano l'IoT, contribuendo a ottimizzare la progettazione, la prototipazione e la gestione di dispositivi e servizi. Questo scambio è essenziale per superare le sfide legate a complessità, eterogeneità e scalabilità dei sistemi IoT. Una connettività efficiente è essenziale per garantire che i Digital Twin rispecchino fedelmente il loro corrispettivo fisico. L'IoT offre una vasta gamma di protocolli di comunicazione che possono essere utilizzati per garantire sincronizzazione dei dati, riduzione dei tempi di latenza e trasmissione efficiente su reti cablate e wireless. Inoltre, la sicurezza è un aspetto cruciale: per proteggere i flussi di dati e prevenire accessi non autorizzati, sono stati sviluppati meccanismi di autenticazione, crittografia e protezione di rete. Questi strumenti garantiscono che le informazioni trasmesse tra dispositivi IoT e Digital Twin siano sicure e affidabili.

Grazie a questi dispositivi, i Digital Twin possono raccogliere dati ambientali, misurare parametri fisici e influenzare il comportamento degli asset fisici. Le reti di sensori (SAN) sono ormai un elemento fondamentale per qualsiasi architettura IoT: permettono di raccogliere informazioni su posizione, condizioni atmosferiche, stato operativo e molto altro. L'accesso a questi dati è reso possibile attraverso API e piattaforme IoT permettendo ai DT di comunicare con sensori in modo trasparente e sicuro. Questo ha portato allo sviluppo del concetto di "Device as a Service" (DaaS): ogni dispositivo IoT può essere visto come una risorsa digitale accessibile e gestibile in remoto.

Un punto cardine per il successo dei sistemi IoT e DT è l'usabilità. Dashboard, simulatori e interfacce utente intuitive sono strumenti essenziali per ingegneri, operatori e manager, consentendo loro di monitorare e controllare i sistemi in modo semplice e chiaro. La

visualizzazione dei dati in tempo reale e la possibilità di effettuare simulazioni avanzate sono elementi cruciali per ottimizzare l'efficienza operativa e ridurre i rischi di errore.

La seconda tecnologia “disruptive” che ha dato una notevole scossa allo sviluppo del DT è, come detto, l'intelligenza artificiale.

L'evoluzione dei Digital Twin è strettamente legata ai progressi dell'Intelligenza Artificiale e dell'analisi dei dati. Inizialmente concepiti come modelli digitali statici, i DT sono oggi strumenti intelligenti in grado di monitorare, analizzare e prevedere il comportamento di oggetti fisici complessi. Tutto questo è reso possibile dall'utilizzo di tecniche di IA avanzate che permettono ai Digital Twin non solo di raccogliere informazioni dal mondo reale, ma anche di interpretarle e agire di conseguenza<sup>11</sup>.

Oltre al semplice monitoraggio delle prestazioni e alla manutenzione predittiva, i DT più avanzati hanno infatti la capacità di adattarsi autonomamente alle mutevoli condizioni operative e di supportare la presa di decisioni in scenari sempre più complessi. Ad esempio, un DT può rilevare anomalie nei dati raccolti dai sensori, identificare pattern ricorrenti nel comportamento di un sistema e suggerire interventi mirati per migliorare l'efficienza operativa. Questo rende possibile ottimizzazione delle risorse, la riduzione dei tempi di fermo macchina e la minimizzazione degli sprechi con un impatto diretto sulla produttività e sulla sostenibilità.

L'Intelligenza Artificiale non si limita a migliorare le funzionalità dei Digital Twin, bensì rappresenta un elemento necessario per la loro evoluzione. L'IA consente infatti ai DT di prevedere scenari futuri: simulando il comportamento di una realtà fisica in diverse condizioni operative. Questo è particolarmente utile in settori come la manifattura, l'energia e i trasporti, nei quali i Digital Twin possono anticipare guasti, suggerire strategie di manutenzione e ottimizzare i processi produttivi.

Un esempio pratico di questa evoluzione è rappresentato dai veicoli autonomi che si avvalgono di Digital Twin per testare virtualmente migliaia di scenari di guida prima di essere messi su strada. I DT, in questo caso, sfruttano l'AI per analizzare una quantità

---

<sup>11</sup> Minerva, R., Crespi, N., Farahbakhsh, R., & Awan, F. (2023). Artificial intelligence and the digital twin: An essential combination. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 299-336). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_12)

enorme di dati in tempo reale migliorando costantemente i propri algoritmi di navigazione e sicurezza.

Le tecniche di AI, come reti neurali, algoritmi genetici e logica fuzzy<sup>12</sup>, consentono insomma ai DT di apprendere continuamente e di migliorare la loro capacità di analisi e risposta<sup>13</sup>. In futuro, il continuo sviluppo dell'Intelligenza Artificiale permetterà ai Digital Twin di diventare sempre più autonomi e intelligenti, riducendo la dipendenza dall'intervento umano e migliorando la gestione di sistemi sempre più complessi. Questo prevedibilmente porterà a un aumento della sicurezza, dell'efficienza e della sostenibilità aprendo la strada a nuove applicazioni innovative e trasformando radicalmente il modo in cui interagiamo con il mondo fisico e digitale. Tuttavia andrà sempre monitorata anche il rischio pervasivo che i DT potranno avere, e il loro potenziale sviluppo andrà sempre interrogato anche con le lenti necessaria della tutela dei diritti delle soggettività che lo "subiscono".

## 1.2 Evoluzione storica

Vale la pena a questo punto di fare un passo indietro. Dopo aver definito il DT, averne sondato alcune prime applicazioni pratiche, interpellato le modalità del suo funzionamento, confrontato il DT con i modelli digitali precedenti e sondato l'impatto di alcune tecnologie "disruptive" sul suo sviluppo, è interessante ora indagarne le provenienze. In altri termini, inoltrarci nella sua storia. Anche se il termine "Digital Twin" è stato formalmente introdotto da Michael Grieves nel 2003, come spiegato nella sezione precedente, i concetti fondamentali dietro questa tecnologia erano già applicati in precedenza, ad esempio in ambienti come quello della NASA durante il programma Apollo negli anni '60 e '70. In quel periodo, la NASA utilizzava modelli computazionali dettagliati delle navicelle spaziali per simulare varie condizioni di missione, una pratica che può essere vista come un antenato dei moderni Digital Twin: questi modelli

---

<sup>12</sup> La "logica fuzzy" è una metodologia che consente di gestire l'incertezza, adottando gradi intermedi tra il completamente vero e il completamente falso. Differisce dalla logica booleana tradizionale, che impone una rigida distinzione binaria (true/false) e si rivela particolarmente utile in contesti dove i dati non sono nettamente definiti, permettendo di formulare decisioni più sfumate e adattabili alle realtà complesse.

<sup>13</sup> Minerva, R., Crespi, N., Farahbakhsh, R., & Awan, F. (2023). Artificial intelligence and the digital twin: An essential combination. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 299-336). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_12)

permettevano agli ingegneri di testare e valutare il comportamento delle navicelle in scenari diversi, contribuendo a ridurre significativamente i rischi delle missioni spaziali<sup>14</sup>.

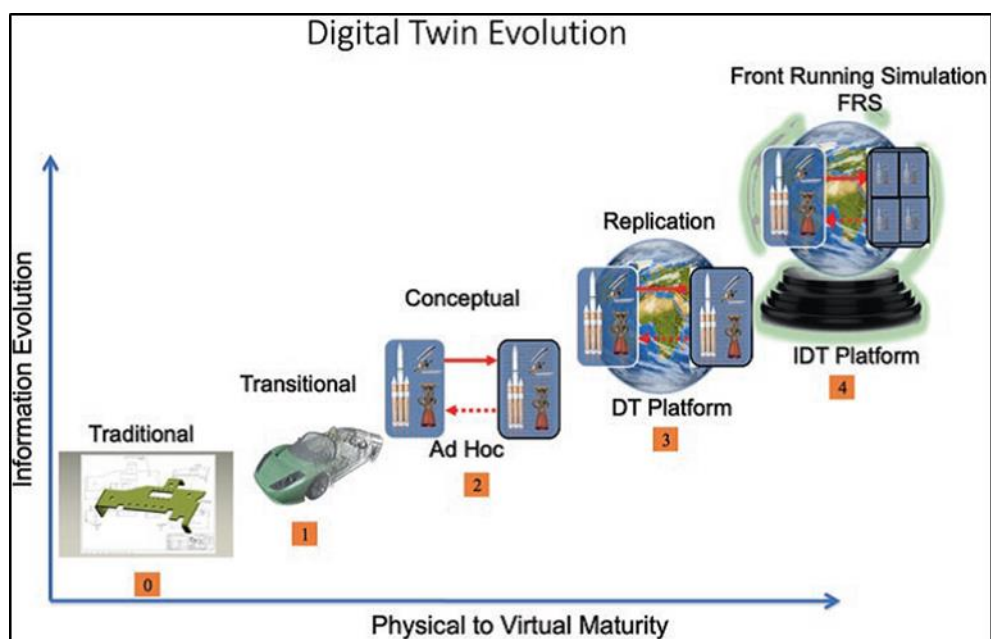


Figura 2:  
Fasi dell'evoluzione del Digital Twin: dai modelli tradizionali ai DT Intelligenti.

A partire da queste prime applicazioni primordiali, l'evoluzione del gemello digitale conduce in un viaggio affascinante attraverso il progresso tecnologico partendo dalla semplice replicazione fisica fino alla maturazione di complessi sistemi virtuali. Questo percorso di sviluppo si articola in diverse fasi distintive, ciascuna delle quali ha segnato un incremento significativo nella capacità di modellare, simulare e prevedere dinamiche del mondo reale con una precisione sempre maggiore. Con l'evolversi delle scienze tecnologiche i Digital Twin sono passati da semplici modelli statici a sistemi interattivi e integrati che apprendono e si adattano, trasformando radicalmente il modo in cui interagiamo e gestiamo i sistemi complessi in vari settori. La progressiva integrazione di tecnologie avanzate come l'intelligenza artificiale, l'analisi dei Big Data e l'Internet delle Cose ha ulteriormente potenziato i Digital Twin, rendendoli non solo strumenti di

<sup>14</sup> Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchey, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>

simulazione ma veri e propri agenti di cambiamento strategico nelle mani degli operatori del settore.

La Figura 2 fornisce una rappresentazione dell'evoluzione di questa tecnologia, delineando chiaramente le diverse tappe di evoluzione. Di seguito, vengono illustrate in dettaglio le cinque fasi mostrate in figura, ognuna delle quali rappresenta un significativo avanzamento nella funzionalità e nell'intelligenza dei Digital Twin<sup>15</sup>:

#### Fase 0 - Tradizionale

Nel momento iniziale del processo creativo, non appena un'idea per un nuovo prodotto iniziava a formarsi, questa veniva rapidamente trasformata in un modello tangibile. Originariamente, la condivisione di queste idee si realizzava attraverso schizzi e modelli fisici, che potevano essere rappresentati in scala o meno. Intorno poi alla metà del diciannovesimo secolo, il metodo si evolse ulteriormente con l'introduzione di disegni tecnici che fornivano misure dettagliate del prodotto: una prassi che si consolidò e perdurò per tutto il ventesimo secolo. Fu solo negli anni '80 che si assistette a un significativo avanzamento tecnologico con l'integrazione delle informazioni geometriche nei sistemi informatici.

#### Fase 1 - Transizionale

La fase Transizionale segna l'inizio dell'era del Digital Twin vero e proprio. Gli anni 2000 hanno segnato un cambiamento radicale nel trasferimento di informazioni nell'area virtuale: lo sviluppo di modelli 3D in un computer è stato un salto quantico. La capacità di simulare il comportamento di questi modelli geometrici è stato il passo successivo.

#### Fase 2 - Concettuale

In questa fase il principio del gemello digitale si evolve: non più solo una modellazione fedele del reale, ma un laboratorio virtuale dove si testano ipotesi e scenari futuri. “La creazione di un gemello digitale in questa fase sfrutta dati provenienti da varie fonti e

---

<sup>15</sup> Grieves, M. (2023). Digital twins: Past, present, and future. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 97-121). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4)

talvolta frammentati”<sup>16</sup>. Si sviluppano diverse simulazioni con l'obiettivo di determinare quanto accuratamente queste rappresentino la realtà.

### Fase 3 - Replicativa

In questa fase del processo i Digital Twin non sono più semplici progetti “fai-da-te”; diventano invece entità gestite attraverso piattaforme tecnologiche avanzate. Queste ultime, sono progettate per fare quello che abbiamo svolto manualmente nella fase precedente (Concettuale), ovvero, raccogliere e organizzare le informazioni necessarie per creare gemelli digitali funzionanti. Queste piattaforme possono avere delle proprie “banche dati”, ma non è strettamente necessario che sia così. Le informazioni possono trovarsi in diversi luoghi e formati e la piattaforma ha il compito di unirle efficacemente.

La piattaforma non solo supporta la fase iniziale di sviluppo permettendo una continua realizzazione e miglioramento del gemello digitale; tuttavia, include anche simulazioni che replicano il comportamento reale del prodotto. Questo significa che molti test possono essere eseguiti virtualmente, riducendo la necessità di test fisici e accelerando il processo di sviluppo. Si evidenzia inoltre come queste piattaforme abbiano una capacità di monitorare i prodotti reali e di simulare come questi si comporteranno in futuro. Questo non solo aumenta l'efficienza, ma crea anche un notevole valore economico. Le piattaforme raccolgono dati continuamente mentre i prodotti sono in uso riducendo lo spreco di risorse e migliorando la gestione delle stesse.

In aggiunta, queste piattaforme possono prevedere il comportamento futuro dei prodotti attraverso l'analisi dei dati predittiva offrendo una significativa opportunità di generare ricavi. Man mano che queste piattaforme si espandono e migliorano nel trasformare i dati in informazioni utili, il loro valore aumenta, aprendo nuove possibilità per l'innovazione e l'investimento nel campo dei Digital Twin.

### Fase 4 - (Front Running Simulation – FRS)

La fase 4 rappresenta l'apice dell'evoluzione del gemello digitale, nella quale entra in gioco il Digital Twin Intelligente (IDT). Questa versione avanzata del gemello digitale è

---

<sup>16</sup> Ivi, p. 114.

dotata di intelligenza artificiale, la quale le permette di analizzare continuamente grandi quantità di dati e di fare previsioni accurate. In questa fase, il sistema passa da una semplice reazione a un approccio proattivo fornendo informazioni vitali in maniera autonoma e continua. Questa piattaforma avanzata è sempre attiva, monitorando attivamente le azioni degli utenti e i dati raccolti da molteplici fonti.

Un aspetto indispensabile di questa fase è “la capacità dell'IDT di funzionare come una sorta di sfera di cristallo tecnologica”<sup>17</sup> prevedendo gli esiti futuri con una certa probabilità e avvisando gli utenti di possibili guasti o malfunzionamenti prima che questi accadano. Questo non solo migliora l'efficienza e riduce i costi di manutenzione, ma può anche prevenire incidenti catastrofici, salvaguardando così risorse e vite umane. In termini di capacità di calcolo si prevede un aumento esponenziale nei prossimi decenni, il che amplierà ulteriormente le capacità di queste piattaforme. L'incremento previsto porterà a una disponibilità quasi illimitata di potenza di calcolo permettendo all'IDT di elaborare e analizzare dati in quantità sempre maggiori.

Le tecnologie chiave per lo sviluppo del DT come Internet of Things o Intelligenza Artificiale stanno mutando rapidamente. Di conseguenza anche i Digital Twin continueranno a svilupparsi e il loro vero potenziale è ancora in gran parte inesplorato. Le stime prevedono che il mercato del DT crescerà a un ritmo del 58%, passando dai 5,4 miliardi di dollari del 2020 ai 48,2 miliardi di dollari entro il 2026<sup>18</sup>. L'adozione su larga scala del Digital Twin dipenderà molto dalla possibilità di sostituire costose implementazioni fisiche con soluzioni software più efficienti ed economiche<sup>19</sup>. E, in ogni caso, sono numerosissimi i campi di applicazioni possibili del DT, andando dall'agricoltura all'edilizia, dall'automotive alla sanità per arrivare appunto al modello digital urbano (argomento precipuo di questa tesi) che risulta particolarmente interessante perché le trasposizioni da reale a virtuale implicano in qualche modo anche la traduzione in dati di comportamenti sociali, con i conseguenti rischi in termini di privacy, dati e sicurezza. Di questo parleremo nel prossimo paragrafo.

---

<sup>17</sup> Ivi, p. 115.

<sup>18</sup> Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchey, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>

<sup>19</sup> Blanchet, M. (2023). The dimension of markets for the digital twin. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 65-96). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_3)

### 1.3 Le dinamiche del Capitalismo Digitale: privacy, sicurezza e interoperabilità dei dati

Come ripetuto più volte, la tecnologia DT si basa sulla raccolta e sull'organizzazione di una vasta quantità di dati che descrivono il comportamento e lo stato di un sistema nel tempo permettendo di effettuare analisi predittive, migliorare le prestazioni e ottimizzare i processi decisionali. La possibilità di accedere a dati storici consente di individuare tendenze, anticipare malfunzionamenti e comprendere il ciclo di vita di un prodotto contribuendo così alla sua efficienza e longevità. Tuttavia, oltre alla funzione di monitoraggio e ottimizzazione il DT rappresenta un archivio di conoscenze tecniche e progettuali che riflettono le scelte fatte durante la sua creazione e implementazione. Se da un lato questo aspetto lo rende un potentissimo strumento di innovazione, dall'altro solleva una serie di problematiche legate alla privacy, alla trasparenza e alla governance dei dati. In un contesto in cui la protezione delle informazioni è sempre più centrale, il rischio di abuso, appropriazione indebita o utilizzo non autorizzato dei dati raccolti dai DT rappresenta una sfida significativa.

Un ulteriore ostacolo per l'adozione su larga scala del Digital Twin è rappresentato dalla questione dell'interoperabilità: l'esistenza di molteplici DT operanti su diversi livelli gerarchici, ciascuno generando dati eterogenei e interagendo con altri sistemi, crea un ambiente complesso in cui l'integrazione delle informazioni risulta difficoltosa. L'assenza di standard condivisi e di protocolli di comunicazione universali può ostacolare l'efficacia del DT limitando la capacità di offrire una visione unificata e coesa del sistema che rappresenta<sup>20</sup>. Questo problema è particolarmente evidente in ambiti come le smart cities o le industrie cosiddette 4.0, in cui la capacità di connettere dispositivi, infrastrutture e processi dipende dalla possibilità di far dialogare tra loro differenti DT. La difficoltà nel garantire un'interoperabilità fluida tra sistemi eterogenei evidenzia la necessità di sviluppare framework e architetture più flessibili capaci di superare le barriere tecnologiche attuali.

---

<sup>20</sup> Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchey, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>

Simultaneamente, la cyber security rappresenta una delle principali sfide legate al Digital Twin: la centralizzazione e l'accessibilità dei dati all'interno del DT rendono questa tecnologia un obiettivo particolarmente attraente per i cyber criminali con conseguenze che possono variare dalla sottrazione di dati sensibili alla manipolazione di informazioni critiche per il funzionamento di sistemi fisici<sup>21</sup>. La protezione del Digital Twin non può quindi essere considerata un aspetto secondario, ma deve essere una priorità nella progettazione e nell'implementazione di questi sistemi. L'adozione di protocolli di sicurezza avanzati, l'impiego di crittografia per la protezione delle informazioni e la definizione di strategie di gestione del rischio sono elementi essenziali per garantire un utilizzo sicuro del DT in contesti industriali, urbani e infrastrutturali.

Oltre alle questioni di sicurezza informatica, un altro elemento critico riguarda la governance dei dati. La difficoltà nel garantire che i dati raccolti siano affidabili, coerenti e utilizzabili può compromettere la validità delle analisi e delle simulazioni prodotte dal DT. Inoltre, la trasformazione dei dati provenienti da fonti diverse, il loro filtraggio e la gestione di eventuali perdite di informazione rappresentano problematiche ancora aperte. Senza un quadro di governance ben strutturato, il rischio di fallimento dei progetti basati su DT aumenta significativamente. La definizione di standard di qualità dei dati e di protocolli di accesso controllato è quindi cruciale per il successo di questa tecnologia.

Al di là delle sfide tecniche e organizzative il Digital Twin pone anche interrogativi di natura etica e sociale: la raccolta e l'analisi dei dati generati dal comportamento degli utenti sollevano questioni sulla proprietà delle informazioni e sul diritto alla privacy; la modellazione dettagliata dell'uso di un oggetto da parte di un individuo consente ai produttori di raccogliere informazioni preziose per migliorare il prodotto e ottimizzare le strategie di mercato. Tuttavia, questa stessa capacità di analisi può trasformarsi in un rischio per la privacy, in quanto permette di tracciare abitudini, preferenze e comportamenti degli utenti con un livello di dettaglio senza precedenti. La questione della proprietà dei dati prodotti da un DT è quindi un nodo cruciale: chi ha il diritto di utilizzare queste informazioni? I dati raccolti appartengono all'utente finale, al produttore del

---

<sup>21</sup> Crespi, N., Drobot, A. T., & Minerva, R. (2023). The digital twin: What and why?. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 3-20). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_1)

prodotto fisico o alla piattaforma che elabora i dati? La mancanza di normative chiare su questi aspetti potrebbe portare a un uso improprio delle informazioni, con implicazioni significative per la tutela della privacy e per la regolamentazione del settore.

Un'applicazione che fa sintesi di tutte queste problematiche è data proprio dal quadro dello studio dei gemelli digitali delle città. I Digital Twin urbani, infatti, emergono come una tecnologia promettente, offrendo la possibilità di ottimizzare la gestione delle risorse urbane attraverso la simulazione dettagliata delle dinamiche cittadine, anche se questa tecnologia nella sua stretta interazione con le piattaforme proprietarie di Big Data gestite da colossi della tecnologia solleva questioni significative relative alla privacy, al controllo dei dati e all'etica, come ampiamente discusso da Shoshana Zuboff nel suo libro "Il capitalismo della sorveglianza".

I Digital Twin urbani sono modelli virtuali che replicano in digitale l'ambiente urbano in tempo reale e attraverso dati raccolti da una miriade di sensori integrati nell'infrastruttura cittadina. Questi modelli consentono agli amministratori di osservare e prevedere le reazioni del sistema urbano a vari stimoli e interventi: dalla gestione del traffico e dei sistemi energetici, alla risposta alle emergenze e alla pianificazione a lungo termine. L'accuratezza di tali modelli dipende massivamente dalla quantità e qualità dei dati raccolti, successivamente trasformati, elaborati e interpretati formando una rappresentazione affidabile e interattiva della città.

Parallelamente, le piattaforme proprietarie di dati rappresentano un punto chiave del moderno capitalismo della sorveglianza descritto da Zuboff. Queste piattaforme, gestite da giganti tecnologici come Google, Amazon e Facebook, accumulano immensi volumi di dati personali, i quali vengono poi utilizzati per alimentare algoritmi di apprendimento automatico, personalizzare la pubblicità e in generale per creare nuove forme di valore economico basate sulla predizione e manipolazione del comportamento umano: "Ogni attore interessato a informazioni probabilistiche sul nostro comportamento e/o a influenzare il nostro comportamento futuro può pagare per svolgere un ruolo nel mercato dove i destini di individui, gruppi, corpi e oggetti vengono predetti e venduti"<sup>22</sup>. Il fulcro del problema identificato nel libro è la trasformazione della privacy individuale in una

---

<sup>22</sup> Zuboff, S. (2019). *Il capitalismo della sorveglianza*. Luiss.

nuova frontiera di mercato, nella quale i dati personali sono estratti e adoperati senza una piena trasparenza o consenso effettivo degli utenti.

Mentre ci avviciniamo a un futuro sempre più interconnesso e digitalizzato, le parole dell'autrice Zuboff risuonano con una urgenza particolare: “Se nei decenni a venire dovremo ridare forza alla democrazia, dovremo anche ritrovare l'indignazione e il senso di lutto per quel che ci stanno rubando. [...] È uno scandalo che il capitalismo della sorveglianza ci abbia tolto tanti diritti abusando delle proprie competenze digitali e della promessa di rendere la conoscenza più democratica. Il futuro potrà anche essere digitale, ma dovrà per prima cosa essere umano”<sup>23</sup>. In materia di Gemelli Digitali, questo richiamo all'umanità è essenziale per garantire che tali tecnologie vengano sviluppate e implementate con un forte impegno verso la salvaguardia della dignità umana e dei diritti individuali.

I moniti di Zuboff sono dunque da tenere bene a mente quando si interrogano i modelli di DT urbani, come faremo ampiamente nei prossimi due capitoli. Intanto però, concludiamo questa prima parte con tre casi di studio significativi che mostrano la varietà di applicazione dei DT e i loro possibili sviluppi.

## 1.4 Casi di Studio: applicazioni pratiche dei Digital Twin nel mondo reale

Nel corso di questo primo capitolo abbiamo condotto un'analisi approfondita sui Digital Twin. Per comprendere meglio come questi concetti si manifestino nella pratica ci rivolgiamo ora allo studio di tre casi significativi: questi esempi illustrano l'implementazione e l'impiego dei DT in diversi settori facendo emergere non solo il potenziale rivoluzionario di questa tecnologia, ma anche sfide attuali come la memoria storica e la sostenibilità ambientale.

---

<sup>23</sup> Ivi.

## Caso di Studio 1: Il Gemello Digitale di Notre Dame

Il primo caso studio riguarda l'utilizzo dei DT per il mantenimento del patrimonio culturale. Ad aprile 2019 un devastante incendio ha danneggiato gravemente la Cattedrale di Notre Dame, sollevando timori di un possibile crollo completo di questo simbolo storico francese. Tuttavia, fortunatamente, anni prima dell'incidente era stata realizzata una scansione completa dell'edificio creando così un Gemello Digitale che si è rivelato di vitale importanza nei lavori di restauro<sup>24</sup>.

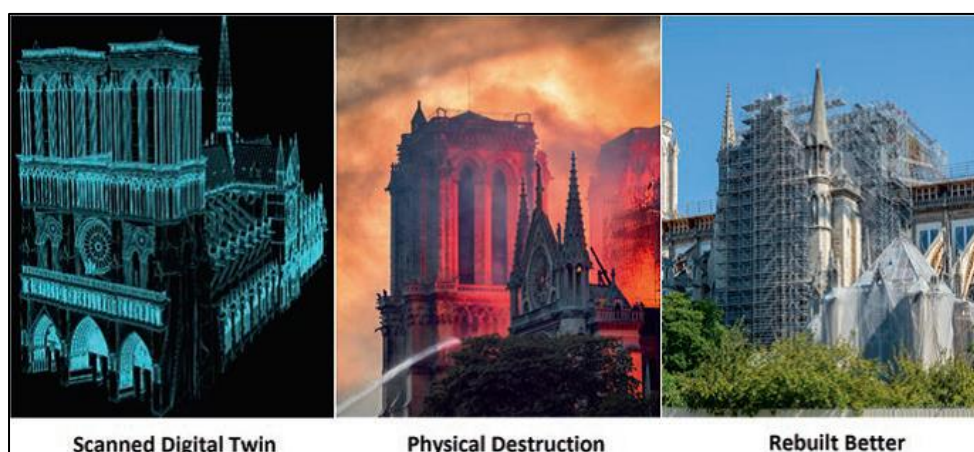


Figura 3:

*Da sinistra a destra: il DT di Notre Dame, la sua distruzione nel 2019 e il meticoloso processo di ricostruzione basato sul modello digitale.*

Grazie alla tecnologia Digital Twin, ingegneri e architetti hanno avuto accesso a un modello digitale estremamente dettagliato della cattedrale che ha facilitato il restauro permettendo l'integrazione di materiali e design innovativi, incorporando anche sistemi di sicurezza avanzati per prevenire futuri danni simili all'incendio.

Inoltre il DT di Notre Dame ha dato la possibilità di visitare parti virtuali della cattedrale precedentemente inaccessibili, estendendo così l'esperienza del visitatore oltre i limiti fisici.

---

<sup>24</sup> Schmitt, L., & Copps, D. (2023). The business of digital twins. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 21-63). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_2)

La Figura 3 rappresenta in modo chiaro ed efficace le tre fasi chiave della trasformazione della Cattedrale di Notre Dame attraverso l'uso della tecnologia Digital Twin. Nella prima parte, si osserva come la scansione digitale della struttura ha permesso di raccogliere dati dettagliati e precisi prima dell'incendio. La seconda immagine documenta la devastazione causata dal fuoco, mettendo in rilievo l'entità dei danni subiti dalla cattedrale. Infine, la terza parte mostra come il processo di ricostruzione reso possibile proprio grazie al modello digitale ha permesso di replicare fedelmente la struttura originaria e al contempo introdurre miglioramenti tecnologici e di sicurezza. Questo esempio dimostra come il Digital Twin non sia solo un supporto per il restauro, ma un vero e proprio strumento di innovazione che consente di preservare il passato proiettandolo nel futuro.

L'utilizzo dei Digital Twin per la tutela del patrimonio storico non si limita a contesti internazionali come quello di Notre Dame, ma trova applicazione anche in Italia. Un esempio di spicco è rappresentato dall'esperienza di Bologna, dove si sta sviluppando un Digital Twin per monitorare la Torre Garisenda, uno dei simboli storici della città. Come verrà approfondito nel Capitolo 3, l'integrazione di sensori e simulazioni predittive permetterà di analizzare in tempo reale le condizioni strutturali della torre, supportando interventi di restauro. Questo dimostra come i Digital Twin possano essere strumenti fondamentali per la conservazione di beni architettonici contribuendo a una gestione più consapevole del rischio e alla salvaguardia di monumenti di valore storico e culturale.

## Caso di studio 2: Gemelli Digitali e Gestione dei Rifiuti Elettronici

L'evoluzione dei Digital Twin sta aprendo nuove opportunità per diversi settori ivi compresi anche quello elettrico ed elettronico e nella loro gestione. Con un crescente uso di smartphone in tutto il globo, infatti, emergono sfide significative legate alla sostenibilità. La frequente sostituzione di questi dispositivi e conseguentemente il loro impatto ambientale sono questioni critiche.

Uno dei principali problemi riguarda la gestione dei rifiuti elettronici (RAEE), i quali rappresentano il flusso di rifiuti più in rapida crescita al mondo. Come sottolinea l'autore Max Blanchet: "Nel 2019 solo il 17,4% dei 53,6 milioni di tonnellate di rifiuti elettronici viene correttamente raccolto e riciclato, rendendo urgente il miglioramento delle strategie

di recupero del valore, la riduzione delle emissioni di gas serra e la mitigazione dei rischi per la salute umana”<sup>25</sup>.

In questo contesto, i Digital Twin possono offrire un contributo essenziale nell’implementazione dei principi dell’economia circolare contribuendo a migliorare la gestione dei prodotti lungo tutto il loro ciclo di vita: favorendo la riparazione, il riutilizzo e il ricondizionamento dei dispositivi oltre a migliorare il riciclaggio grazie alla fornitura di dati dettagliati sulla composizione materiale e chimica dei prodotti. In altri termini, i DT possono garantire una continuità digitale tra i diversi attori della catena del valore, permettendo ai riciclatori di accedere a dati precisi sulla composizione del dispositivo senza dover effettuare test aggiuntivi<sup>26</sup>.

Le potenzialità di questa tecnologia sono enormi: aziende del settore potrebbero generare fino a 73 miliardi di dollari di entrate aggiuntive grazie a un maggiore riutilizzo e ricondizionamento delle apparecchiature, riducendo al contempo l’impatto ambientale. In particolare, una gestione più efficiente dei WEEE potrebbe ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>.

### Caso di studio 3: Overlay Digital Twin e Applicazioni nelle città

Per concludere il primo capitolo dedicato al Digital Twin come concetto generico, la tesi illustra un esempio che introduce al tema del prossimo capitolo: l'utilizzo di questa tecnologia innovativa nelle città. Questo esempio apre la sezione su come il Digital Twin possa trasformare la gestione e il funzionamento delle città moderne. Per affrontare questo passaggio, tuttavia, serve una precisazione preliminare che introduca il concetto di “Overlay Digital Twin”.

Tradizionalmente, un DT era di proprietà e gestito da un unico soggetto. Tuttavia, con l’introduzione degli “Overlay Digital Twin” (ODT) questo paradigma sta cambiando. Gli ODT sono costruiti aggregando più DT appartenenti a diversi proprietari creando così un sistema più complesso e interconnesso. La principale sfida di questa struttura è la

---

<sup>25</sup> Blanchet, M. (2023). The dimension of markets for the digital twin. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 65-96). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_3)

<sup>26</sup> Ivi.

relazione debole tra il DT Contributore (ovvero il singolo DT che fornisce dati e modelli) e l'ODT<sup>27</sup>.

Poiché ogni DT contributore è gestito da un diverso proprietario, quest'ultimo può decidere in qualsiasi momento di aderire o ritirarsi dalla rete dell'ODT. Questo rende necessario un sistema di gestione dinamico in grado di adattarsi continuamente ai cambiamenti nella disponibilità dei dati e nella collaborazione tra i diversi attori coinvolti.

L'obiettivo a lungo termine è creare piattaforme che favoriscano la collaborazione tra aziende nella progettazione, sviluppo e utilizzo dei DT. Un'impresa, per esempio, che produce un prodotto complesso potrebbe lavorare con fornitori che forniscono sotto-componenti già digitalizzati come DT migliorando così l'interoperabilità e l'efficienza dell'intero processo produttivo.

Un esempio direttamente legato al tema della tesi è la possibilità di creare un Overlay Digital Twin per una città<sup>28</sup>: un gemello digitale che raccoglie informazioni dai gemelli digitali degli edifici della città. Questo ODT non solo riceve dati, ma può anche comunicare con i singoli DT ovvero con i singoli edifici per applicare determinate politiche o azioni. Ipotizzando un caso di emergenza per terremoto, l'Overlay Digital Twin della città può avvisare i singoli Digital Twin degli edifici sull'evento imminente. Questi a loro volta possono reagire attivando misure di sicurezza come: far suonare l'allarme, fermare gli ascensori e assicurarsi che le porte siano aperte per facilitare l'evacuazione. In questo modo, il Digital Twin della città migliora la sicurezza e la gestione delle emergenze coordinando in tempo reale le risposte degli edifici e riducendo i rischi per i cittadini.

## Conclusioni

Il primo capitolo di questa tesi ha gettato le fondamenta per un'analisi approfondita del Digital Twin, illustrando non solo le sue potenzialità rivoluzionarie ma anche le sfide che

---

<sup>27</sup> Kovacs, E., & Mori, K. (2023). Digital twin architecture – An introduction. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 125–151). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_5)

<sup>28</sup> Ivi.

comporta la sua implementazione. La connessione tra i Digital Twin e le piattaforme di Big Data offre prospettive inedite per la gestione e la pianificazione delle città, ma solleva anche interrogativi critici riguardo alla privacy, alla sicurezza dei dati e all'impatto socio-economico.

È necessario che legislatore, tecnici e cittadini, collaborino attivamente per garantire un'applicazione etica e trasparente delle tecnologie dei Digital Twin. Solo attraverso un dialogo aperto e pluridisciplinare sarà possibile affrontare le complesse dinamiche che questi strumenti tecnologici introducono e garantire che il loro utilizzo promuova il bene collettivo anziché accentuare le disparità esistenti. La definizione di standard, l'elaborazione di politiche di governance dei dati efficaci e l'implementazione di robusti protocolli di cybersecurity sono passaggi essenziali per costruire un futuro fiorente per i Digital Twin urbani.

## Capitolo 2

# Il gemello digitale urbano

### Introduzione

Negli ultimi decenni, l'urbanizzazione ha subito un'accelerazione straordinaria, conseguentemente ad una crescita esponenziale della popolazione nelle aree metropolitane. Questa evoluzione pone sfide sempre più complesse per le città, le quali devono affrontare problemi legati alla gestione delle infrastrutture, alla mobilità sostenibile, alla sicurezza e alla qualità della vita dei cittadini. In questo quadro i Digital Twin si presentano come una soluzione tecnologica rivoluzionaria capace di trasformare il modo in cui le città vengono progettate, monitorate e ottimizzate. Dall'altro lato, tuttavia, come ogni avvento di tecnologia "disruptive" introducono anche nuove problematiche potenziali da tenere costantemente presenti.

I Digital Twin consentono di integrare ingenti quantità di dati provenienti da sensori IoT, intelligenza artificiale e big data analytics per fornire una panoramica completa e aggiornata delle città. L'utilizzo di queste tecnologie permette di simulare scenari, prevedere criticità e ottimizzare le risorse urbane contribuendo alla creazione di ambienti più resilienti, sostenibili e inclusivi.

In questo capitolo verrà indagato il concetto di "smart city" dimostrando come la digitalizzazione e l'uso avanzato dei dati possano migliorare l'efficienza e la vivibilità urbana. Successivamente, si entrerà nel dettaglio dell'Urban Digital Twin (termine per indicare il gemello digitale per l'amministrazione delle città), analizzando la struttura, i dati raccolti e il funzionamento.

Per rendere più concreta questa analisi, verranno presentati infine, tre casi studio significativi di città che hanno implementato con successo i Digital Twin per le loro strategie di gestione urbana: Shanghai, una delle metropoli più avanzate nel campo della digitalizzazione e dell'intelligenza artificiale; Helsinki, un esempio di città all'avanguardia nella sostenibilità e nella trasparenza dei dati; e Zurigo, che si distingue

per l'efficacia nella gestione intelligente delle infrastrutture e per la partecipazione attiva. L'obiettivo è fornire un quadro chiaro e applicativo dell'impatto dei Digital Twin nel miglioramento della qualità della vita nelle aree urbane.

Al contempo, non mancheremo di rilevare anche le criticità che ineriscono al modello del Digital Twin urbano. Chi possiede i dati? Chi li controlla? Come viene tutelata la privacy dei cittadini? Sono tutte questioni cruciali che emergono nel dibattito attuale sulla governance dei dati urbani e sulla trasparenza delle amministrazioni. Inoltre, il rischio di una dipendenza tecnologica e la possibile esclusione di alcune fasce della popolazione dal processo decisionale sollevano interrogativi etici e sociali. Analizzare questi aspetti sarà fondamentale per comprendere non solo le opportunità, ma anche i limiti e le sfide che accompagnano l'adozione dei Digital Twin nelle città.

## 2.1 La Smart City

Il modello di smart city ha progressivamente acquisito importanza nel panorama contemporaneo diventando un elemento perno delle strategie di sviluppo urbano: l'espansione delle aree metropolitane e l'incremento della densità abitativa hanno portato le città a dover affrontare sfide sempre più complesse legate alla sostenibilità ambientale, all'efficienza energetica, alla utilità e alla sicurezza. L'innovazione tecnologica e la digitalizzazione si sono dimostrate strumenti essenziali per rispondere a queste esigenze, permettendo di creare città sempre più connesse, ed efficienti.

I modelli di smart cities si basano su un utilizzo "intelligente" delle tecnologie digitali per ottimizzare le risorse, migliorare i servizi e rendere le città più sostenibili; attraverso l'integrazione di sensori, sistemi di intelligenza artificiale e piattaforme di gestione dei dati, le amministrazioni possono prendere decisioni più informate e tempestive, anticipando problemi e migliorando la qualità della vita dei cittadini. Il concetto "smart cities" rappresenta in effetti un nuovo paradigma dell'urbanizzazione: un modello evolutivo che integra innovazione tecnologica, infrastrutture digitali e politiche pubbliche mirate a migliorare la qualità della vita urbana. Tale modello si fonda su tre pilastri:

tecnologia, dati e persone<sup>29</sup>. La tecnologia fornisce infrastrutture intelligenti, dai sensori IoT alle reti 5G, ottimizzando servizi come trasporti ed energia; i dati, raccolti e analizzati, permettono decisioni informate per una gestione urbana più efficiente e sostenibile; le persone, infine, sono il cuore della città intelligente, poiché il loro coinvolgimento e interazione con le soluzioni digitali garantiscono un'adozione efficace e un miglioramento della qualità della vita. L'integrazione di questi tre fattori trasforma le città in ecosistemi dinamici e interconnessi.

Al principio, il concetto di Smart City era prevalentemente incentrato sull'operatività e sull'uso ottimizzato delle risorse urbane. Negli ultimi anni, invece, si è registrato un cambiamento significativo verso un modello “people-centric” in cui si pone il cittadino al centro della trasformazione digitale della città<sup>30</sup>. Le nuove strategie di governance, infatti, mirano a creare città non solo più efficienti, ma anche più inclusive, garantendo che la tecnologia venga utilizzata per migliorare la qualità della vita e non solo per ottimizzare i processi amministrativi.

I vantaggi dello sviluppo delle Smart Cities si estendono quindi a quasi tutti i settori urbani, tra cui<sup>31</sup>:

- Trasporti e mobilità: sistemi intelligenti per la gestione del traffico, dei trasporti pubblici e implicitamente per la riduzione delle emissioni di CO2.
- Energia e ambiente: monitoraggio in tempo reale del consumo energetico.
- Educazione e inclusione digitale: accesso diffuso alla connettività e strumenti digitali per la formazione.
- Sanità e sicurezza: sistemi avanzati per la sorveglianza e il monitoraggio della salute pubblica.

Le Smart Cities rappresentano quindi un ecosistema complesso, nel quale la tecnologia è al servizio delle persone e dell'ambiente. Tuttavia, per garantire un'implementazione vantaggiosa, è essenziale adottare approcci inclusivi e trasparenti, come evidenziato nel concetto di “maturità digitale”, col quale si intende “l'allineamento delle persone, della

---

<sup>29</sup> Myers, J., Larios, V., & Missikoff, O. (2023). Thriving smart cities. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 901–969). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_30)

<sup>30</sup> Ivi.

<sup>31</sup> Shahat, E., Hyun, C. T., & Yeom, C. (2021). City digital twin potentials: A review and research agenda. *Sustainability*, 13(6), 3386. <https://doi.org/10.3390/su13063386>

cultura, della struttura e delle attività di un'organizzazione per competere efficacemente sfruttando le opportunità offerte dall'infrastruttura tecnologica, sia all'interno che all'esterno dell'organizzazione”<sup>32</sup>. In altre parole, la maturità digitale non riguarda solo l'adozione di nuove tecnologie, ma anche la capacità di integrarle in modo strategico e consapevole all'interno di un ambiente urbano. Ciò implica che persone, processi e infrastrutture devono evolversi insieme, creando un ambiente in cui l'innovazione possa realmente migliorare la qualità della vita e l'efficienza dei servizi.

Nonostante i numerosi vantaggi e le promesse di efficienza e sostenibilità, il concetto di Smart City non è affatto neutrale, ma è intrinsecamente legato a dinamiche politiche, economiche e sociali che meritano un'attenta riflessione. Il rischio principale è che la trasformazione digitale delle città possa avvenire senza un adeguato coinvolgimento della cittadinanza, ritrovandosi in un modello di governance fortemente tecnocratico, in cui le decisioni vengono prese non solo da enti pubblici, ma soprattutto da grandi aziende tecnologiche e operatori del settore privato. Questo solleva questioni fondamentali di trasparenza e democrazia: chi ha realmente il controllo sulle infrastrutture digitali e sui dati raccolti? Le soluzioni adottate sono realmente orientate al benessere collettivo o rispondono a logiche di mercato che favoriscono pochi attori dominanti? L'adozione di tecnologie per la gestione urbana rischia infatti di consolidare modelli decisionali in cui il cittadino non è un attore attivo del cambiamento, ma un semplice utente passivo dei servizi digitali offerti. Inoltre, il concetto stesso di “intelligenza urbana” deve essere valutato criticamente: una città diventa davvero “intelligente” solo perché incorpora sistemi digitali avanzati o piuttosto quando è in grado di garantire equità, accessibilità e partecipazione?

Un altro aspetto critico riguarda le implicazioni legate alla gestione e alla proprietà dei dati. Le Smart Cities generano enormi quantità di informazioni attraverso sensori IoT, telecamere di sorveglianza, applicazioni di mobilità e sistemi di pagamento digitali, alimentando un ecosistema di dati che può rappresentare sia un'opportunità che una minaccia. Il modo in cui questi dati vengono raccolti, archiviati e utilizzati solleva questioni etiche e giuridiche di primaria importanza: chi ha il diritto di accedere a queste

---

<sup>32</sup> Kane, G., Phillips, A., Copulsky, J., & Andrus, G. (2019). *The technology fallacy: How people are the real key to digital transformation*. MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/11661.001.0001>

informazioni? Le amministrazioni pubbliche hanno il potere e le competenze per gestire in modo sicuro ed equo questa mole di dati o rischiano di delegare questo ruolo a colossi tecnologici globali, con il pericolo di una privatizzazione di fatto delle infrastrutture digitali urbane? Per evitare derive autoritarie e garantire che le Smart Cities siano realmente al servizio della collettività, è necessario adottare modelli di governance trasparente e inclusiva, che pongano al centro i diritti digitali dei cittadini e impediscano la concentrazione del potere tecnologico nelle mani di pochi attori.

Nelle prossime sezioni esploreremo come il concetto di Smart City si intersechi con i Digital Twin Urbani evidenziando il ruolo dei dati e delle simulazioni nel migliorare la gestione urbana e la sostenibilità delle città del futuro.

## 2.2 Dati utili per gli Urban Digital Twin

Come anticipato, lo sviluppo delle smart cities ha determinato un aumento esponenziale della produzione e raccolta di dati urbani grazie all'impiego di sensori, infrastrutture connesse e sistemi digitali avanzati. Ciononostante, la semplice disponibilità di dati non è sufficiente: per trarre reali benefici, è necessario strutturarli, interpretarli e renderli fruibili attraverso modelli analitici avanzati, capaci di supportare decisioni strategiche basate su evidenze concrete.

Come ricordano gli autori Myers, Larios e Missikoff in uno dei capitoli dedicati alle città nel libro “The Digital Twin”: “Nel contesto dei Big Data, generalmente si fa riferimento a tre dimensioni fondamentali, note come le 3V”<sup>33</sup>:

- Volume, che indica la quantità di dati prodotti.
- Velocità, che esprime la rapidità con cui questi vengono generati ed elaborati.
- Varietà, ovvero la diversificazione delle fonti e dei formati dei dati raccolti, che spaziano dai sensori urbani alle interazioni sui social media fino ai documenti amministrativi.

---

<sup>33</sup> Myers, J., Larios, V., & Missikoff, O. (2023). Thriving smart cities. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 901–969). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_30)

Tuttavia, quando si parla di Gemelli Digitali Urbani, queste tre dimensioni risultano limitate e insufficienti. Di conseguenza è necessario considerare ulteriori fattori qualitativi, che permettono di sfruttare al massimo il potenziale informativo dei dati urbani<sup>34</sup>. Tra questi:

- Veridicità, che misura l'affidabilità delle fonti e dei processi di elaborazione.
- Visibilità, che assicura un contesto chiaro e interpretabile dei dati raccolti.
- Variabilità, legata alla gestione delle discrepanze e alla coerenza temporale dell'aggiornamento delle informazioni.
- Valore, che rappresenta il beneficio derivante dall'utilizzo dei dati rispetto ai costi di acquisizione e gestione.

Questa espansione delle dimensioni dei dati è fondamentale per comprendere il valore strategico delle informazioni raccolte nelle città intelligenti. Affinché però i Digital Twin Urbani possano realmente supportare la gestione e l'evoluzione degli ambienti urbani è necessario analizzare le fonti da cui questi dati provengono e la loro categorizzazione. I dati urbani, infatti, non sono un insieme omogeneo, ma derivano da molteplici canali e possono essere distinti in tre principali categorie: dati statici, raccolti da documenti storici, database amministrativi e informazioni geo spaziali; dati in tempo reale, ottenuti da sensori IoT distribuiti nella città per monitorare la mobilità, i consumi e le condizioni ambientali; e i dati online (tramite piattaforme digitali e social media)<sup>35</sup>.

Ora che abbiamo classificato e analizzato le diverse tipologie di dati urbani è possibile comprendere come questi dati vengano effettivamente utilizzati all'interno dei DT Urbani. Nella sezione successiva verrà approfondito il loro funzionamento, illustrando la loro architettura e i diversi livelli che compongono questi sofisticati strumenti di simulazione e supporto alla governance urbana.

---

<sup>34</sup> Ivi.

<sup>35</sup> Ivi.

## 2.3 Funzionamento e struttura dei Digital Twin Urbani

“Ad oggi, gli Urban Digital Twin (UDT) rappresentano il livello più avanzato di Digital Twin esistenti come implementazioni al di fuori del laboratorio”<sup>36</sup>. L’UDT è un modello digitale avanzato che replica fedelmente gli elementi fisici, infrastrutturali e i processi di una città, creando un ecosistema digitale dinamico che si aggiorna in tempo reale<sup>37</sup>. Come detto, la gestione urbana genera un’enorme quantità di dati. Tuttavia, la semplice raccolta di questi dati non è sufficiente per garantire una governance urbana efficace. È necessario un sistema strutturato in grado di acquisire, trasmettere, pulire e analizzare queste informazioni per fornire elementi chiave per la gestione e la pianificazione. Gli Urban Digital Twins, appunto, rispondono proprio a questo bisogno. Per garantire questo, la loro infrastruttura informativa è composta da tre elementi fondamentali organizzati in sequenza dal momento della raccolta del dato fino alla sua elaborazione e utilizzo<sup>38</sup>:

### A. Reti di Sensori

Rappresentano il primo livello del sistema, fungendo da occhi e orecchie del Digital Twin. Questi dispositivi distribuiti sul territorio urbano raccolgono dati in tempo reale, permettendo di monitorare diversi parametri critici tra cui: flussi di traffico, con sensori sui veicoli, telecamere di sorveglianza e sistemi GPS che tracciano i movimenti del trasporto pubblico e privato; condizioni ambientali, con array di sensori intelligenti analizzano temperatura, umidità dell’aria, livello di particelle sospese, inquinamento acustico e qualità dell’acqua; sicurezza e sorveglianza, con le telecamere di monitoraggio forniscono dati sull’individuazione di eventi critici come incidenti o emergenze urbane; ulteriori sistemi di monitoraggio che valutano lo stato di ponti, strade, edifici e reti idriche. L’unione di questi dati consente di avere un quadro informativo aggiornato della città e di intervenire in modo tempestivo per risolvere eventuali criticità degli spazi urbani.

---

<sup>36</sup> Ivi.

<sup>37</sup> Ivanov, S., Nikolskaia, K., Radchenko, G., Sokolinsky, L., & Zymbler, M. (2020). Digital twin of city: Concept overview. In *Proceedings of the 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)* (pp. 178–186). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GloSIC50886.2020.9267879>

<sup>38</sup> Ivi.

## B. Pulizia e Validazione dei Dati

Non tutti i dati provenienti dai sensori sono affidabili: possono esserci errori, informazioni mancanti o incongruenze. Per questo motivo, è necessario un processo di data cleansing, ovvero di pulizia e validazione delle informazioni con il seguente sviluppo: per prima cosa il rilevamento degli outlier, cioè identificare valori anomali dovuti a errori tecnici; per poi proseguire con l'imputazione dei dati mancanti, attraverso la generazione di valori sintetici basati su dati storici e modelli predittivi; ed infine, la standardizzazione dei dati, unificando formati e unità di misura per garantire coerenza nell'elaborazione delle informazioni.

L'implementazione di questi processi garantisce che il Digital Twin lavori con dati accurati e affidabili, evitando distorsioni nelle analisi e nelle simulazioni urbane.

## C. Fog Computing per l'Elaborazione Dati

Una volta che i dati sono tutti raccolti e puliti, devono essere elaborati e resi fruibili per la gestione urbana. Gli UDT in questa ultima fase si avvalgono di tecnologie di Fog Computing, che permettono di ridurre la latenza e ottimizzare la gestione del carico computazionale. A differenza del Cloud Computing, il quale centralizza l'elaborazione dei dati in server remoti, il Fog Computing sfrutta nodi di elaborazione distribuiti sul territorio più vicini alle fonti di raccolta dati. Questo approccio offre numerosi vantaggi tra cui: minimizzazione del tempo di risposta, maggiore sicurezza e riduzione della dipendenza dalla connettività; in caso di problemi di rete, le informazioni possono essere processate localmente, senza interruzioni dei servizi. L'integrazione tra Fog Computing e l'intelligenza artificiale permette di trasformare l'UDT in un vero e proprio motore predittivo, capace di analizzare scenari complessi e suggerire soluzioni proattive alle sfide urbane.

Una volta visto come i dati vengano acquisiti, elaborati e resi utilizzabili, illustriamo di seguito come il Digital Twin opera attraverso una struttura multilivello a strati che rappresenta le diverse componenti della città<sup>39</sup>:

1. Terreno: contiene le informazioni geografiche e topografiche della città, fondamentali per la pianificazione territoriale.
2. Edifici: modelli dettagliati delle strutture urbane basati su tecnologie che permettono di monitorare lo stato e la manutenzione degli edifici.
3. Infrastrutture: reti stradali, sistemi di trasporto pubblico e reti idriche.
4. Mobilità: monitora il flusso del traffico e la logistica urbana, ottimizzando la gestione dei trasporti.
5. Sensori IoT e dati urbani: aggregano le informazioni provenienti da dispositivi connessi per un monitoraggio in tempo reale.
6. Simulazioni e supporto decisionale: è l'ultimo strato e utilizza algoritmi predittivi per analizzare scenari e supportare le politiche urbane.

Ogni strato è costruito sulla base del precedente, consentendo una rappresentazione sempre più dettagliata e funzionale della città facilitando la comprensione e la gestione dei suoi sistemi urbani. Questi strati connessi tra loro permettono di sperimentare e prevedere le conseguenze in un ambiente virtuale prima di applicarle nella realtà.

Gli Urban Digital Twins costituiscono un'innovazione di grande rilievo nella gestione urbana poiché consentono di convertire grandi quantità di dati grezzi in strumenti operativi avanzati, supportando le amministrazioni per elaborare progetti più efficienti, sostenibili e resilienti nelle città. Grazie alla loro versatilità trovano applicazione in numerosi ambiti, tra i quali: gestione delle infrastrutture (monitoraggio di edifici, strade, ponti e prevenire danni), analisi in tempo reale del traffico per ridurre congestionamenti e migliorare l'efficienza del trasporto pubblico, monitoraggio ambientale e gestione delle emergenze come disastri naturali<sup>40</sup>. Come evidenzia un rapporto della società di consulenza per il mercato tecnologico globale ABI Research: "I gemelli digitali

---

<sup>39</sup> Myers, J., Larios, V., & Missikoff, O. (2023). Thriving smart cities. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 901–969). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_30)

<sup>40</sup> Ivanov, S., Nikolskaia, K., Radchenko, G., Sokolinsky, L., & Zymbler, M. (2020). Digital twin of city: Concept overview. In *Proceedings of the 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)* (pp. 178–186). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GloSIC50886.2020.9267879>

diventeranno lo strumento definitivo per i governi cittadini per progettare, pianificare e gestire le loro infrastrutture e i loro beni connessi in modo efficiente e conveniente”.

Questo ampio spettro di applicazioni dimostra come gli UTD diventeranno strumenti essenziali per le amministrazioni cittadine. Alcune metropoli hanno già avviato progetti innovativi che sfruttano il Digital Twin per affrontare sfide urbane complesse, migliorando la pianificazione territoriale, la mobilità e la sostenibilità. Uno degli esempi più avanzati è rappresentato dal Digital Twin di Shanghai: città pioniera nell’adozione di questa tecnologia su vasta scala. Nella sezione successiva verrà illustrato come questa enorme città lo abbia implementato e quali benefici e rischi abbiano provocato alla cittadinanza.

## 2.4 Shanghai Digital Twin: il gemello digitale di una megalopoli

Shanghai è una delle metropoli più avanzate al mondo in termini di innovazione tecnologica e sviluppo urbano. Con una popolazione di oltre 24 milioni di abitanti e un'area urbana in continua espansione (circa 3.750 chilometri quadrati), Shanghai si trova ad affrontare sfide significative in termini di mobilità, gestione delle infrastrutture, qualità dell'aria, sicurezza pubblica e pianificazione urbana. Per rispondere a queste esigenze, la città ha implementato un gemello digitale che consente di monitorare, simulare e ottimizzare vari aspetti della vita urbana in tempo reale.

La realizzazione di questo progetto è stata affidata all'azienda cinese 51World (Fig. 4), specializzata in tecnologie di Gemelli Digitali. 51World, per costruire una replica digitale così dettagliata, ha utilizzato dati provenienti da satelliti, droni e sensori terrestri, garantendo una rappresentazione accurata e in tempo reale dell'ambiente urbano. L'integrazione di questi dati ha permesso di creare un modello tridimensionale dinamico che riflette costantemente le condizioni reali della città<sup>41</sup>.

---

<sup>41</sup> Harisova, E. (2020). 51 World created a digital twin of entire Shanghai. 80.lv. <https://www.80.lv/articles/51-world-created-a-digital-twin-of-entire-shanghai/>



Figura 4:  
Rappresentazione virtuale di Shanghai realizzata dalla società 51World attraverso la tecnologia del Digital Twin.

Il Digital Twin di Shanghai è stato implementato in numerosi settori della città, offrendo vantaggi concreti alla gestione urbana. Tra le principali, vale la pena di illustrare le tre seguenti applicazioni:

- Mobilità e gestione del traffico: l'ente governativo responsabile della gestione della sicurezza pubblica (il *Bureau* di Shanghai) ha sviluppato un sistema avanzato che monitora semafori, flussi di traffico e situazioni di emergenza in tempo reale, permettendo di regolare la viabilità in modo dinamico. Ad esempio, nella Shanghai Airport Economic Demonstration Zone (area economica strategica situata nei pressi dell'Aeroporto Internazionale di Shanghai), l'analisi dei flussi di traffico ha permesso di ottimizzare 11 semafori strategici riducendo la congestione e migliorando i tempi di percorrenza nelle ore di punta<sup>42</sup>.
- Monitoraggio delle infrastrutture: il Digital Twin costruito per il Ponte Yangpu (uno dei principali collegamenti di Shanghai) è un esempio concreto di come questa tecnologia possa migliorare la sicurezza delle infrastrutture. Il sistema monitora parametri come la forza del vento, la temperatura, le vibrazioni e i movimenti del ponte grazie a più di mille sensori distribuiti sulla struttura. Nel

<sup>42</sup> Zhu, Y. (2022). Virtual twin platforms: A bridge to city's future. *Shine News*. <https://www.shine.cn/news/metro/2203082846>

gennaio 2022, il Digital Twin ha rilevato una crepa longitudinale di circa 3 metri, permettendo interventi di manutenzione immediati e prevenendo possibili danni strutturali<sup>43</sup>.

- Pianificazione urbana: Shanghai utilizza il Digital Twin anche per il coordinamento dei servizi pubblici, migliorando la gestione delle risorse, la sicurezza e la risposta a situazioni di emergenza. Un caso emblematico è il sotto distretto di Huamu (facente parte del distretto di Pudong) nel quale è stato sviluppato un modello digitale dettagliato che copre un'area di circa 21 km<sup>2</sup> e una popolazione di oltre 249.000 residenti. Questo modello integra dati su edifici, infrastrutture e spazi pubblici per ottimizzare la gestione urbana. Inoltre, ha avuto un ruolo cruciale nel contenimento della pandemia di COVID-19, facilitando la gestione dei lockdown e il monitoraggio della popolazione<sup>44</sup>.

Il Digital Twin di Shanghai rappresenta uno dei progetti più avanzati al mondo nell'ambito della gestione urbana intelligente. Grazie a questo progetto pionieristico, Shanghai non solo ha migliorato la gestione e la pianificazione urbana, bensì ha anche consolidato la sua posizione come una delle città più avanzate tecnologicamente a livello globale. Questa implementazione rappresenta un modello di riferimento per altre metropoli che aspirano a integrare soluzioni digitali nella gestione delle loro infrastrutture e servizi.

L'adozione di un Digital Twin su scala urbana solleva però inevitabilmente interrogativi critici in merito alla privacy e alla proprietà dei dati. Se da un lato questa tecnologia rappresenta un potente strumento per la gestione e l'ottimizzazione della città, dall'altro pone sfide significative riguardo alla sorveglianza, alla protezione delle informazioni personali e al controllo dei dati da parte delle autorità. A ciò si aggiunge il rischio di manipolazione e censura dell'informazione: un sistema che raccoglie e analizza continuamente dati sulla popolazione può essere utilizzato non solo per fini amministrativi e di sicurezza, ma anche per influenzare il comportamento sociale e limitare determinate libertà. In un contesto in cui il governo ha accesso illimitato ai dati urbani, diventa possibile orientare le politiche cittadine in modo poco trasparente,

---

<sup>43</sup> Ivi.

<sup>44</sup> Zhu, Y. (2022). Shanghai harnessing 'digital twin' technology to improve city management. *Shine News*. <https://www.shine.cn/news/metro/2202151932>

escludendo dall'analisi pubblica informazioni ritenute scomode o potenzialmente destabilizzanti.

È interessante in questo senso tornare al testo *Il capitalismo della sorveglianza*, perché offre angolature da cui scorgere interpretazioni interessanti delle contraddizioni, o almeno delle criticità, che i DT urbani comportano. Secondo Zuboff, il mondo digitale ha introdotto un nuovo tipo di espropriazione del surplus informativo, in cui i dati personali vengono estratti e utilizzati per scopi che spesso sfuggono al controllo dei cittadini: “Nei luoghi fisici in cui viviamo, come le nostre case, le violazioni delle informazioni sono sempre più frequenti, visto che le nostre vite vengono reindirizzate come comportamenti ed espropriate come surplus. Anzi, in certi casi siamo noi stessi a causarle, perché non capiamo cosa accade dietro le quinte”<sup>45</sup>. Questa riflessione si applica perfettamente al contesto del Digital Twin di Shanghai, incrociando dati personali con informazioni su mobilità, consumi energetici e interazioni sociali, può essere utilizzato per assegnare punteggi di affidabilità ai cittadini, favorendo alcuni gruppi e penalizzandone altri (social scoring). Questo crea un ambiente in cui chiunque può essere costantemente valutato e classificato in base ai propri comportamenti, con potenziali conseguenze sull'accesso a servizi pubblici o opportunità economiche. Se in Europa vengono adottate normative come il GDPR (Regolamento generale sulla protezione dei dati), volte a tutelare la privacy e la trasparenza nella gestione dei dati (o almeno provarci), il modello cinese enfatizza il ruolo dello Stato nella raccolta e nell'utilizzo delle informazioni urbane, senza l'obbligo di consenso esplicito da parte della popolazione.

Concentrandoci sull'espressione “dietro le quinte”, diventa evidente come la rapida evoluzione delle tecnologie digitali abbia reso sempre più difficile per i cittadini comprendere la portata e le implicazioni della raccolta dei propri dati. Il Digital Twin di Shanghai, sebbene garantisca sicurezza ed efficienza, rafforza un modello di governance in cui la sorveglianza è costante e il consenso informato dei cittadini è spesso assente o minimo. La mancanza di trasparenza sull'uso delle informazioni personali pone dunque interrogativi cruciali sul rapporto tra innovazione e diritti individuali, specialmente in un contesto politico dove il controllo dei dati è centralizzato.

---

<sup>45</sup> Zuboff, S. (2019). *Il capitalismo della sorveglianza*. Luiss.

Tutto ciò pone una domanda fondamentale: fino a che punto una città può dirsi “intelligente” se la digitalizzazione avviene a scapito dei diritti individuali? Un modello di Smart City basato su un Digital Twin può migliorare la qualità della vita solo se i cittadini hanno la possibilità di conoscere, controllare e decidere come vengono utilizzati i propri dati. Senza adeguati meccanismi di accountability e regolamentazione, il rischio è che l’innovazione tecnologica diventi uno strumento di potere e sorveglianza piuttosto che di progresso sociale.

Se in Cina la digitalizzazione urbana è fortemente legata alla gestione statale, in Europa si punta su trasparenza e partecipazione pubblica. Un esempio significativo di questo approccio è Helsinki, che ha sviluppato un Digital Twin orientato alla sostenibilità, garantendo un modello più etico e inclusivo nella gestione dei dati urbani. Nel prossimo paragrafo sarà proprio questo il caso di studio che affronteremo.

## 2.5 Helsinki Digital Twin: un gemello digitale per la sostenibilità

L’impegno della capitale finlandese nella modellazione digitale ha radici che risalgono a oltre trent’anni fa. Ad oggi, Helsinki è una delle città leader a livello mondiale nello sviluppo e nell’adozione di Urban Digital Twins con un focus particolare sulla sostenibilità ambientale, con al centro l’obiettivo della riduzione delle emissioni di carbonio e l’ottimizzazione dei servizi urbani<sup>46</sup>.

Il percorso di Helsinki nel campo della modellazione digitale ha avuto inizio con un concorso pubblico di architettura urbana alla fine degli anni ’80. Nei decenni successivi la città ha poi adottato strumenti sempre più avanzati per la modellazione tridimensionale con il primo modello CAD 3D realizzato all’inizio del terzo millennio. Una svolta decisiva è avvenuta nel 2015 con il lancio del progetto “Helsinki 3D+”: iniziativa che sfrutta il City Geography Markup Language (CityGML) per organizzare dati vettoriali e semantici, ovvero informazioni strutturate che rappresentano sia la geometria degli elementi urbani (tramite coordinate e forme precise) sia il loro significato e le relazioni con l’ambiente circostante. I dati vettoriali descrivono la forma e la posizione degli

---

<sup>46</sup> Lawton, G. (2022). Helsinki’s pioneering city digital twin. *VentureBeat*. <https://venturebeat.com/ai/helsinkis-pioneering-city-digital-twin/>

oggetti nello spazio, come edifici, strade e aree verdi, attraverso punti, linee e poligoni. I dati semantici, invece, forniscono informazioni aggiuntive sul contesto e la funzione di questi elementi, specificando, ad esempio, il tipo di edificio, il suo utilizzo (residenziale, commerciale o pubblico) e altre proprietà rilevanti per la gestione urbana. Questa combinazione permette di costruire modelli digitali più intelligenti e funzionali, migliorando la pianificazione e il monitoraggio della città. L'approccio innovativo di Helsinki include anche un'interfaccia CityJSON, ossia un formato di dati basato su JSON, sviluppato per rappresentare modelli 3D di città che facilita l'integrazione del modello in altre applicazioni consentendo a enti pubblici e aziende private di sviluppare servizi urbani basati sugli stessi dati del Digital Twin<sup>47</sup>.

Uno degli obiettivi principali dell'Urban Digital Twin di Helsinki è quello di supportare le ambiziose politiche ambientali della Finlandia finalizzate alla neutralità carbonica entro il 2035 e al riciclo totale dei rifiuti entro il 2050. Per facilitare il raggiungimento di questi traguardi virtuosi Helsinki ha sviluppato strumenti basati sul Digital Twin per analizzare il consumo energetico degli edifici, l'ottimizzazione dell'uso delle risorse naturali e la previsione degli impatti ambientali delle politiche urbane. Uno degli strumenti più innovativi è l'Energy and Climate Atlas (piattaforma computazionale-analitica), il quale utilizza milioni di superfici semantiche (ovvero superfici digitali degli edifici arricchite da informazioni contestuali, come materiali, esposizione solare e caratteristiche termiche) per calcolare e visualizzare il potenziale energetico della città<sup>48</sup>. Grazie a questo strumento i cittadini possono confrontare i costi di interventi di efficientamento energetico e conseguentemente una riduzione dei consumi e delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Una applicazione significativa del Digital Twin di Helsinki è quella implementata nel quartiere di Kalasatama, un distretto che sta diventando un laboratorio per l'innovazione urbana e le soluzioni di smart city. Grazie all'integrazione del Digital Twin, Kalasatama è stato progettato tenendo conto di simulazioni avanzate in base a fattori ambientali, come la radiazione solare e il flusso del vento, per garantire edifici efficienti e spazi pubblici ottimizzati. La Figura 5 mostra un'analisi del vento nel quartiere di Kalasatama, utilizzata per valutare l'impatto dei nuovi edifici sul microclima urbano: queste simulazioni

---

<sup>47</sup> Ivi.

<sup>48</sup> Heiskanen, A. (2019). Helsinki is building a digital twin of the city. *AEC Business*. <https://aec-business.com/helsinki-is-building-a-digital-twin-of-the-city/>

consentono di progettare spazi più vivibili e resilienti, riducendo gli effetti delle correnti d'aria tra gli edifici e ottimizzando il comfort climatico per i cittadini. Inoltre, l'UDT del distretto facilita la partecipazione pubblica: attraverso piattaforme digitali come Open Cities Planner, i cittadini possono interagire direttamente con il modello digitale, esprimere opinioni sulle trasformazioni urbane e contribuire alla ridefinizione degli spazi pubblici<sup>49</sup>.

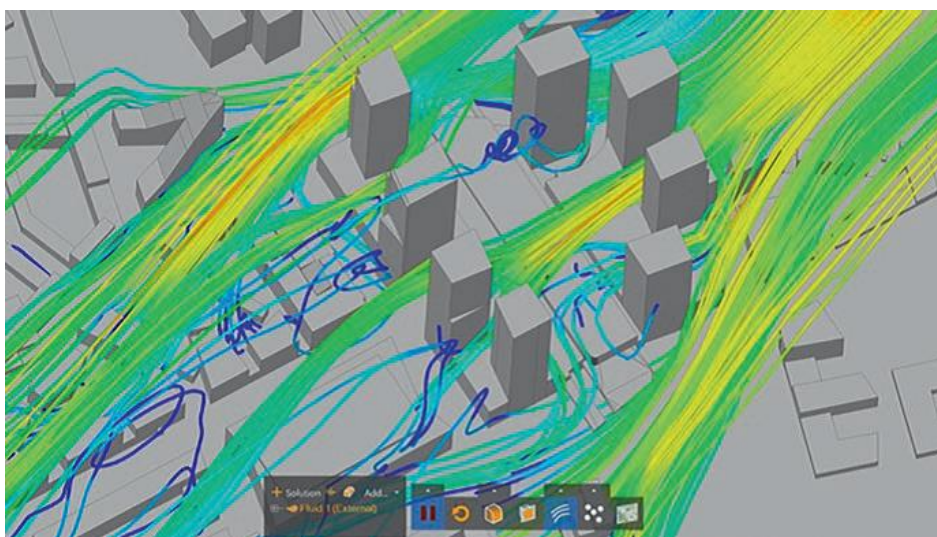


Figura 5:  
*Simulazione avanzata del flusso del vento tra gli edifici attraverso il Digital Twin della città.*

L'esperienza di Helsinki dimostra come un Gemello Digitale Urbano ben strutturato possa migliorare la qualità della vita, ottimizzare le infrastrutture e promuovere la sostenibilità. L'esperienza finlandese suggerisce, infatti, che un Digital Twin efficace non è solo uno strumento tecnologico, ma anche un mezzo per rafforzare la collaborazione tra settore pubblico, privato e cittadini, creando una città più intelligente, efficiente e resiliente.

L'esperienza di Helsinki, insomma, dimostra come i Gemelli Digitali Urbani possano essere strumenti fondamentali per una pianificazione urbana sostenibile. A differenza di

---

<sup>49</sup> Hämäläinen, M. (2021). Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city. *IET Smart Cities*, 3, e12015. <https://doi.org/10.1049/smc2.12015>

Shanghai, dove l'uso massiccio di dati è spesso legato a un approccio centralizzato e orientato al controllo, Helsinki ha adottato un modello basato sulla trasparenza, sulla governance aperta e sulla tutela della privacy. La capitale finlandese, appunto, garantisce che i dati raccolti siano accessibili in modo regolamentato e anonimizzati quando necessario, evitando forme di sorveglianza invasiva. Inoltre, pone un forte accento sulla partecipazione dei cittadini, permettendo loro di avere un ruolo attivo nel processo decisionale e nella gestione delle informazioni urbane. Questo approccio rende il Digital Twin di Helsinki uno strumento non solo di ottimizzazione urbana, ma anche di empowerment democratico, nel quale la tecnologia è al servizio della collettività senza comprometterne i diritti fondamentali.

Un altro esempio significativo è Zurigo (illustrato nella sezione successiva), che ha sviluppato un modello digitale avanzato focalizzato sull'ottimizzazione della mobilità, la gestione del territorio e l'integrazione con le infrastrutture urbane esistenti.

## 2.6 Zurigo Digital Twin: un modello innovativo per la pianificazione urbana

Il governo di Zurigo prevede un incremento demografico nei prossimi anni: un aumento che porterà la città ad avere una popolazione di più di mezzo milione di abitanti entro il 2040. Questa evoluzione demografica rappresenta un'opportunità per l'innovazione e la diversificazione economica e culturale della città, ma pone anche sfide in termini di pianificazione urbana. L'obiettivo dell'amministrazione locale è massimizzare la capacità abitativa senza compromettere la qualità della vita e garantire standard elevati per le infrastrutture, i servizi e gli spazi verdi. Data questa circostanza, la città ha definito una serie di strategie e obiettivi a lungo termine, delineati nelle *Strategies Zurich 2035*<sup>50</sup>. Esse puntano a un'integrazione intelligente della crescita, sfruttando le opportunità offerte dalla trasformazione digitale per ottimizzare la gestione del territorio e migliorare il processo decisionale. L'obiettivo principale è connettere persone, organizzazioni e infrastrutture

---

<sup>50</sup> Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The digital twin of the city of Zurich for urban planning. *PFG*, 88, 99–112. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2>

attraverso l'uso intelligente dei dati, migliorando la qualità della vita e ottimizzando i servizi pubblici.

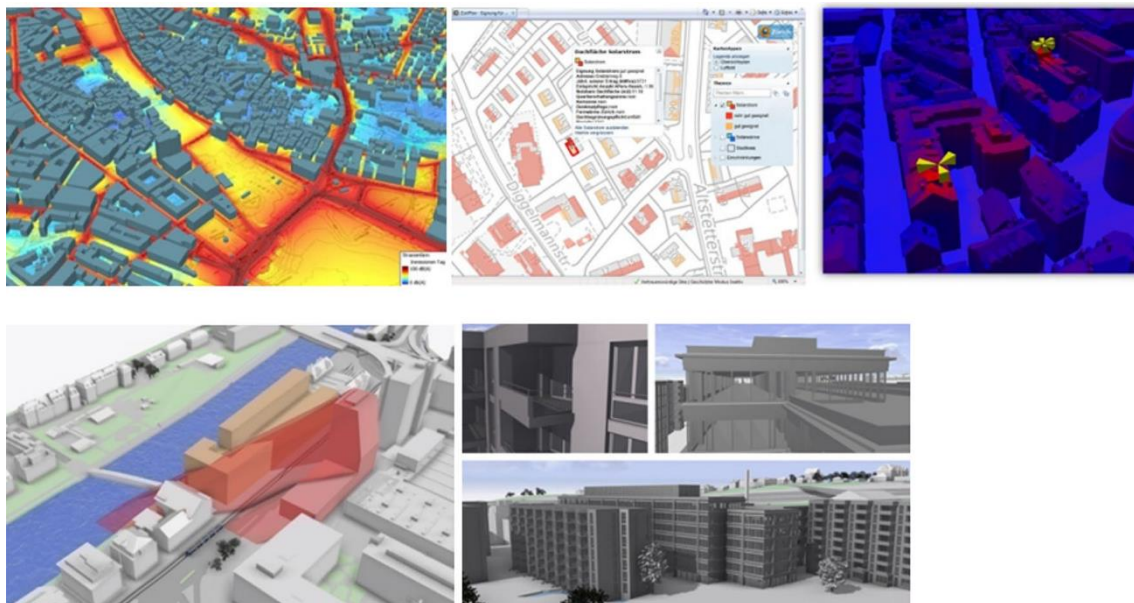
Il gemello digitale della città di Zurigo è una replica virtuale tridimensionale dell'ambiente urbano, progettata per supportare la pianificazione e la gestione dello sviluppo della città. Questo modello digitale integra dati spaziali 3D, aggiornati costantemente, e permette di simulare scenari futuri, analizzare l'impatto delle decisioni urbanistiche e migliorare la collaborazione tra amministrazione, cittadini e imprese. Questo strumento rappresenta un ponte tra le tecnologie di Building Information Modelling (metodo digitale per la progettazione, costruzione e gestione di edifici e infrastrutture che utilizza modelli 3D intelligenti per integrare dati e migliorare il processo decisionale) e i sistemi di informazione geografica (strumenti digitali che raccolgono, analizzano e visualizzano dati spaziali, permettendo di gestire e interpretare informazioni geo referenziate per pianificazione territoriale, analisi ambientali e gestione urbana) consentendo un approccio più integrato e dinamico.

Grazie alla sua capacità di visualizzazione avanzata e analisi predittiva, il modello digitale permette di: simulare l'impatto delle nuove costruzioni sul paesaggio urbano, sulla qualità della vita e sulle infrastrutture; prevedere gli effetti del cambiamento climatico valutando fenomeni come il riscaldamento urbano; supportare e facilitare il coordinamento tra le diverse autorità e l'implementazione di progetti infrastrutturali; coinvolgere attivamente la cittadinanza, offrendo strumenti interattivi per la partecipazione pubblica ai processi di pianificazione.

Spostandoci sull'aspetto giuridico, l'implementazione del gemello digitale di Zurigo è regolata da un solido quadro normativo che definisce standard e linee guida per la gestione e l'utilizzo dei dati spaziali 3D. Un elemento chiave di questa regolamentazione è la Legge Federale sulla Geoinformazione (GeoIG 2007), la quale stabilisce i principi per la raccolta, l'elaborazione e la diffusione dei dati geografici in Svizzera in perfetta conformità con la direttiva europea sull'Infrastruttura per l'Informazione Spaziale nella Comunità Europea (INSPIRE)<sup>51</sup>.

---

<sup>51</sup> Ivi.



*Figura 6:  
Le applicazioni consolidate comprendono l'analisi del rumore (in alto a sinistra), dell'inquinamento dell'aria (in alto al centro), delle radiazioni dei telefoni cellulari (in alto a destra), del potenziale solare (in basso a sinistra) e dei progetti di costruzione (in basso a destra).*

Entrando ora nello specifico delle applicazioni del DT a Zurigo, queste coprono una vasta gamma di settori. Nella Figura 6 vengono illustrate alcune delle applicazioni consolidate tramite l'utilizzo dell'Urban Digital Twin<sup>52</sup>.

Un esempio innovativo di utilizzo del gemello digitale è il videogioco “(re)format Z:”, sviluppato da Blindflug Studios. Questo progetto ha sfruttato il modello 3D della città per creare una versione distopica di Zurigo. Il gioco utilizza modelli dettagliati degli edifici storici più significativi, come il Grossmünster e il Fraumünster, ricostruiti fedelmente grazie ai dati open-source. Il successo dell'iniziativa con oltre 100.000 download ha dimostrato come il gemello digitale possa essere impiegato non solo nella pianificazione urbana, ma anche in applicazioni educative e culturali, promuovendo una nuova forma di interazione tra il patrimonio architettonico e il pubblico.

Un'altra applicazione rilevante è l'integrazione dell'UDT nei concorsi di architettura pubblici. In origine, questi concorsi si basavano su modelli fisici e presentazioni statiche, limitando le possibilità di visualizzazione e valutazione delle proposte progettuali.

<sup>52</sup> Ivi.

L'adozione del modello digitale ha rivoluzionato questo processo, consentendo alle giurie di visualizzare i progetti direttamente all'interno di una piattaforma interattiva 3D. In questo modo gli architetti possono inserire le loro proposte nel contesto urbano esistente, sovrapponendo i nuovi edifici alla città reale e simulandone l'impatto visivo e ambientale. Inoltre, l'uso della Realtà Aumentata (AR) permette di osservare le strutture in scala reale sul sito di costruzione, migliorando la comprensione della loro integrazione con l'ambiente circostante.

Un'ulteriore applicazione riguarda la pianificazione e gestione degli edifici alti. Con l'espansione della città, si è reso necessario uno strumento che permettesse di valutare l'integrazione armoniosa dei nuovi grattacieli con il tessuto urbano esistente. Il gemello digitale ha reso possibile la creazione di una piattaforma interattiva che consente agli urbanisti di visualizzare le costruzioni alte già esistenti e quelle in fase di progettazione, analizzandone l'impatto visivo e ambientale.

L'utilizzo innovativo del gemello digitale di Zurigo dimostra come la digitalizzazione possa migliorare la pianificazione urbana e la sostenibilità. Dall'intrattenimento alla gestione ambientale, passando per la progettazione architettonica e il coinvolgimento dei cittadini, il gemello digitale si conferma uno strumento versatile e strategico per il futuro della città.

## Conclusioni

L'analisi delle applicazioni dei Digital Twin nelle città condotta in questo capitolo ha evidenziato come questa tecnologia stia rivoluzionando la gestione urbana, migliorando la capacità di monitorare, pianificare e ottimizzare le città del futuro. A partire dal concetto di Smart City, passando attraverso l'evoluzione dei dati urbani e la creazione di Urban Digital Twin, fino ai casi studio delle città di Shanghai, Helsinki e Zurigo, si è dimostrato che il Digital Twin non è solo un modello virtuale, ma un potente strumento decisionale in grado di supportare lo sviluppo sostenibile e migliorare la qualità della vita urbana.

L'adozione su larga scala dei Gemelli Digitali Urbani è ormai una realtà in crescita. “Secondo una ricerca condotta dalla società Prescient & Strategic Intelligence nel loro

Digital Twin Market Research Report (settembre 2021), il mercato globale dei gemelli digitali ha generato un fatturato di 3,2 miliardi di dollari nel 2020 e si prevede che crescerà fino a 73 miliardi di dollari entro il 2030<sup>53</sup>. Questo trend sottolinea come i Digital Twin rappresentino un asset strategico per le città che vogliono essere più resilienti, efficienti e sostenibili.

I casi studio analizzati hanno dimostrato che ogni città implementa il Digital Twin con obiettivi specifici. Shanghai, una megalopoli con oltre 24 milioni di abitanti, ha sviluppato un gemello digitale estremamente dettagliato, capace di gestire la complessità urbana su larga scala e supportare il monitoraggio in tempo reale delle infrastrutture e della mobilità. Helsinki, invece, ha puntato su un approccio orientato alla sostenibilità ambientale, utilizzando il Digital Twin per simulare gli effetti del cambiamento climatico e ottimizzare l'efficienza energetica degli edifici. Infine, Zurigo ha sfruttato il suo gemello digitale per migliorare la pianificazione urbana, favorire la partecipazione cittadina e integrare strumenti di simulazione avanzati, applicandoli anche a settori innovativi come l'intrattenimento e i concorsi di architettura. L'importanza di investire nella ricerca e nello sviluppo dei Digital Twin non riguarda solo l'ottimizzazione tecnologica, ma anche la creazione di un approccio centrato sulle persone. Un'amministrazione cittadina non può limitarsi al concetto di efficienza digitale, ma deve considerare anche l'impatto di queste tecnologie sulla vita quotidiana dei cittadini, promuovendo una partecipazione attiva e garantendo trasparenza nelle decisioni pubbliche.

Guardando al futuro, il Digital Twin diventerà sempre più un pilastro della governance urbana, supportando i governi locali nel migliorare la vivibilità e la sostenibilità delle città. Tuttavia, è fondamentale che il suo sviluppo avvenga in maniera etica e inclusiva, evitando che la gestione algoritmica dei dati possa creare squilibri o discriminazioni sociali. Le città devono quindi adottare strategie che bilancino l'innovazione tecnologica con la protezione dei diritti dei cittadini, garantendo sicurezza, accessibilità e governance trasparente.

L'evoluzione tecnologica, e quindi anche quella dei Digital Twin, è un processo inarrestabile; le città che sapranno coglierne le opportunità avranno un vantaggio

---

<sup>53</sup> Myers, J., Larios, V., & Missikoff, O. (2023). Thriving smart cities. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 901–969). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_30)

competitivo nel rispondere alle sfide urbane del futuro. Come evidenziato in questo capitolo, la transizione dalle Smart City agli Urban Digital Twin è già in corso, e rappresenta il primo passo verso una nuova generazione di città intelligenti, in cui l'efficienza digitale e il benessere sociale coesistono armoniosamente.

Nel prossimo capitolo, verrà analizzato il progetto del Digital Twin per il Comune di Bologna, un esempio di applicazione di questa tecnologia in un contesto urbano italiano. Dopo aver esplorato le esperienze internazionali di metropoli, l'attenzione si sposterà dunque su un modello di gemello digitale sviluppato per una città di medie dimensioni, con esigenze e sfide specifiche legate al contesto italiano. Attraverso lo studio del caso di Bologna, verranno approfonditi gli obiettivi, le strategie di implementazione e le tecnologie adottate, evidenziando i benefici e le eventuali criticità legate all'integrazione del Digital Twin nella pianificazione urbana. Il confronto con le esperienze internazionali trattate in questo capitolo consentirà di identificare best practice e opportunità di sviluppo, delineando un quadro più ampio del potenziale dei Digital Twin nelle Smart City del futuro.

## Capitolo 3

# Il Gemello Digitale di Bologna

### Introduzione

Bologna è una città che da sempre coniuga storia, innovazione e partecipazione civica. Con una popolazione che sfiora il milione di abitanti nell'area metropolitana, il capoluogo emiliano si distingue per una grande comunità accademica, un solido tessuto economico e un'amministrazione pubblica che da anni investe in strategie di trasformazione urbana. Tuttavia, come molte altre grandi città europee, Bologna si trova ad affrontare sfide complesse legate alla mobilità, alla sostenibilità ambientale e alla gestione delle risorse urbane. In questo contesto, l'adozione di strumenti digitali avanzati si è rivelata una strada sempre più intrapresa per ottimizzare i processi decisionali e migliorare la qualità della vita dei cittadini.

Tra le innovazioni più promettenti in questo campo, proprio il Digital Twin sta acquisendo un ruolo prevalente nella pianificazione e nella gestione urbana. Grazie alla capacità di creare una replica virtuale della città basata su dati in tempo reale, il Digital Twin permette di analizzare scenari futuri, prevedere criticità e testare soluzioni prima della loro effettiva implementazione. La città di Bologna con la sua consolidata vocazione alla sperimentazione e alla ricerca, ha deciso di sviluppare un proprio modello di Digital Twin, con un approccio fortemente orientato alla dimensione civica e partecipativa. Il progetto del "Civic Digital Twin" di Bologna si distingue da altri modelli applicati nelle tradizionali smart cities, ponendo al centro non solo la digitalizzazione della città, ma anche il coinvolgimento attivo della cittadinanza nel processo decisionale. L'obiettivo non è limitarsi a una replica virtuale dello spazio urbano, ma costruire uno strumento che possa supportare amministratori, ricercatori e cittadini nella progettazione di politiche pubbliche più efficaci e inclusive. Con questa visione il gemello digitale civico non rappresenta solo una tecnologia innovativa, ma un vero e proprio strumento di governance, capace di ridefinire il rapporto tra istituzioni e comunità.

Il presente capitolo analizza nel dettaglio il progetto del Civic Digital Twin di Bologna,

esplorandone le caratteristiche distintive, il contesto in cui è nato e le sue future applicazioni. In particolare, verrà approfondita la visione politica e strategica alla base della sua realizzazione, evidenziando il ruolo centrale della governance civica. Successivamente, si esaminerà lo stato dell'arte e gli ambiti di applicazione, con particolare attenzione ai settori della mobilità, della pianificazione urbana e della gestione ambientale. Infine, verrà analizzato un caso specifico di utilizzo della tecnologia: il monitoraggio della Torre Garisenda, un esempio tangibile di come il Digital Twin possa essere impiegato nella tutela del patrimonio storico e nella prevenzione del rischio strutturale.

Attraverso questa analisi, si cercherà di comprendere in che modo Bologna stia costruendo un modello di Digital Twin innovativo, capace di coniugare tecnologia, partecipazione e sostenibilità. Se da un lato il progetto si presenta come una sfida ambiziosa, dall'altro offre un'interessante prospettiva sul futuro della gestione urbana e sul ruolo che i dati digitali potranno avere nelle trasformazioni delle città.

In chiusura una breve nota metodologica. Per la costruzione di questo capitolo ci si è anche appoggiati a un'intervista realizzata da chi scrive all'assessore all'urbanistica Raffaele Laudani, la cui delega al "Gemello digitale" e la cui carriera da docente universitario concentrata sull'analisi politica di fenomeni apparentemente esclusivamente tecnici, risulta particolarmente interessante e foriera di spunti. L'intervista completa all'assessore realizzata il 27 febbraio 2025 è annessa in fondo a questo elaborato.

### 3.1 "Civic Digital Twin": un modello civico tra innovazione e sfide

L'adozione del Digital Twin da parte di una determinata città non può essere considerata soltanto come un processo tecnico, ma richiede una riflessione più ampia sul modello di governance e sul ruolo che cittadini e istituzioni devono avere nella trasformazione digitale degli spazi urbani. Bologna ha scelto di sviluppare quello che ha significativamente deciso di chiamare un "Civic Digital Twin" (CDT), distinguendosi da altre esperienze internazionali per un approccio che integra la tecnologia con un forte coinvolgimento civico. Vale davvero la pena di dedicare spazio all'analisi di questa differenza.

Negli ultimi vent'anni, il concetto di "smart city" ha dominato il dibattito sulle città del

futuro. Questo modello, basato sulla raccolta e sull'analisi dei dati per ottimizzare la gestione urbana è stato promosso a livello internazionale come una strategia per rendere le città più efficienti e sostenibili. Tuttavia, come sottolineato dall'assessore comunale con delega al gemello digitale, Raffaele Laudani, questa visione ha spesso privilegiato una logica “tecno-centrica ed economico-centrica”, lasciando in secondo piano il ruolo attivo delle comunità locali<sup>54</sup>.

In molte metropoli a livello globale, come ad esempio Toronto, le smart cities o i gemelli digitali sono stati progettati principalmente da grandi aziende tecnologiche che hanno imposto infrastrutture e soluzioni standardizzate senza considerare le specificità dei singoli contesti urbani. Bologna si è gradualmente distaccata da questo paradigma, da un lato per gli attori coinvolti nell'implementazione del DT, dall'altro scegliendo di adottare il modello di “Città della Conoscenza”, che pone al centro la dimensione sociale e partecipativa della trasformazione digitale.

In primo luogo, dunque la proprietà. Bologna è una delle città pioniere a livello internazionale nello sviluppo del Gemello Digitale se non nel merito, almeno nel metodo: il DT bolognese infatti, a differenza di molti altri esempi nel mondo, è seguito e guidato da un consorzio pubblico. Il coordinamento strategico è affidato al Comune di Bologna, mentre la Fondazione Bruno Kessler assume il ruolo di coordinatore tecnico e project manager. L'Alma Mater Studiorum fornisce il supporto scientifico in qualità di manager scientifico, mentre Cineca è responsabile della piattaforma tecnologica e dell'integrazione dei dati come manager tecnologico. Infine, la Fondazione Innovazione Urbana Rusconi Ghigi si occupa del coinvolgimento della comunità in qualità di community manager, garantendo un processo di governance partecipata e inclusiva<sup>55</sup>. Questa collaborazione consente di sviluppare un modello che non sia solo innovativo dal punto di vista tecnologico, ma anche capace di garantire un elevato grado di affidabilità e indipendenza dai grandi colossi del settore tech.

---

<sup>54</sup> Intervista a Raffaele Laudani, Assessore del Comune di Bologna, realizzata in data 27/02/2025, via Google Meet. Trascrizione integrale disponibile in Appendice.

<sup>55</sup> Fondazione Innovazione Urbana. (2021). *Gemello digitale di Bologna*. <https://www.fondazioneinnovazionebologna.it/progetto/gemellodigitale>

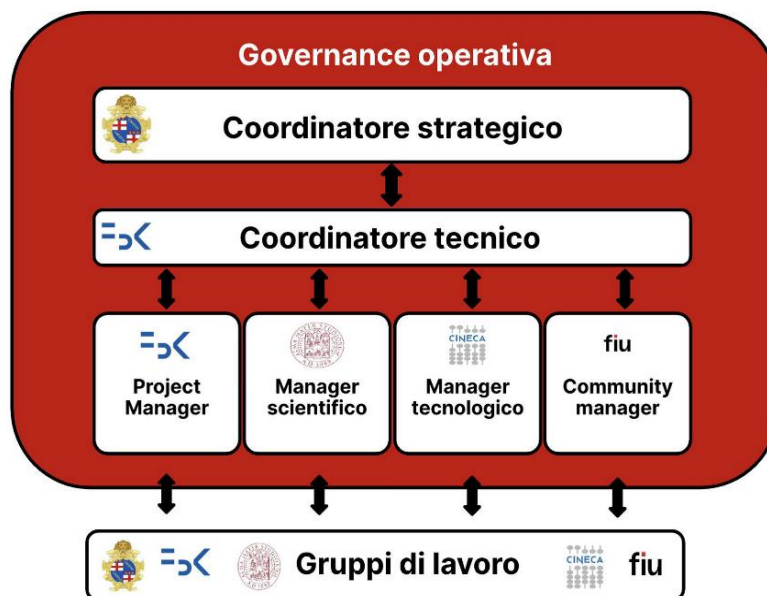


Figura 7: Struttura della governance operativa del progetto

In secondo luogo, e come parziale conseguenza di questo approccio “*public driven*”, il Digital Twin della città non è dunque concepito come uno strumento puramente tecnologico, ma come una piattaforma di conoscenza condivisa che permette ai cittadini di partecipare attivamente ai processi decisionali. L’amministrazione comunale ha quindi scelto di non affidarsi a soluzioni preconfezionate sviluppate da privati, ma di costruire il proprio Digital Twin attraverso una collaborazione con enti di ricerca e istituzioni pubbliche, garantendo trasparenza, accesso ai dati e indipendenza tecnologica<sup>56</sup>.

In altri termini, l’adozione di un “gemello digitale” non è stata intesa con neutralità: detta diversamente, non è stata interpretata come l’applicazione di una tecnologia amorfa, interpretabile soltanto attraverso la sua funzionalità. Al contrario, è stata colta la dimensione pienamente politica di una possibile tale applicazione e ha visto dunque l’amministrazione pubblica quale attore in campo pienamente coinvolto.

<sup>56</sup> Comune di Bologna. (2023). *Bologna avrà un Gemello digitale*. <https://www.comune.bologna.it/notizie/gemello-digitale>

L'elemento distintivo del Civic Digital Twin di Bologna è appunto la sua natura inclusiva e partecipativa. A differenza di altri progetti che si concentrano esclusivamente sulla modellazione digitale dello spazio urbano, il CDT bolognese mira a includere nel suo sistema anche le dinamiche sociali e comportamentali dei cittadini<sup>57</sup>. Questa scelta nasce dalla consapevolezza che le trasformazioni urbane non dipendono solo dalle infrastrutture fisiche, ma anche dall'interazione tra i diversi attori della città.

Un esempio concreto di questa visione è la possibilità di utilizzare il Digital Twin come strumento di simulazione e deliberazione democratica. I cittadini, attraverso interfacce digitali intuitive, possono visualizzare l'impatto di nuove politiche urbane e contribuire con proposte e feedback. Questo meccanismo non solo aumenta la trasparenza dell'amministrazione, ma aiuta anche a ridurre il divario tra istituzioni e comunità locali. L'assessore Laudani sottolinea proprio come il Digital Twin di Bologna non sia solo uno strumento di supporto alle decisioni amministrative, ma un'infrastruttura civica con un valore strategico per l'intera comunità: "Il nostro obiettivo è più ambizioso: immaginiamo il Gemello Digitale Urbano come una nuova infrastruttura civica della città." Tuttavia, una delle principali criticità riguarda la gestione dei dati urbani, che non possono essere trattati come una risorsa neutra. Infatti, il Digital Twin pone questioni fondamentali sulla governance dei dati e sulla protezione della privacy. "Parallelamente, ci muoviamo in un ambito ancora in fase di esplorazione, dove privacy, etica e controllo democratico diventano elementi fondamentali." Per evitare che i dati raccolti vengano utilizzati in modo opaco o diventino un asset per il settore privato, Bologna ha scelto un approccio pubblico e open data. Tuttavia, questa scelta non è priva di sfide, poiché richiede un costante equilibrio tra accessibilità, sicurezza e indipendenza tecnologica.

L'adozione di un modello basato sull'open data per il Digital Twin di Bologna rappresenta una scelta strategica per garantire trasparenza e accessibilità alle informazioni urbane. Ma non vanno appunto sottovalutate le possibili *empasse*. Uno dei principali limiti dell'open data è il già accennato rischio di sfruttamento da parte di attori privati. Se da un lato l'accessibilità ai dati consente una maggiore partecipazione e innovazione, dall'altro le grandi aziende tecnologiche potrebbero appropriarsi di queste informazioni per sviluppare servizi a scopo di lucro, senza che vi sia un reale ritorno per la collettività.

---

<sup>57</sup> Luca, M., Lepri, B., Gallotti, R., Paolazzi, S., Bigi, M., & Pistore, M. (2024). *Towards civic digital twins: Co-design the citizen-centric future of Bologna*. arXiv. <https://arxiv.org/pdf/2412.06328>

Le Big Tech cercano spesso di aggirare la governance pubblica dei dati attraverso accordi di data sharing, utilizzando poi strumenti legali come la segretezza commerciale per limitarne l'accesso<sup>58</sup>. Questo potrebbe portare a una situazione in cui le aziende beneficino dei dati aperti senza contribuire al loro mantenimento o miglioramento, creando un modello asimmetrico di estrazione del valore.

Proprio per questo motivo il sistema di governance dei dati urbani diventa un punto cruciale da attenzionare. Laudani evidenzia come, al momento, i sistemi di procurement comunale siano strutturati per l'assegnazione di servizi senza una regolamentazione chiara sulla proprietà e l'uso dei dati generati da quei servizi: "Attualmente, qualsiasi servizio viene assegnato tramite bando, ma spesso non si tiene conto dell'uso e della proprietà dei dati generati da quel servizio. Questo è un punto critico". È questa mancanza di una regolamentazione specifica nella contrattualizzazione dei servizi pubblici a porre dei rischi. Laudani sottolinea che questo tema sarà centrale nei prossimi bandi pubblici, soprattutto in settori strategici come la gestione dei trasporti e delle infrastrutture di telecomunicazione: "Quando nel prossimo mandato si procederà al rinnovo della gestione del trasporto pubblico, sarà fondamentale stabilire chiaramente a chi appartengono i dati prodotti dal sistema di trasporto, che sono enormi per quantità e valore".

Questa riflessione non si applica solo al trasporto pubblico, ma anche ad altri settori chiave della città. Ad esempio, negli accordi commerciali con operatori come TIM per la gestione delle infrastrutture di telecomunicazione, la governance dei dati non può più essere considerata un aspetto secondario, ma deve diventare una priorità politica e amministrativa. Se il Comune non stabilisce regole precise in fase di procurement, esiste il rischio che la proprietà e il controllo di informazioni strategiche passino sotto il controllo delle aziende fornitrici.

Oltre alla governance dei dati, un'altra sfida fondamentale è la loro protezione e sicurezza, soprattutto in un contesto in cui il Digital Twin raccoglie informazioni sensibili su larga scala. Sebbene il modello open data preveda forme di anonimizzazione e aggregazione delle informazioni, il rischio di re-identificazione rimane una sfida aperta, soprattutto quando i dataset sono combinati con altre fonti. La crescente digitalizzazione delle infrastrutture urbane aumenta la superficie di attacco per potenziali minacce informatiche,

---

<sup>58</sup> Fia, T. (2022). Resisting IP overexpansion: The case of trade secret protection of non-personal data. *IIC - International Review of Intellectual Property and Competition Law*, 53, 917–949. SSRN. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4123311>

come il data scraping da parte di aziende private o attacchi volti a manipolare i dati pubblici per influenzare le simulazioni del Digital Twin.

Per far fronte a queste sfide, il Comune di Bologna ha implementato misure avanzate di sicurezza informatica, con l'obiettivo di garantire la resilienza del CDT. Tra queste strategie rientrano l'utilizzo di algoritmi di crittografia per la protezione dei dati, la segmentazione delle reti per limitare l'accesso non autorizzato e lo sviluppo di un sistema di monitoraggio continuo delle minacce cyber. Inoltre, la collaborazione con Cineca e Fondazione Bruno Kessler ha permesso di integrare soluzioni avanzate di cybersecurity urbana, basate su modelli di analisi predittiva capaci di individuare vulnerabilità e possibili attacchi prima che possano verificarsi.

Nonostante queste precauzioni, la sicurezza informatica del Digital Twin rimane una delle sfide più complesse per il futuro della città. La crescente digitalizzazione delle infrastrutture urbane e l'aumento delle minacce informatiche a livello globale richiedono un aggiornamento continuo delle strategie di protezione e un rafforzamento della resilienza digitale. Il successo del progetto dipenderà anche dalla capacità dell'amministrazione di mantenere un equilibrio tra innovazione tecnologica, protezione dei dati e affidabilità dei sistemi informatici, garantendo che il Digital Twin non solo migliori la gestione urbana, ma lo faccia in modo sicuro e sostenibile nel lungo termine. Un'altra importante sfida riguarda la sostenibilità economica del progetto. Il Digital Twin di Bologna è stato avviato grazie a un finanziamento di 7 milioni di euro provenienti dai fondi europei PON Metro, ma la sua manutenzione e il suo sviluppo a lungo termine richiederanno ulteriori risorse<sup>59</sup>. Per garantire la continuità del progetto, il Comune sta esplorando diverse strategie di finanziamento, tra cui la collaborazione con istituzioni pubbliche e private e la partecipazione a bandi europei.

Infine, la riuscita del Digital Twin dipenderà dalla capacità dell'amministrazione di coinvolgere attivamente la cittadinanza. Se il sistema rimanesse uno strumento utilizzato solo dagli uffici tecnici comunali, perderebbe gran parte del suo valore innovativo. Per questo motivo, una delle priorità del progetto è lo sviluppo di strumenti di interazione intuitivi, che permettano ai cittadini di comprendere e utilizzare i dati in modo semplice

---

<sup>59</sup> Comune di Bologna. (2023). *Bologna avrà un Gemello digitale*. <https://www.comune.bologna.it/notizie/gemello-digitale>

ed efficace<sup>60</sup>.

Bologna è tra le prime città italiane a sviluppare un Digital Twin con una forte impronta civica. Questo la pone in una posizione di apripista per altri contesti urbani che intendono adottare modelli simili. L'amministrazione comunale sta già collaborando con altre città europee, come Barcellona e Amburgo, per condividere le proprie esperienze e sviluppare strategie comuni. Come evidenziato da Laudani, il futuro del Digital Twin di Bologna potrebbe vedere un'espansione delle sue funzionalità, integrando nuove tecnologie come l'intelligenza artificiale per l'analisi predittiva e la realtà aumentata per la visualizzazione dei dati urbani<sup>61</sup>. Inoltre, una delle prospettive più interessanti è l'applicazione del modello a livello regionale e nazionale, trasformando Bologna in un laboratorio di innovazione per la gestione urbana in Italia.

L'approccio civico adottato dalla città rappresenta un cambio di paradigma rispetto alle tradizionali smart cities e apre nuove possibilità per la creazione di città più democratiche, sostenibili e resilienti. Il Digital Twin non è solo una tecnologia, ma un'opportunità per ripensare il ruolo della conoscenza e dei dati nella costruzione del futuro urbano. Va proprio in questa direzione il modello pubblico e open data per il Civic Digital Twin bolognese. La questione della gestione dei dati, come detto, rappresenta un nodo politico centrale per il futuro del Digital Twin di Bologna. Secondo Laudani, "Il confronto con il settore privato è inevitabile e decisivo, ma è essenziale evitare che il controllo dei dati pubblici finisca in mano esclusivamente alle grandi aziende. [...] Se si affida tutto ai fornitori privati, non si avrà mai un Gemello Digitale autentico, perché ogni città è unica e deve costruire il proprio Digital Twin sulla base di criteri condivisi, ma adattati alle proprie specificità." Questo approccio rappresenta una sfida in termini di risorse e competenze, ma permette a Bologna di costruire un modello innovativo e replicabile, basato su una visione della tecnologia al servizio della comunità.

La crescente digitalizzazione delle città ha attirato l'attenzione delle Big Tech (come Google, Amazon, Microsoft e Meta), che vedono nei dati urbani una risorsa strategica per sviluppare nuovi servizi e consolidare il loro dominio nel settore delle smart cities. I dati generati dalle città rappresentano una delle "materie prime" più preziose del XXI secolo,

---

<sup>60</sup> Luca, M., Lepri, B., Gallotti, R., Paolazzi, S., Bigi, M., & Pistore, M. (2024). *Towards civic digital twins: Co-design the citizen-centric future of Bologna*. arXiv. <https://arxiv.org/pdf/2412.06328>

<sup>61</sup> Intervista a Raffaele Laudani, Assessore del Comune di Bologna, realizzata in data 27/02/2025, via Google Meet. Trascrizione integrale disponibile in Appendice.

poiché – intrecciati agli algoritmi più sofisticati – consentono di analizzare e prevedere il comportamento delle persone, ottimizzare la gestione urbana e sviluppare nuovi modelli di business basati su piattaforme digitali. Per questi motivi la loro gestione pone sfide cruciali di governance, privacy e sovranità digitale.

I dati raccolti dai comuni includono informazioni dettagliate su trasporti, mobilità, consumo energetico, inquinamento, servizi pubblici e comportamento dei cittadini. Se analizzati e integrati, questi dati consentono di ottenere una visione completa e predittiva della vita urbana, un asset di enorme valore sia per le amministrazioni pubbliche che per le aziende private.

Come ricorda Mattern, le città che non sviluppano autonomamente la loro infrastruttura digitale finiscono per diventare dipendenti da modelli di business privati, con il rischio che l'accesso ai dati urbani venga limitato e subordinato agli interessi delle aziende tecnologiche<sup>62</sup>. Questo fenomeno è particolarmente evidente nel caso delle piattaforme di gestione del traffico e della mobilità, dove molte città si affidano a software di aziende private (tipo Uber) senza avere pieno controllo sui dati raccolti. Se i dati urbani diventano di fatto un asset di valorizzazione delle Big Tech, le amministrazioni comunali rischiano di perdere la capacità di sviluppare politiche urbane autonome e basate su dati aperti. Per questo motivo, Bologna ha scelto di collaborare con enti pubblici di ricerca come CINECA e l'Università di Bologna, evitando di acquistare soluzioni proprietarie. Questa scelta consente di:

- Evitare la dipendenza tecnologica da software privati e mantenere il controllo sulle infrastrutture digitali.
- Garantire la trasparenza nella gestione dei dati urbani, evitando il rischio che vengano resi inaccessibili per ragioni di segretezza commerciale.
- Favorire la partecipazione attiva dei cittadini, offrendo loro strumenti per accedere ai dati urbani e contribuire al loro utilizzo per migliorare la città.

L'approccio di Bologna rappresenta quindi un modello alternativo per l'implementazione delle tecnologie digitali urbane, in contrasto con il paradigma dominante delle smart cities, spesso alla *mercé* di attori privati. Ciò non rappresenta un male di per sé. Piuttosto impone riflessioni serie sullo sfruttamento da parte di entità *for profit* di dati la cui proprietà dovrebbe essere pubblica o dei singoli utenti. La direzione intrapresa dal CDT

---

<sup>62</sup> Mattern, S. (2017). A city is not a computer. *Places Journal*. <https://doi.org/10.22269/170207>

bolognese sembra quanto meno porre rilevante attenzione verso questa criticità.

### 3.2 Ambiti di applicazione e sviluppo del Digital Twin di Bologna

L'Amministrazione comunale di Bologna ha posto il Digital Twin al centro della propria strategia di innovazione urbana con l'obiettivo di costruire una città più inclusiva, sostenibile e tecnologicamente avanzata. Come affermato nel documento programmatico del Comune: "L'Amministrazione è impegnata nella sfida di portare Bologna ad essere la città più progressista d'Italia, per migliorare la vita delle sue cittadine e cittadini, contribuire allo sviluppo dell'area metropolitana e promuovere un modello alternativo di città in grado di contribuire all'individuazione di risposte alle sfide economiche, sociali e ambientali"<sup>63</sup>.

Il Civic Digital Twin è considerato uno strumento fondamentale per realizzare questa visione, permettendo di simulare e prevedere scenari futuri, migliorando l'efficacia delle politiche urbane. Il Digital Twin di Bologna è dunque concepito come un'infrastruttura civica capace di offrire benefici a diversi settori della gestione urbana. Uno degli aspetti più innovativi del progetto è la sua capacità di integrare dati provenienti da fonti diverse per prevedere scenari futuri e supportare decisioni più efficaci. Di seguito vengono presentati i principali ambiti di applicazione:

- Mobilità urbana: uno dei principali ambiti di applicazione del Digital Twin è la mobilità urbana, che rappresenta una delle sfide più complesse per le città contemporanee. Bologna ha adottato una serie di misure per migliorare il trasporto pubblico e ridurre il traffico veicolare privato con l'obiettivo di rendere la città più vivibile e sostenibile. Il Digital Twin permette di simulare diversi scenari di mobilità, valutando l'impatto delle politiche di regolamentazione del traffico in termini di riduzione delle emissioni e di accessibilità urbana. Un esempio pratico è l'utilizzo del Digital Twin per comprendere l'impatto delle normative sulla limitazione del traffico nei centri urbani. In molte città, misure come le zone a traffico limitato (ZTL) hanno portato a una riduzione significativa delle emissioni, ma hanno anche generato effetti collaterali sul commercio locale e sulla mobilità

---

<sup>63</sup> Comune di Bologna. (2023). *Bologna avrà un Gemello digitale*. <https://www.comune.bologna.it/notizie/gemello-digitale>

di alcune fasce di popolazione. Attraverso l'integrazione di modelli predittivi e dati in tempo reale, Bologna potrà testare le diverse configurazioni della ZTL, valutando le possibili conseguenze prima di implementare nuove normative<sup>64</sup>. Oltre alla gestione del traffico il Digital Twin sarà impiegato per supportare progetti come la bicipolitana e il potenziamento della rete tranviaria. La piattaforma consentirà di prevedere come i nuovi percorsi ciclabili influenzeranno il flusso del traffico, verificando se l'infrastruttura esistente sarà in grado di sostenere un aumento significativo della mobilità dolce. Questo approccio basato su dati permetterà di ottimizzare la progettazione urbana e migliorare l'integrazione tra i vari sistemi di trasporto. Il Digital Twin di Bologna si basa su un'ampia varietà di dati, che provengono sia da fonti pubbliche che private. Come spiega Laudani, "Al momento le principali fonti di dati provengono dal patrimonio informativo del Comune di Bologna, che è molto vasto e rappresenta un elemento di forte interesse per il progetto". Inoltre, sono state avviate collaborazioni con soggetti privati, come Hera per i dati ambientali e Unipol per la mobilità, garantendo che queste informazioni vengano utilizzate nell'interesse collettivo. Non si tratta solo di estrarre dati esistenti, ma anche di generare nuove informazioni attraverso simulazioni avanzate. Questo consente di analizzare scenari futuri e testare politiche pubbliche in modo predittivo, prima di implementarle concretamente.

- Gestione ambientale ed energetica: il Digital Twin permetterà di monitorare la qualità dell'aria, l'efficienza energetica degli edifici e il consumo di risorse (come abbiamo già visto per la città di Helsinki nel capitolo precedente). Attraverso simulazioni, il Comune potrà pianificare interventi per migliorare l'efficienza energetica degli edifici pubblici e ridurre l'impatto ambientale delle infrastrutture. Ad esempio, l'integrazione di dati meteorologici e modelli climatici permetterà di prevedere i livelli di inquinamento atmosferico e valutare l'efficacia di misure come la riduzione del traffico nelle giornate con alta concentrazione di PM10. Inoltre, grazie all'utilizzo di algoritmi di machine learning, sarà possibile identificare trend di consumo energetico negli edifici pubblici, suggerendo

---

<sup>64</sup> Luca, M., Lepri, B., Gallotti, R., Paolazzi, S., Bigi, M., & Pistore, M. (2024). *Towards civic digital twins: Co-design the citizen-centric future of Bologna*. arXiv. <https://arxiv.org/pdf/2412.06328>

strategie per migliorare l'efficienza e ridurre gli sprechi. In particolare, questi algoritmi potranno analizzare dati storici e in tempo reale per individuare anomalie nei consumi, adattando dinamicamente le regolazioni degli impianti di riscaldamento e raffrescamento in base a variabili climatiche e al reale utilizzo degli spazi. Ciò consentirà di minimizzare gli sprechi energetici senza compromettere il comfort degli utenti. L'analisi predittiva basata sul machine learning sarà fondamentale anche per la gestione ambientale su scala urbana. Attraverso la raccolta e l'elaborazione di dati provenienti da sensori IoT distribuiti in tutta la città, il Digital Twin sarà in grado di monitorare in tempo reale la qualità dell'aria e prevedere episodi di inquinamento atmosferico, suggerendo misure di mitigazione tempestive. "L'analisi predittiva è una delle sfide più avanzate che stiamo affrontando nel nostro Digital Twin – afferma Laudani –, perché ci permette non solo di gestire la città in modo più efficiente, ma anche di anticipare problemi e adottare soluzioni prima che si verifichino". Un esempio concreto di applicazione è lo sviluppo di modelli predittivi per la gestione del traffico in funzione della qualità dell'aria. Questi algoritmi potranno suggerire in tempo reale restrizioni della circolazione in caso di superamento di determinate soglie, oppure ottimizzare i flussi veicolari per ridurre le emissioni nelle aree più critiche. Inoltre, il machine learning sarà impiegato per ottimizzare la distribuzione dell'energia nei quartieri, integrando dati su condizioni meteorologiche, domanda energetica e prestazioni degli edifici, contribuendo a rendere Bologna una città più sostenibile e resiliente<sup>65</sup>.

- Pianificazione urbana e gestione delle emergenze: Il Digital Twin è uno strumento essenziale per la pianificazione urbana poiché consente di valutare l'impatto di nuovi progetti edilizi e infrastrutturali prima della loro realizzazione. È intenzione del comune utilizzare la piattaforma per supportare il Piano dei Quartieri (programma strategico di interventi per migliorare servizi, infrastrutture e spazi pubblici in ogni quartiere, basato sulla partecipazione cittadina) fornendo modelli dettagliati su come le modifiche allo spazio urbano influenzeranno il tessuto sociale e i servizi disponibili. Per quanto riguarda invece, la gestione del rischio

---

<sup>65</sup> Comune di Bologna. (2023). *Bologna avrà un Gemello digitale*. <https://www.comune.bologna.it/notizie/gemello-digitale>

idrogeologico e climatico, l'integrazione di modelli digitali con i dati storici sulle alluvioni e i livelli delle falde acquifere consentirà di prevedere situazioni di emergenza e pianificare interventi preventivi più efficaci<sup>66</sup>.

Nonostante i vantaggi offerti dal Digital Twin, il progetto presenta anche delle problematiche. Una delle principali riguarda la gestione e l'archiviazione dei dati, poiché la quantità di informazioni esistenti con l'aggiunta di quelle successivamente raccolte, sarà enorme e richiederà infrastrutture digitali avanzate per essere processata ed elaborata. Un altro problema riguarda la necessità di garantire l'accessibilità e l'interoperabilità dei modelli digitali, affinché possano essere utilizzati non solo dagli esperti, ma anche da enti pubblici, ricercatori e restauratori.

Per affrontare queste problematiche, Bologna sta collaborando con il Centro Nazionale di High-Performance Computing (HPC), Big Data e Quantum Computing, con l'obiettivo di sviluppare una piattaforma in grado di gestire e condividere in modo efficiente le informazioni relative ai Digital Twin urbani<sup>67</sup>.

Come indicato ancora una volta da Laudani, l'obiettivo finale è trasformare Bologna in un "laboratorio" urbano in cui il gemello digitale non sia solo uno strumento tecnico per la gestione amministrativa, ma una piattaforma aperta e condivisa, accessibile anche agli stakeholder locali e agli enti di ricerca<sup>68</sup>.

L'adozione del Digital Twin rappresenta un'occasione unica per ridefinire il ruolo di Bologna nel panorama nazionale e internazionale. Come riportato nei documenti programmatici, questa infrastruttura non è solo un'opportunità per migliorare i servizi urbani, ma anche per rafforzare la posizione della città come punto di riferimento per l'innovazione digitale. Attraverso il Digital Twin bolognese verrà dato un forte contributo allo sviluppo della Data Valley e alla partecipazione attiva ai network di città europee che stanno sperimentando tecnologie simili.

A livello nazionale, il "modello bolognese" potrebbe diventare un punto di riferimento per altre città italiane che intendono implementare infrastrutture digitali avanzate. A livello internazionale, la collaborazione con realtà come Barcellona e Amburgo permetterà di condividere esperienze e adottare soluzioni innovative comuni. Questo

---

<sup>66</sup> Ivi.

<sup>67</sup> Ivi.

<sup>68</sup> Intervista a Raffaele Laudani, Assessore del Comune di Bologna, realizzata in data 27/02/2025, via Google Meet. Trascrizione integrale disponibile in Appendice.

approccio definito “municipalista” punta a costruire un sistema di Digital Twin interoperabili tra città diverse, creando una rete di conoscenza condivisa per la gestione urbana<sup>69</sup>.

Per quanto riguarda invece lo sviluppo vero e proprio del gemello digitale di Bologna, verrà seguito un percorso strutturato in più fasi, che porterà alla realizzazione completa della piattaforma entro il 2026. Il progetto si articola in tre momenti principali<sup>70</sup>:

- Fase 1 (Inception): acquisizione delle informazioni sul contesto urbano, definizione delle modalità di coinvolgimento della cittadinanza e dei modelli concettuali che guideranno le fasi successive.
- Fase 2 (Analisi, Ricerca e Sviluppo, Valutazione): suddivisa in tre cicli annuali, questa fase prevede lo sviluppo graduale degli elementi tecnologici, metodologici, legali e organizzativi. Ogni ciclo si concentra su casi d’uso specifici, con obiettivi incrementali e mirati.
- Fase 3 (Transizione): consolidamento dei risultati ottenuti, con l’obiettivo di rendere il Digital Twin un’infrastruttura sostenibile dal punto di vista tecnologico, economico e organizzativo.

Il completamento del progetto rappresenterà una svolta nella gestione della città fornendo un modello scalabile e replicabile che potrà essere adottato anche in altre realtà urbane. L’integrazione del Digital Twin con le nuove tecnologie emergenti, come l’intelligenza artificiale e l’analisi predittiva, renderà Bologna una delle prime città in Italia a utilizzare dati digitali per orientare politiche urbane.

### 3.3 Il caso della Torre Garisenda: un Digital Twin per il patrimonio storico

L’applicazione del gemello digitale non si limita a gli ambiti visti sopra, ma si estende anche alla tutela del patrimonio storico. Bologna, città caratterizzata da un’architettura medievale unica, sta sperimentando questa tecnologia per monitorare e preservare uno dei suoi monumenti più iconici: la Torre Garisenda.

---

<sup>69</sup> Comune di Bologna. (2023). *Bologna avrà un Gemello digitale*. <https://www.comune.bologna.it/notizie/gemello-digitale>

<sup>70</sup> Ivi.

Negli ultimi anni la Torre Garisenda ha mostrato segni di instabilità strutturale destando preoccupazione tra gli esperti e la cittadinanza. Una soluzione a questo problema, basata sui dati, è stata intrapresa dal Comune di Bologna, il quale ha avviato una collaborazione con il Cineca, l'Università di Bologna e NVIDIA, sviluppando un gemello digitale della torre. Questo progetto si inserisce all'interno di una strategia più ampia per digitalizzare il patrimonio architettonico della città, con l'obiettivo di prevenire crolli e migliorare la pianificazione degli interventi di restauro<sup>71</sup>.

Il Digital Twin della Torre Garisenda si sta realizzando grazie all'integrazione di tecniche avanzate di modellazione 3D, intelligenza artificiale e simulazioni predittive: utilizzando sensori installati sulla struttura, il sistema raccoglie in tempo reale dati relativi a vibrazioni, inclinazione, temperatura e umidità, creando una replica digitale dinamica della torre. Questo modello virtuale permette agli ingegneri e agli esperti di patrimonio storico di analizzare il comportamento strutturale della torre in diverse condizioni ambientali. Per merito della potenza di calcolo del Cineca e all'uso della piattaforma NVIDIA Omniverse sarà possibile simulare scenari di rischio, come terremoti, variazioni climatiche estreme o ulteriori cedimenti strutturali. Queste simulazioni aiutano a comprendere come la torre potrebbe reagire nel tempo, fornendo indicazioni fondamentali per la progettazione di interventi di consolidamento.

Come si può vedere nella Figura 7, il Digital Twin della Torre Garisenda offre una rappresentazione dettagliata della struttura, permettendo di visualizzare i punti critici e le zone più vulnerabili. Questa tecnologia consente inoltre di testare virtualmente diverse soluzioni di restauro (come per qualsiasi altro prodotto con replica virtuale), riducendo il margine di errore e ottimizzando l'efficacia degli interventi.

Laudani, nella sua intervista, evidenzia che “grazie al Gemello Digitale, sarà possibile raccogliere e analizzare dati in modo costante, prevedere eventuali criticità e intervenire in maniera più tempestiva e mirata, garantendo così una gestione più efficiente e sicura del patrimonio storico della città”. L'esperienza della Torre Garisenda dimostra come i Digital Twin possano rivoluzionare anche il settore della conservazione del patrimonio storico. Il progetto della Torre Garisenda è destinato a diventare un modello di riferimento per la conservazione digitale del patrimonio storico a livello internazionale.

---

<sup>71</sup> Comune di Bologna. (2024). *Comune e Cineca insieme a NVIDIA per sviluppare il gemello digitale della Torre Garisenda*. <https://www.comune.bologna.it/notizie/gemello-digitale-torre-garisenda>

L'amministrazione comunale, appunto, ha già espresso l'intenzione di estendere questa tecnologia ad altri monumenti della città, creando un archivio digitale del patrimonio architettonico bolognese<sup>72</sup>.



*Figura 8: Il gemello digitale della Torre Garisenda con cerchiaggio e tralicci*

## Conclusioni

L'integrazione del Civic Digital Twin nella gestione urbana di Bologna rappresenta una svolta significativa nel modo in cui le città possono utilizzare le tecnologie digitali per migliorare i servizi e la qualità della vita dei cittadini. Questo progetto ambizioso è il risultato di una stretta collaborazione tra istituzioni pubbliche, enti di ricerca e la comunità, dimostrando che l'innovazione tecnologica può essere impiegata non solo per ottimizzare l'amministrazione, ma anche per rafforzare la partecipazione e il dialogo tra istituzioni e la cittadinanza.

---

<sup>72</sup> Ivi.

Se il progetto seguirà con successo la roadmap prevista, Bologna potrebbe affermarsi come un modello di riferimento per altre città italiane ed europee. Questo dimostrerebbe che il CDT non è soltanto un avanzamento tecnologico, ma uno strumento concreto di partecipazione democratica nella governance urbana. A differenza di altri Urban Digital Twin sviluppati a livello internazionale con un approccio prevalentemente orientato all'ottimizzazione economica, il CDT bolognese spicca per la sua capacità di coinvolgere attivamente la cittadinanza: basandosi su dati pubblici e garantendo un elevato livello di tutela della privacy, questo modello offre un'alternativa innovativa che unisce trasformazione digitale e inclusione sociale.

Bologna si distingue come pioniera in questo campo grazie alla sua tradizione come “città della conoscenza”. Come ricorda ancora una volta Laudani, l'approccio adottato non prevede l'acquisto di “soluzioni preconfezionate”, ma la costruzione di un sistema su misura per le esigenze specifiche della città. Questa scelta implica una maggiore indipendenza tecnologica, rappresentando una forma di democrazia nel contesto contemporaneo. La possibilità di sviluppare internamente strumenti digitali consente a Bologna di mantenere il controllo sui propri dati e sulle proprie infrastrutture, promuovendo una sovranità tecnologica che è fondamentale in un'epoca dominata dalle grandi piattaforme globali.

Un esempio concreto di come il gemello digitale civico potrà essere utilizzato per promuovere la partecipazione attiva è rappresentato dal “Bilancio Partecipativo”: questo strumento di democrazia diretta permette ai cittadini di segnalare, ideare e votare proposte per migliorare gli spazi pubblici del proprio quartiere. Nell'edizione 2023 del “Bilancio Partecipativo”, sono stati raccolti 19.327 voti, il numero più alto mai raggiunto nelle quattro edizioni svolte finora, con 43 progetti proposti dai cittadini e dalle cittadine. L'integrazione del CDT in questo processo potrebbe ampliare le possibilità di coinvolgimento, offrendo simulazioni e visualizzazioni dei progetti, facilitando una comprensione più approfondita delle proposte e dei loro impatti sul territorio.

Dunque, il gemello digitale rappresenta uno strumento attraverso il quale la cittadinanza diventa potenzialmente protagonista del cambiamento, ammesso che esso sia implementato con certi crismi. Non si tratta solo di una tecnologia per la gestione efficiente della città, ma di un mezzo per promuovere una governance partecipativa e inclusiva. Bologna, con la sua tradizione di innovazione e partecipazione civica, sta

dimostrando come le tecnologie digitali possano essere utilizzate per costruire una città più equa, sostenibile e democratica.

# Conclusioni

La presente tesi si è posta l'obiettivo di analizzare il ruolo dei Digital Twin nella gestione urbana dando particolare risalto al caso del Civic Digital Twin di Bologna. Attraverso un percorso articolato in tre capitoli, lo studio ha indagato le basi teoriche di questa tecnologia, le sue applicazioni a casi urbani di alcune città estere e, infine, la sua peculiare implementazione in un contesto urbano italiano come quello di Bologna. L'obiettivo principale era da un lato comprendere se e in che modo questa innovazione potesse rappresentare una svolta per la governance delle città, migliorandone l'efficienza e la sostenibilità; dall'altro lato, l'enfasi sul modello bolognese voleva mostrare come il taglio politico che si può dare a questa tecnologia possa declinare anche una maggiore partecipazione civica e un più intenso coinvolgimento della cittadinanza.

I casi presentati e indagati hanno consentito di evidenziare come il Digital Twin rappresenti una tecnologia disruptive, capace di trasformare radicalmente il modo in cui le città vengono progettate, monitorate e amministrate. A partire dall'analisi teorica del primo capitolo, è emerso che il Digital Twin non è una semplice simulazione digitale, ma un ecosistema dinamico che integra dati in tempo reale per supportare decisioni basate su evidenze concrete. Il confronto poi con le esperienze di Shanghai, Helsinki e Zurigo ha mostrato come questa tecnologia possa essere concepita in modi diversi a seconda delle priorità di ciascun contesto urbano: dalla gestione della mobilità alla sostenibilità ambientale.

Un elemento centrale di questa ricerca è stato il confronto tra il concetto di Smart City e quello di Civic Digital Twin. Sebbene entrambe le strategie siano volte a migliorare la qualità della vita urbana attraverso l'uso delle tecnologie digitali, le loro implicazioni e metodologie di implementazione differiscono in modo sostanziale. Il modello delle Smart Cities, infatti, è spesso basato su un approccio tecnocratico ed economicamente orientato, dove l'ottimizzazione dei servizi è guidata da grandi aziende tecnologiche. Il concetto di Civic Digital Twin, invece, introduce una visione più complessa e integrata, in cui la città non è solo un insieme di dati da ottimizzare, ma un sistema dinamico in cui le variabili ambientali, sociali ed economiche sono interconnesse tra loro. Questo aspetto è

particolarmente interessante nel caso di Bologna, la quale – nelle parole del suo assessore all’urbanistica e delegato al gemello digitale – ha scelto di definirsi come “Città della Conoscenza” piuttosto che come Smart City, enfatizzando un modello di sviluppo basato sulla partecipazione, sulla ricerca scientifica e sulla costruzione di una conoscenza condivisa tra amministrazione e cittadini.

Il caso studio di Bologna ha rappresentato un elemento centrale della ricerca, permettendo di osservare un approccio del tutto peculiare a questa tecnologia. Da questo lavoro è emerso che il Civic Digital Twin bolognese si distingue per il suo approccio partecipativo, che mira a coinvolgere attivamente la cittadinanza nella definizione delle politiche urbane. A differenza di altri modelli, in altri termini, il progetto bolognese si configura come uno strumento di governance condivisa, capace di favorire una maggiore trasparenza e inclusione nei processi decisionali.

Un aspetto critico, spesso sottovalutato nel dibattito sui Digital Twin, riguarda la gestione e la proprietà dei dati. L’autrice Shoshana Zuboff, nel suo libro “Il capitalismo della sorveglianza”, evidenzia come l’uso massivo di dati digitali possa portare a una concentrazione di potere nelle mani di poche grandi aziende con il rischio che le tecnologie emergenti vengano utilizzate per fini di controllo e manipolazione, piuttosto che per migliorare la qualità della vita dei cittadini. Questo tema è particolarmente rilevante nell’implementazione dei Digital Twin poiché la raccolta e l’analisi dei dati urbani devono essere bilanciate da un quadro di governance chiaro che garantisca la trasparenza e la tutela della privacy. Il Civic Digital Twin di Bologna si distingue proprio per la volontà di costruire un’infrastruttura tecnologica aperta, indipendente e gestita in collaborazione con enti di ricerca pubblici, evitando di delegare interamente la gestione dei dati a soggetti privati. A ulteriore supporto di queste riflessioni, in appendice alla tesi è riportata l’intervista integrale all’Assessore Raffaele Laudani. Le sue dichiarazioni hanno offerto una prospettiva istituzionale sulle strategie di implementazione del progetto, confermando la volontà dell’amministrazione di utilizzare questa tecnologia non solo per ottimizzare i servizi urbani, ma anche per rafforzare la partecipazione e la governance condivisa della città.

Oltre a rappresentare un significativo approfondimento accademico, l’argomento trattato in questa tesi ha avuto un impatto rilevante anche sul piano personale e professionale.

L'opportunità di studiare in dettaglio il Civic Digital Twin di Bologna ha arricchito il mio bagaglio di conoscenze, fornendomi strumenti essenziali per comprendere il futuro della gestione urbana e dell'innovazione amministrativa. Questo percorso di ricerca non si esaurisce con la stesura della tesi, ma si configura come un tassello fondamentale per il mio futuro, sia in ambito professionale che per l'attuale ruolo di rappresentanza istituzionale che svolgo nel Comune di Bologna. La trasformazione digitale delle città è una sfida cruciale per il prossimo decennio e attraverso questa esperienza ho potuto approfondire le dinamiche che guidano questo cambiamento, con la consapevolezza che l'innovazione deve sempre essere accompagnata da una visione inclusiva e sostenibile.

## Appendice

Di seguito è riportata la trascrizione dell'intervista realizzata con Raffaele Laudani, assessore all'urbanistica del Comune di Bologna, con delega al progetto del Gemello Digitale. L'intervista, condotta il 27 febbraio 2025, si inserisce nell'analisi dell'implementazione del Civic Digital Twin bolognese, approfondita nel Capitolo 3.

Attraverso questa conversazione, l'assessore Laudani offre una riflessione critica sulle potenzialità e le sfide dell'applicazione del Digital Twin nel contesto urbano, evidenziando il ruolo della governance pubblica dei dati, le implicazioni politiche e sociali della digitalizzazione della città e il rapporto tra innovazione tecnologica e partecipazione cittadina.

Segue la trascrizione integrale dell'intervista.

**Si parla di Digital Twin collegati alle “smart cities”. Bologna può essere definita smart city o come più recentemente si legge su diversi articoli “città della conoscenza”? qual è la differenza?**

Questo è un tema molto politico. Da molti anni nutriamo alcune perplessità sul paradigma delle Smart Cities. Si tratta di un concetto legato ai processi di digitalizzazione delle città da almeno 15-20 anni, ma riteniamo che non abbia prodotto risultati significativi. Il motivo principale è che alla base di questa idea c'è una filosofia tecno-centrica ed economico-centrica, che presuppone che l'implementazione di nuove tecnologie generi automaticamente effetti positivi. In realtà, da un lato, i risultati concreti sono stati limitati, mentre dall'altro, in alcuni casi, questo approccio ha esposto eccessivamente le città agli investimenti privati, con il rischio che il modello delle Smart Cities si trasformi in un ulteriore strumento del capitalismo estrattivo, che si sta sviluppando e riorganizzando proprio attraverso la digitalizzazione e le piattaforme.

Un esempio emblematico è il caso di Toronto, dove alcuni anni fa Google aveva investito ingenti capitali per realizzare una vera e propria Smart City. Tuttavia, dopo circa un anno

e mezzo, ha ritirato tutti i fondi, rendendosi conto che il progetto non era praticabile. Il problema principale? Mancava la città, mancavano le persone. Senza le persone, una Smart City non può funzionare.

Questo principio è fondamentale anche per il Gemello Digitale: non ha senso se rappresenta solo lo spazio fisico della città, perché la città è fatta soprattutto di persone, relazioni e dinamiche sociali. Se non si tiene conto di questa dimensione, il modello fallisce. Per questo motivo, noi preferiamo parlare di città della conoscenza. Anche il nostro Gemello Digitale si sta sviluppando in questa direzione: sarà un progetto che probabilmente richiederà più tempo e sarà più complesso, ma il nostro obiettivo è realizzare un Gemello Digitale civico, in cui le persone non sono solo oggetto, ma anche protagoniste dell'impatto che esso avrà.

Questa visione del Gemello Digitale rientra all'interno di ciò che definiamo politiche della conoscenza: un approccio che integra le trasformazioni fisiche della città con politiche di empowerment, promozione e abilitazione dei cittadini, oltre alla capacità di attrarre investimenti nel settore della ricerca. Il Gemello Digitale non è solo uno strumento innovativo, ma rappresenta una strategia e un dispositivo di governo della rivoluzione digitale nella nostra città.

Lei ha ragione nel dire che ovunque si legge ancora il termine Smart City, ma Bologna non adotta più questo concetto. Se ne parlava dieci anni fa, ed è ancora presente nelle politiche dell'Unione Europea, che continua a ispirare le sue principali linee di finanziamento a questo paradigma. Tuttavia, noi crediamo che sia necessario un salto evolutivo verso una concezione più integrata in cui la dimensione tecnologica ed economica sia solo una parte di una riorganizzazione più ampia delle città.

In questa prospettiva, è fondamentale che la città e le amministrazioni comunali siano protagoniste del processo. Se invece si affida tutto ai fornitori privati che sviluppano servizi e prodotti standardizzati, non si avrà mai un Gemello Digitale autentico, perché ogni città è unica e deve costruire il proprio Gemello Digitale sulla base di criteri e parametri condivisi, ma adattati alle proprie specificità.

Noi, ad esempio, stiamo dialogando con altre città, anche a livello internazionale, ma crediamo fermamente che un vero Gemello Digitale urbano debba avere come protagonista principale la città stessa. Solo successivamente si potranno coinvolgere partner privati. Se invece la logica resta quella di acquistare un prodotto preconfezionato, si ricade inevitabilmente nel modello delle Smart Cities, che, a nostro avviso, è già superato, sebbene continui a influenzare le politiche di infrastrutturazione digitale dell'Unione Europea.

**Quali sono gli obiettivi principali che si pone il Digital Twin di Bologna? A che punto siamo col progetto? Ci sono particolari collaborazioni con università, aziende private o altri enti pubblici?**

L'obiettivo principale del Gemello Digitale di Bologna è realizzare un gemello digitale civico. Non vogliamo semplicemente dotare l'amministrazione comunale di uno strumento per migliorare la gestione delle politiche urbane, sebbene questo sia un livello basilare del progetto. Il nostro obiettivo è più ambizioso: immaginiamo il Gemello Digitale Urbano come una nuova infrastruttura civica della città.

Questa infrastruttura non deve essere solo uno strumento del Comune, ma qualcosa che appartenga all'intera città, intesa come sistema composto da istituzioni pubbliche, attori privati, cittadini e altre realtà del territorio. Per questo motivo, abbiamo scelto di non acquistare un pacchetto preconfezionato da aziende private, che pure offrono prodotti di alta qualità. Questi strumenti, per quanto validi, sono spesso standardizzati e vengono semplicemente adattati alla città, senza essere realmente costruiti con la città e per la città. Inoltre, affidarsi a soluzioni proprietarie significherebbe rimanere vincolati alle aziende fornitrici, generando una dipendenza tecnologica che riteniamo poco adatta a un'infrastruttura civica e democratica.

Un altro aspetto fondamentale è che, attualmente, anche le città che hanno già sviluppato gemelli digitali urbani riconoscono che siamo ancora in una fase di ricerca di frontiera, soprattutto per quanto riguarda le capacità di analisi predittiva. Oggi, queste funzionalità sono ancora molto limitate e la tecnologia sta evolvendo rapidamente. Tuttavia, per

sviluppare davvero un Gemello Digitale Urbano, serve il coinvolgimento diretto della città. Per questo motivo, abbiamo deciso di trasformare Bologna in un vero e proprio laboratorio di ricerca.

Per farlo, collaboriamo con partner di ricerca di alto livello, come l'Università di Bologna, il CINECA e la Fondazione Bruno Kessler. Parallelamente, stiamo avviando interlocuzioni con partner privati, ma sempre in un'ottica di partnership sperimentale, non di semplice fornitura di servizi. Non ci interessa acquistare soluzioni preconfezionate, bensì costruire collaborazioni strategiche per sviluppare insieme nuove tecnologie.

### **Quali fonti di dati e quali tecnologie vengono utilizzate per costruire e mantenere aggiornato il gemello digitale di Bologna?**

Al momento le principali fonti di dati provengono dal patrimonio informativo del Comune di Bologna, che è molto vasto e rappresenta un elemento di forte interesse per il progetto. Questo ci rende un partner appetibile sia per soggetti privati che per centri di ricerca internazionali, poiché oggi non ci sono molte città che si mettono a disposizione per sperimentare nuove soluzioni in questo ambito.

Abbiamo già avviato alcune collaborazioni sperimentali, come quella con Hera, basata sui dati prodotti dalla multiutility. In questo contesto, le società partecipate sono risorse strategiche, poiché dispongono di infrastrutture diffuse sul territorio e se i loro dati vengono considerati non solo come asset aziendali, ma anche come strumenti al servizio della comunità, possono offrire un contributo fondamentale. Un altro esempio è la collaborazione con Unipol che sta mettendo a disposizione le sue scatole nere per sperimentazioni legate alla mobilità.

Per quanto riguarda la tecnologia, il team di lavoro sta sviluppando direttamente la piattaforma alla base del Gemello Digitale. Anche in questo caso, abbiamo scelto di creare una soluzione nostra piuttosto che affidarci a software proprietari. Il primo anno e mezzo di lavoro è stato dedicato principalmente alla costruzione dell'infrastruttura, con il supporto della Fondazione Bruno Kessler e del CINECA.

**Chi sono oggi i competitors di un digital twin pubblico? L'amministrazione pubblica trova più difficoltà nel superare l'idea di privacy del cittadino o gareggiare contro colossi del Big Data sulla proprietà dei dati?**

Più che avere veri e propri competitor nel campo dei Gemelli Digitali, il tema centrale è il modo in cui concepiamo questa tecnologia. Se, come dicevamo, il Gemello Digitale è un'infrastruttura civica e democratica, allora diventa parte fondamentale di un nuovo modello di governance dei dati. In questo contesto, le dinamiche del capitalismo estrattivo nelle città assumono un ruolo cruciale e impongono un ripensamento profondo delle politiche di gestione dei dati.

Un aspetto chiave è la necessità di riformare il sistema di procurement comunale. Attualmente, qualsiasi servizio viene assegnato tramite bando, ma spesso non si tiene conto dell'uso e della proprietà dei dati generati da quel servizio. Questo è un punto critico. Ad esempio, quando nel prossimo mandato si procederà al rinnovo della gestione del trasporto pubblico, sarà fondamentale stabilire chiaramente a chi appartengono i dati prodotti dal sistema di trasporto, che sono enormi per quantità e valore.

Lo stesso vale per altri settori: quando il Comune stipula accordi commerciali con aziende come TIM per la gestione delle infrastrutture di telecomunicazione, il tema della governance dei dati deve essere centrale. È evidente che il confronto con il settore privato sia inevitabile e decisivo, ma è essenziale evitare che il controllo dei dati pubblici finisca in mano esclusivamente alle grandi aziende.

Parallelamente, ci muoviamo in un ambito ancora in fase di esplorazione, dove privacy, etica e controllo democratico diventano elementi fondamentali. Questo pone una doppia sfida per l'amministrazione pubblica: da un lato, normative troppo rigide sulla privacy possono ostacolare lo sviluppo del Gemello Digitale; dall'altro, se non si garantisce un adeguato livello di trasparenza e controllo democratico, il Gemello Digitale rischia di non essere più un'infrastruttura civica inclusiva.

Questi sono nodi cruciali su cui stiamo lavorando, con il contributo dell'Università di Bologna, che rappresenta un'eccellenza internazionale nel campo della governance dei

dati. In particolare, il lavoro della professoressa Giusella Finocchiaro è un punto di riferimento importante per affrontare queste sfide.

**Ci sono già esempi concreti di decisioni prese grazie a questa tecnologia? Come visto per altre città, il Digital Twin può essere anche uno strumento di partecipazione attiva. Bologna ha previsto modalità per coinvolgere i cittadini nelle decisioni urbane attraverso questa tecnologia?**

Al momento, non siamo ancora arrivati a una fase in cui il Gemello Digitale viene utilizzato in modo sistematico per prendere decisioni urbane. È importante sottolineare, però, che non esiste un momento preciso in cui il Comune “ha” o “non ha” un Gemello Digitale finito. Un Gemello Digitale non è una copia statica della città, ma un sistema in continua evoluzione che cresce e si sviluppa insieme alla città stessa.

Il processo inizia nel momento in cui il Comune decide di dotarsi di un Gemello Digitale, ma si tratta di un percorso tendenzialmente senza fine. Al momento, non siamo ancora nella fase in cui le decisioni amministrative vengono prese in maniera consapevole, strutturata e sistematica grazie al Gemello Digitale, se non in casi molto specifici. Tuttavia, alcuni strumenti già adottati rientreranno progressivamente all’interno del sistema del Gemello Digitale. Un esempio concreto è rappresentato dai cruscotti e dai sistemi di raccolta dati della Protezione Civile, che si sono rivelati estremamente utili durante la gestione delle alluvioni. Possiamo già considerarlo un Gemello Digitale in senso stretto? Probabilmente no, ma rappresenta un tassello fondamentale di un percorso in cui l’amministrazione comunale sta adottando un approccio sempre più basato sui dati e sulla loro analisi per prendere decisioni più informate ed efficaci.

Per quanto riguarda la partecipazione attiva, questo aspetto per noi è fondamentale. Non si tratta solo di prevedere delle modalità per coinvolgere i cittadini, ma di costruire un progetto in cui i cittadini siano al centro fin dall’inizio. Stiamo immaginando una piattaforma di Gemello Digitale che renda trasparente l’intero processo decisionale, permettendo ai cittadini non solo di accedere alle informazioni, ma anche di contribuire attivamente allo sviluppo, al miglioramento e all’evoluzione dello strumento stesso. Un

modello simile a quello degli open-source developers, in cui la comunità può partecipare in modo concreto alla crescita del progetto.

Attualmente, stiamo sviluppando questo approccio all'interno del Centro Nazionale sull'High Performance Computing (HPC), dove il Comune di Bologna, attraverso la Fondazione Innovazione Urbana, ha visto il Gemello Digitale di Bologna riconosciuto come progetto pilota nazionale. L'intero progetto è costruito sulla base di un modello civico, che mira a garantire una governance democratica e partecipata della città digitale.

**Bologna è tra le prime grandi città italiane a implementare un Digital Twin su larga scala. Secondo lei, il “modello bolognese” può essere pioniere italiano di questa nuova rivoluzione tecnologica per altre città?**

Stiamo sviluppando il Gemello Digitale di Bologna partendo da un presupposto fondamentale: una città come Bologna, con la sua storia, i suoi valori e i suoi principi, non può che portare con sé questa identità anche nel modo in cui realizza il proprio Gemello Digitale. Bologna ha sempre avuto un ruolo di anticipatrice di soluzioni innovative, con un'attenzione particolare alla dimensione civica, alla democrazia partecipativa e al coinvolgimento attivo dei cittadini. L'innovazione, qui, è sempre stata pensata per le persone, mettendole al centro come protagoniste del cambiamento. Ed è proprio questa visione che stiamo cercando di trasferire nel nostro Gemello Digitale. Stiamo notando un crescente interesse da parte di altre città, che guardano al nostro lavoro per prendere spunto e ispirazione. Questo potrebbe portare alla definizione di un vero e proprio “modello bolognese”? Non lo so, ma quello che ci interessa è portare avanti un progetto coerente con i valori e gli obiettivi di questa città.

L'indirizzo politico che ci siamo dati in questo mandato è quello di rendere Bologna la città più progressista d'Italia, quindi anche nel campo della trasformazione digitale. Sappiamo che il nostro approccio è complesso e pieno di difficoltà, ma vediamo che sta suscitando grande interesse. Avremmo potuto scegliere la strada più semplice, acquistando un prodotto preconfezionato, ma abbiamo preferito un percorso più ambizioso, che fosse veramente civico, inclusivo e innovativo.

**Una notizia degli ultimi mesi è l'utilizzo di un Digital Twin per la Garisenda. Quali sono i principali vantaggi di questa tecnologia nella conservazione e monitoraggio della torre?**

L'emergenza legata alla Torre Garisenda ha inevitabilmente concentrato molti sforzi su questo tema, attirando al contempo grande interesse anche da parte di attori esterni. Ad esempio, abbiamo ricevuto la disponibilità di NVIDIA a collaborare con noi per la creazione di un Gemello Digitale della torre, con l'obiettivo di migliorare il sistema di monitoraggio e analisi strutturale. Questo lavoro è attualmente portato avanti dall'assessorato dei lavori pubblici, in collaborazione con il CINECA e un team di esperti dell'Università di Bologna, coordinati dal professor Francesco Ubertini, ex Rettore dell'Alma Mater che oggi è anche Presidente del CINECA e ingegnere civile, sta guidando il progetto, lavorando in stretto contatto con i nostri uffici tecnici.

I vantaggi di questa tecnologia sono moltissimi, anche se non necessariamente immediati. Dal punto di vista degli interventi per la messa in sicurezza e il restauro, il Gemello Digitale potrebbe non avere un impatto diretto e immediato. Tuttavia, per il monitoraggio strutturale a lungo termine e la conservazione della torre, questa tecnologia sarà uno strumento fondamentale.

Grazie al Gemello Digitale, sarà possibile raccogliere e analizzare dati in modo costante, prevedere eventuali criticità e intervenire in maniera più tempestiva e mirata, garantendo così una gestione più efficiente e sicura del patrimonio storico della città.

# Ringraziamenti

Questa tesi non è solo il frutto di studio e impegno, ma anche di tutte le persone che mi hanno accompagnato lungo questo percorso, sostenendomi nei momenti difficili e condividendo con me le soddisfazioni più belle.

Il primo ringraziamento va al Professore Mattia Frapporti, il quale ha accettato di essere il relatore della mia tesi. Mi ha accompagnato lungo tutto questo lavoro con dedizione, competenza e una pazienza infinita. Ho iniziato il mio percorso universitario da casa nel 2020, in piena pandemia, tra incertezze e schermate di Teams e lo concludo con un professore che mi ha dato tantissimo, sia dal punto di vista accademico che umano. Aver avuto una guida come lui in questo ultimo miglio ha fatto la differenza, e per questo, la mia gratitudine per il supporto ricevuto non sarà mai abbastanza.

Un enorme grazie all'Assessore Raffaele Laudani per l'intervista concessa. Poter inserire nella mia tesi un confronto diretto con chi, nel mio comune, si occupa proprio di questo argomento è stato un privilegio unico. La sua disponibilità e la sua visione hanno dato un valore aggiunto inestimabile al mio lavoro.

La tesi è il traguardo di questi anni, ma non sarei mai arrivato fino a qui senza le persone che hanno reso possibile tutto questo.

Grazie alla mia famiglia, che non mi ha mai fatto mancare nulla, sostenendomi in ogni scelta e insegnandomi che con impegno e dedizione si possono raggiungere grandi risultati. Manuela, Daniele e Giorgia, siete il mio punto di riferimento più grande. Un grazie speciale ai miei nonni, ai miei zii e a tutta la mia famiglia, perché l'affetto e il supporto che mi avete sempre dimostrato valgono più di qualsiasi altra cosa.

Grazie di cuore ai miei amici più importanti, quelli che hanno condiviso con me ogni momento, dalle soddisfazioni più grandi alle difficoltà che sembravano insormontabili. Sono stati il mio sostegno, la spinta nei momenti di incertezza e la compagnia che ha reso questo percorso più leggero e speciale. Senza di loro, tutto questo avrebbe avuto un sapore diverso.

Grazie a tutte le persone che mi hanno ispirato in questa prima parte di vita. Ho avuto la fortuna di incontrare esempi straordinari che mi hanno spinto a guardare sempre un po' più in alto, ad alzare sempre di più l'asticella, a non accontentarmi e a seguire le mie passioni.

Posso dire con certezza di essere una persona fortunata, perché vivo una vita meravigliosa circondato da persone straordinarie. E con questa consapevolezza, sono pronto a ricominciare un nuovo percorso universitario, con l'entusiasmo di chi sa che il meglio deve ancora venire.

Grazie di cuore a tutti.

# Bibliografia

- Blanchet, M. (2023). The dimension of markets for the digital twin. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 65-96). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_3)
- Comune di Bologna. (2023). *Bologna avrà un Gemello digitale*. <https://www.comune.bologna.it/notizie/gemello-digitale>
- Comune di Bologna. (2024). *Comune e Cineca insieme a NVIDIA per sviluppare il gemello digitale della Torre Garisenda*. <https://www.comune.bologna.it/notizie/gemello-digitale-torre-garisenda>
- Crespi, N., Drobot, A. T., & Minerva, R. (2023). The digital twin: What and why?. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 3-20). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_1)
- Fia, T. (2022). Resisting IP overexpansion: The case of trade secret protection of non-personal data. *IIC - International Review of Intellectual Property and Competition Law*, 53, 917–949. SSRN. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4123311>
- Fondazione Innovazione Urbana. (2021). *Gemello digitale di Bologna*. <https://www.fondazioneinnovazioneurbana.it/progetto/gemellodigitale>
- Fortino, G., & Savaglio, C. (2023). Integration of digital twins & Internet of Things. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 205-225). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_8)
- Grieves, M. (2023). Digital twins: Past, present, and future. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 97-121). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4)
- Harisova, E. (2020). 51 World created a digital twin of entire Shanghai. *80.lv*. <https://www.80.lv/articles/51-world-created-a-digital-twin-of-entire-shanghai/>
- Hämäläinen, M. (2021). Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city. *IET Smart Cities*, 3, e12015. <https://doi.org/10.1049/smc2.12015>
- Heiskanen, A. (2019). Helsinki is building a digital twin of the city. *AEC Business*. <https://aec-business.com/helsinki-is-building-a-digital-twin-of-the-city/>

- Ivanov, S., Nikolskaia, K., Radchenko, G., Sokolinsky, L., & Zymbler, M. (2020). Digital twin of city: Concept overview. In *Proceedings of the 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)* (pp. 178–186). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GloSIC50886.2020.9267879>
- Kane, G., Phillips, A., Copulsky, J., & Andrus, G. (2019). *The technology fallacy: How people are the real key to digital transformation*. MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/11661.001.0001>
- Kovacs, E., & Mori, K. (2023). Digital twin architecture – An introduction. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 125–151). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_5)
- Lawton, G. (2022). Helsinki’s pioneering city digital twin. *VentureBeat*. <https://venturebeat.com/ai/helsinki-pioneering-city-digital-twin/>
- Luca, M., Lepri, B., Gallotti, R., Paolazzi, S., Bigi, M., & Pistore, M. (2024). Towards civic digital twins: Co-design the citizen-centric future of Bologna. *arXiv*. <https://arxiv.org/pdf/2412.06328>
- Mattern, S. (2017). A city is not a computer. *Places Journal*. <https://doi.org/10.22269/170207>
- Minerva, R., Crespi, N., Farahbakhsh, R., & Awan, F. (2023). Artificial intelligence and the digital twin: An essential combination. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 299–336). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_12)
- Myers, J., Larios, V., & Missikoff, O. (2023). Thriving smart cities. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 901–969). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_30)
- Schmitt, L., & Copps, D. (2023). The business of digital twins. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Eds.), *The digital twin* (pp. 21–63). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_2)
- Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The digital twin of the city of Zurich for urban planning. *PFG*, 88, 99–112. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2>
- Shahat, E., Hyun, C. T., & Yeom, C. (2021). City digital twin potentials: A review and research agenda. *Sustainability*, 13(6), 3386. <https://doi.org/10.3390/su13063386>

- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Zhu, Y. (2022). Shanghai harnessing ‘digital twin’ technology to improve city management. *Shine News*. <https://www.shine.cn/news/metro/2202151932>
- Zhu, Y. (2022). Virtual twin platforms: A bridge to city's future. *Shine News*. <https://www.shine.cn/news/metro/2203082846>
- Zuboff, S. (2019). *Il capitalismo della sorveglianza*. Luiss.