



UNIVERSITÀ DI PISA

DIPARTIMENTO DI
FILOLOGIA, LETTERATURA E LINGUISTICA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN INFORMATICA UMANISTICA

**Digital Twin: un organismo informazionale
per riprogettare la realtà**

Candidato: *Beatrice Rosi*

Relatore: *Luca De Biase*

Anno accademico 2020/2021

Abstract: In un periodo in cui la sostenibilità è al centro di molte problematiche e la tecnologia continua ad innovarsi, le politiche europee uniscono le due situazioni per un unico scopo: creare una società e un'industria che sappiano usare al meglio le moderne tecnologie. In questo quadro, il Digital Twin potrebbe essere utile a raggiungere gli obiettivi della futura Società 5.0 e Industria 5.0. Esso è la rappresentazione digitale in tempo reale di un oggetto fisico, di un processo, oppure di un intero sistema, e la sua potenza dipende dalle altre tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0. Grazie alle ultime innovazioni, infatti, il Digital Twin è capace di modellare, simulare e prevedere aspetti relativi alla controparte fisica a cui fa riferimento. Ciò comporta un continuo sviluppo in diversi settori, arrivando a replicare digitalmente città e, a breve, anche la Terra. Su queste basi ci si domanda se inserire il Digital Twin tra le tecnologie che permettono lo sviluppo della NextGenerationEU sia solo un'utopia o se effettivamente possa aiutare a raggiungere obiettivi sostenibili.

Tag: digitaltwin, stateofart, sustainability, inclusivity, city, earth, technology, industry5.0, nextgenerationeu

Indice

Indice	3
1 Introduzione	5
2 Digital Twin	7
2.1.1 Houston, we had a problem	7
2.1.2 Evoluzione del Digital Twin.....	8
2.2 Tecnologie	12
2.2.1 Tecnologie relative ai dati	13
2.2.2 Tecnologie di modellazione	13
2.2.3 Tecnologie di simulazione	14
2.2.4 Digital Model, Digital Shadow e Digital Twin	14
2.3 Vantaggi	16
3 Il contesto industriale e sociale	18
3.1 Industria 4.0.....	18
3.1.1 Excursus storico	19
3.1.2 Tecnologie abilitanti	21
3.2 L'Industria 5.0	24
3.2.1 Tre punti cardine	25
3.3 La Società 5.0.....	28
3.4 NextGenerationEU	30
4 Sviluppi del Digital Twin.....	32
4.1.1 Analisi sui recenti sviluppi	33
4.2 Il futuro del Digital Twin.....	36
5 Le città.....	38
5.1 Smart City	39
5.2 Smart City e Digital Twin	41
5.2.1 Rilevamento e mappatura	42
5.2.2 BIM.....	43
5.2.3 Internet of Things	44

6	<i>Esempi di Digital Twin urbani</i>	46
6.1	Singapore	47
6.1.1	Funzionalità di Virtual Singapore.....	49
6.2	Zurigo	51
6.2.1	Open Data.....	55
6.3	Le applicazioni di Virtual Zurigo	56
6.3.1	Piano di sviluppo comunale.....	57
6.3.2	Pianificazione dei grattacieli	58
6.3.3	Clima urbano	58
6.3.4	Concorsi di architettura	59
6.3.5	Partecipazione digitale	61
6.4	Helsinki	63
6.4.1	Condividere i Twin Models come Open Data	64
6.4.2	I Twin Models come piattaforma di sviluppo smart	65
6.5	I progetti sostenibili di Kalasatama	67
6.5.1	Simulazione del vento	67
6.5.2	Studio del sole	70
7	<i>Settore manifatturiero</i>	74
7.1	Applicazioni e ricerche	74
8	<i>DestinationEarth</i>	78
8.1	Obiettivi	80
8.2	Sfide	81
8.3	Ipotesi	82
9	<i>Conclusioni</i>	84
9.1	Il ruolo dell'Informatica Umanistica	86
9.2	Sviluppi futuri	86
	<i>Bibliografia & Sitografia</i>	88

1 Introduzione

Al giorno d'oggi le tecnologie sono parte integrante della società e il confine tra digitale e realtà sta diventando sempre più labile. In questo contesto sociale le moderne innovazioni tecnologiche aiutano a superare le sfide che preoccupano maggiormente le politiche europee. Nella società e nell'industria del futuro, pianificare e costruire in un'ottica sostenibile rimane uno dei punti più essenziali da realizzare.

Il Digital Twin si può considerare la tecnologia più vicina ad annullare il confine tra mondo reale e mondo virtuale, grazie alla sua capacità di rappresentare digitalmente in tempo reale un oggetto fisico, un processo, oppure un intero sistema. Per poter funzionare il Digital Twin ha bisogno del massimo che le altre tecnologie digitali possano offrire: estrema capacità di calcolo, connessioni veloci, enorme disponibilità di dati, sensoristica avanzata e ottimi modelli. La potenza che queste tecnologie devono dimostrare è direttamente proporzionale allo scopo del Digital Twin: si può andare dal Digital Twin di una macchina industriale a quello di un'intera filiera produttiva. Il concetto di Digital Twin a sua volta evolve con la potenza degli strumenti che lo rendono possibile: dalla prima presentazione di Grieves del 2003, in cui si descrivevano solamente due parti (entità fisica e virtuale) e la loro connessione, alle molteplici definizioni di oggi che continuano ad evolversi seguendo il passo dell'Intelligenza Artificiale, della quantità dei dati e della qualità delle simulazioni.

Questa tesi cerca di rispondere a una domanda: può il Digital Twin essere al servizio di una frontiera della tecnologia che consentirà di

affrontare le sfide attuali, programmate, in primis, dalle politiche europee?

Quest'ultime vedono nelle tecnologie digitali una via di salvezza di fronte a questioni d'emergenza, come il cambiamento climatico, l'urbanizzazione, i disastri ambientali e l'uso eccessivo di risorse energetiche. Per superare queste sfide, potrebbe essere d'aiuto riuscire a gestire città e fabbriche in modo più intelligente oppure poter prevedere i disastri ambientali sulla Terra attraverso una replica digitale del pianeta in continuo aggiornamento.

Per dare una risposta alla domanda, sono stati presi in considerazione tre scenari: il settore urbano, quello manifatturiero e il caso di DestinationEarth. Per ciascuno di essi, è stata fatta una selezione di ricerche e/o applicazioni che potrebbero dare una risposta alla domanda, sopradescritta.

Infatti, se il Digital Twin risultasse innovativo in quei contesti che più toccano tali questioni d'emergenza, allora si potrebbe affermare la sua importanza come tecnologia che risponde alle richieste *dell'Industria 5.0* e della *NextGenerationEU*.

2 Digital Twin

Il termine *Digital Twin* fu usato per la prima volta nel 2003 da Micheal Grieves, docente dell'Università del Michigan, che introdusse il concetto durante il suo corso di studi sul *Product Lifecycle Management*¹.

La struttura del Digital Twin, descritta approssimativamente da Grieves, era composta da uno spazio reale, uno spazio virtuale, e i collegamenti per i flussi di dati e informazioni fra questi due spazi e i relativi sottospazi. Tuttavia, l'idea di avere dei gemelli digitali di un prodotto fisico non è così recente.

2.1.1 Houston, we had a problem

Il 13 aprile del 1970 uno dei tre astronauti impegnati nella missione Apollo 13, vide flettersi lo scafo dell'astronave in cui viaggiava. Lanciò subito un allarme verso la base terrestre, pronunciando la frase "Houston, we had a problem" diventata poi iconica negli anni successivi. Un'esplosione aveva danneggiato i serbatoi di ossigeno lasciandolo fuoriuscire nello spazio².

Durante i preparativi della missione, quindici simulatori addestrarono astronauti e tecnici in vista delle missioni e delle molteplici eventualità di fallimento. Questo salvò la vita dell'equipaggio dell'Apollo 13 e fu di fatto la prima applicazione di un modello che successivamente verrà definito *Digital Twin*. L'obiettivo della National Aeronautics and Space Administration³ era quello di far funzionare, mantenere e riparare i sistemi fisici mentre erano nello spazio. Il successo nell'applicazione di un

¹ Un corso incentrato sulla gestione dell'intero ciclo di vita di un prodotto.

² (NASA, *50 Years Ago: "Houston, We've Had a Problem"*)

³ NASA

modello di questo tipo ha portato la NASA a sviluppare Digital Twin più avanzati per le missioni successive⁴.

Nel 2010 il concetto di Digital Twin è stato rivisitato dalla NASA in una *Roadmap*⁵, che ha definito il Digital Twin come una simulazione multidisciplinare, senza considerare la connessione in tempo reale con l'oggetto fisico⁶.

2.1.2 Evoluzione del Digital Twin

A partire dalla concettualizzazione della NASA, diversi ricercatori si sono interessati a dare una definizione e una struttura al Digital Twin, concentrandosi sulla mappatura dinamica e bidirezionale tra oggetto fisico e modello virtuale di quest'ultimo. Tra questi ricercatori, alcuni hanno trattato di Digital Twin come di una simulazione particolare, basata sulle conoscenze degli esperti e dei dati in *real-time* raccolti dalla controparte fisica, per realizzare una simulazione più accurata in diverse scale di tempo e di spazio⁷.

La differenza sostanziale tra una simulazione e un Digital Twin è che la prima si può considerare la fase iniziale di un Digital Twin, al quale successivamente si implementeranno i dati in real-time. Con l'aggiornarsi delle informazioni raccolte e analizzate, anche il Digital Twin si aggiorna a sua volta e si ottengono risultati che non sarebbero disponibili con una simulazione statica⁸.

Dal 2016 è stato proposto un nuovo concetto di Digital Twin, che prende il nome di *Experimentable Digital Twins* e che non mira a replicare

⁴ (McKie, 2017).

⁵ Un corso che riguardava il piano di sviluppo di un nuovo prodotto.

⁶ (Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences, *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles | 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*).

⁷ (Gabor et al. 2016, pp. 374-379; Weyer et al. 2016, vol. 49, pp. 97-102)

⁸ (Boschert and Rosen 2016, pp. 59-74).

digitalmente singoli prodotti, bensì processi e sistemi. A seguire, questo concetto è stato approfondito considerando i vantaggi della combinazione di Digital Twin con una delle tecnologie abilitanti dell'*Industria 4.0*, ovvero l'*Internet of Things*⁹ ¹⁰. Da questo momento si sono sviluppate diverse definizioni, ma l'idea di base del Digital Twin è comune in tutte: collegare l'oggetto fisico e il modello digitale in modo accurato e in tempo reale. Tuttavia, è difficile definire l'architettura del concetto. Sono stati proposti alcuni modelli concettuali di Digital Twin.

Partendo dalla diapositiva *Conceptual Ideal for PLM* (Figura 1), il modello tridimensionale, portato avanti da Grieves, consisteva in due parti che sarebbero state collegate durante l'intero ciclo di vita del sistema¹¹.

Conceptual Ideal for PLM

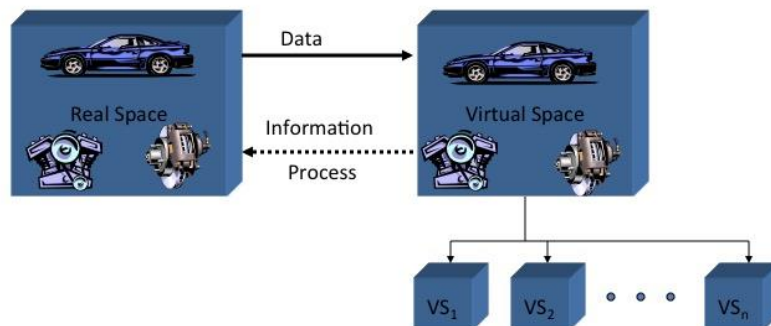


Figura 1 Diapositiva del Dr. Grieves all'Università di Michigan¹².

⁹ Si tratta di tutti quegli strumenti e applicazioni che permettono non solo il dialogo fra uomo e macchina, ma anche quello diretto fra oggetti. (Enciclopedia Treccani, *Internet of Things*).

¹⁰ (Madni et al. 2019, vol.7).

¹¹ (Grieves 2016).

¹² (Grieves 2016, p.1)

Con lo sviluppo delle tecnologie, tale modello tridimensionale è stato superato da quello in 5D, che è attualmente il più utilizzato (Figura 2). Quest'ultimo è basato sulla formula:

$$MDT = (PE, VM, Ss, DD, CN).$$

Dove *PE* sta per entità fisica, *VM* modello virtuale, *Ss* servizi sia per *PE* che per *VM*, *DD* i dati del Digital Twin, e *CN* connessioni. La parte fisica è la controparte reale del modello virtuale, il quale supporta la simulazione, il processo decisionale e il controllo della parte fisica. I dati sono al centro del Digital Twin, poiché sono una preconditione per creare nuova conoscenza. I servizi si potrebbero definire come la traduzione delle funzioni fornite dal Digital Twin (come la valutazione, la previsione, la verifica) in modo comprensibile e fruibile a tutti. Infine, le connessioni uniscono tutte le parti tra di loro¹³.

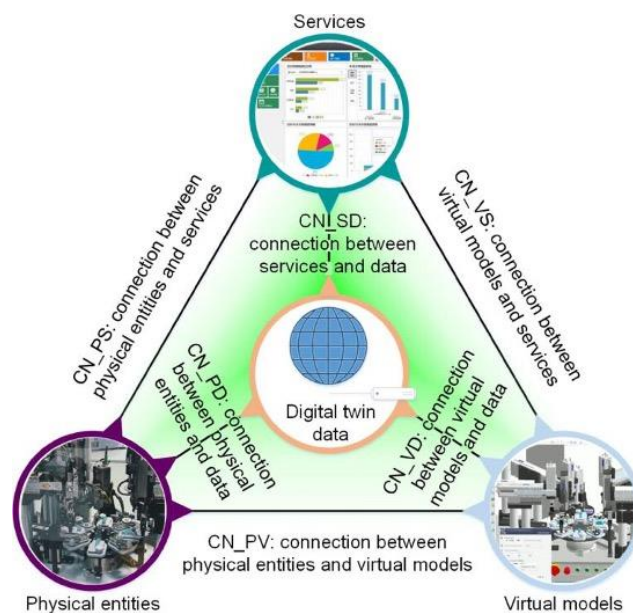


Figura 2 Digital Twin secondo il modello 5D¹⁴.

¹³ (Tao and Zhang 2017, vol. 5, pp. 20418-20427).

¹⁴ (Ibidem).

Il più recente *Digital Twin 8-dimension model* (Figura 3), invece, è costituito da otto dimensioni: quattro che si concentrano sul contesto e l'ambiente Digital Twin, e quattro sul comportamento e sulle capacità¹⁵.

In sintesi, l'area delle prime quattro dimensioni riguarda: l'ampiezza di integrazione, le modalità di connessione, la frequenza di aggiornamento e il ciclo di vita del prodotto. Invece, il comportamento Digital Twin (la ricchezza di capacità) comprende le altre quattro dimensioni, cioè l'intelligenza del *CPS*¹⁶, le capacità di simulazione, la ricchezza del modello digitale e l'interazione umana. Ognuna delle dimensioni fornisce tre o quattro livelli di realizzazione: un livello più alto non è necessariamente migliore di un altro, ma rappresenta uno spazio di realizzazione diverso e/o unico. Quattro delle otto dimensioni (ampiezza di integrazione, modalità di connettività, interazione umana, ciclo di vita del prodotto), tuttavia, esprimono con i loro livelli crescenti anche un grado crescente di ricchezza/fedeltà (nel caso della modalità di connettività e dell'interazione umana) e di ampiezza/estensione (per quanto riguarda l'ampiezza di integrazione e il ciclo di vita del prodotto).

¹⁵ (Stark et al 2019, vol.68, pp. 129-132).

¹⁶ *Cyber-Physical System*, un dispositivo in grado di interagire in modo continuo con il mondo fisico in cui opera



Figura 3 Digital Twin 8-dimension model¹⁷.

Molti studiosi hanno discusso riguardo il Digital Twin e nessuna definizione esclude l'altra, perché tutte concettualmente corrette. Volendo comunque provare a definire uno standard, si potrebbe affermare che il Digital Twin è un'entità digitale che riflette l'entità fisica e continua ad aggiornarsi durante l'intero ciclo di vita dell'oggetto, processo o sistema.

2.2 Tecnologie

Le tecnologie che possono implementare il Digital Twin si possono suddividere in tre categorie: tecnologie relative ai dati, tecnologie di modellazione ad alta fedeltà e tecnologie di simulazione basate su modelli¹⁸.

¹⁷ A sinistra le dimensioni che rappresentano l'area dell'ambiente e del contesto Digital Twin; a sinistra le dimensioni che rappresentano la ricchezza di capacità di comportamento del Digital Twin. (Stark et al 2019, vol.68, p. 130).

¹⁸ (Liu et al. 2021, vol.58, pp. 346-361).

2.2.1 Tecnologie relative ai dati

La prima sezione prende in considerazione i dati, i quali possono essere raccolti tramite appositi strumenti, quali sensori, sistemi *RFID*¹⁹, telecamere e scanner. Tuttavia, tali dati (trasmessi in tempo reale o quasi) sono spesso di grande volume, di alta velocità ed eterogenei. Questa situazione rende complicato e costoso trasmettere i dati al Digital Twin nel *cloud server*²⁰. La soluzione migliore è l'*edge computing*, ovvero un metodo per elaborare anticipatamente i dati raccolti, per ridurre il carico della rete ed eliminare le possibilità di perdita di informazioni. La risposta, invece, per la trasmissione dei dati in tempo reale è la tecnologia 5G. Infine, oltre alla mappatura e l'integrazione dei dati (per una migliore comprensione delle informazioni raccolte), si deve considerare un altro requisito: i dati statici sono di diversi tipi e provenienti da diverse fonti, sono quindi necessarie interfacce standard per trasformare questi dati iniziali in informazioni per il Digital Twin. Le tecnologie di questo gruppo, come l'Internet of Things, sono diverse e variano in base alle applicazioni.

2.2.2 Tecnologie di modellazione

Nella seconda categoria, si parte dalla concezione che i modelli costituiscano il nucleo del Digital Twin, differenziandosi in: modelli di dati semantici e modelli fisici. Mentre i primi sono addestrati in input e output, usando metodi di Intelligenza Artificiale, i modelli fisici richiedono una comprensione completa delle proprietà fisiche e della loro interazione reciproca. Pertanto, la *modellazione multifisica*²¹ è essenziale per i modelli ad alta fedeltà del Digital Twin. Due problematiche devono

¹⁹ La tecnologia di identificazione automatica, *Radio Frequency Identification*, è basata sulla localizzazione di oggetti (statici e in movimento) mediante segnali radio. (Enciclopedia Treccani, *RFID*)

²⁰ Server remoti contenenti i dati e i programmi di un utente-

²¹ Creare un modello in cui più fenomeni fisici distinti interagiscono tra loro. (Enciclopedia Treccani, *Modellazione e calcolo*).

essere affrontate in questa categoria: da una parte la contraddizione tra il modello virtuale semplificato e il comportamento complesso dell'oggetto fisico; dall'altra l'identificazione di componenti chiave per la funzionalità di un sistema complesso e l'individuazione del livello di modellazione di ciascun componente. Mentre sul primo punto si possono sviluppare delle soluzioni modellistiche da applicare²², il secondo problema si risolve intervenendo, a livello ingegneristico, nella fase iniziale della creazione di modelli. In conclusione, il modello ad alta fedeltà del Digital Twin si costruisce in base a diversi livelli di modellazione.

2.2.3 Tecnologie di simulazione

Per quanto riguarda l'ultimo gruppo, la simulazione del Digital Twin permette al modello virtuale di interagire in modo bidirezionale con l'entità fisica in real-time. Per realizzare l'interazione bidirezionale²³, sono stati presentati modelli complessi²⁴ in cui la simulazione del Digital Twin (a differenza da quelle tradizionali) utilizza dati del sistema fisico in tempo reale, che vengono raccolti e registrati dallo spazio fisico, tramite l'Internet of Things²⁵. La simulazione multifisica e multiscala è una delle idee più importanti del Digital Twin: per questo, si dovrebbe fornire un'interfaccia che mantenga coerenti diversi modelli e dati.

2.2.4 Digital Model, Digital Shadow e Digital Twin

A partire dalla proprietà del Digital Twin di essere in real-time, si sono formati due nuovi termini che spesso vengono confusi con il Digital Twin: *Digital Model* e *Digital Shadow*²⁶(Figura 4).

²² (Negri et al. 2019, vol.28, pp. 201-206).

²³ (Talkhestani et al. 2018, vol. 72, pp. 159-164).

²⁴ (Schroeder et al. 2016, vol. 49, pp. 12-17)

²⁵ (Tan et al. 2019, vol. 7).

²⁶ (Kritzinger et al. 2018, vol. 55).

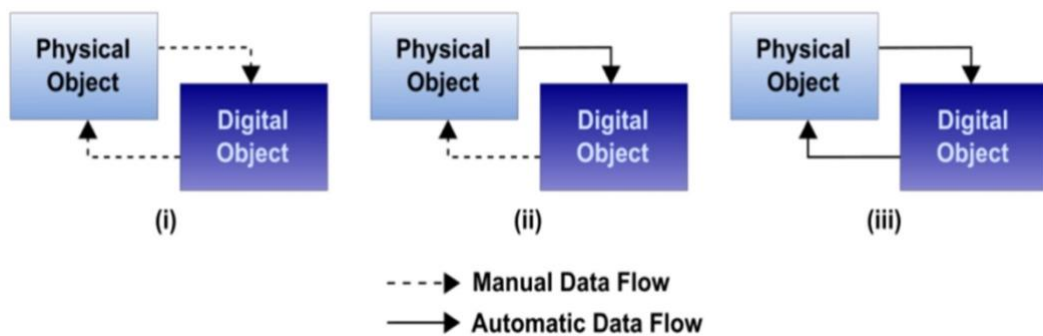


Figura 4 Tipi di Digital Twin basati sul livello di integrazione: (i) Digital Model; (ii) Digital shadow/Static Digital model; (iii) Digital Twin/Dynamic Digital Model²⁷.

1. *Digital Model*: I dati tra l'oggetto fisico e quello digitale non si scambiano automaticamente, per cui qualsiasi cambiamento nello stato dell'oggetto fisico non si riflette direttamente su quello digitale, e viceversa.
2. *Digital Shadow*: I dati dall'oggetto fisico fluiscono nel digitale automaticamente, ma non il contrario. Di conseguenza, qualsiasi cambiamento nell'oggetto fisico può essere visto nella sua copia digitale, ma non viceversa.
3. *Digital Twin*: C'è un flusso bidirezionale automatico di dati tra l'oggetto fisico e quello digitale. Pertanto, i cambiamenti in uno dei due oggetti, fisico o digitale, portano direttamente a cambiamenti nell'altro.

In conclusione, per creare un Digital Twin (e non un Digital Model o un Digital Shadow) si può iniziare connettendo il modello digitale al prodotto fisico attraverso sensori, installati in alcuni punti chiave delle funzionalità dell'oggetto. Questi sensori producono dati su diversi aspetti delle prestazioni dell'oggetto fisico. Successivamente, l'analisi di questi dati, combinata con altre fonti di informazione, permette di capire sia il comportamento del prodotto, sia di predire come tale prodotto si

²⁷ (Kritzinger et al. 2018, vol. 55, p. 1017).

comporterà in futuro. Questo flusso continuo di informazioni permette al Digital Twin di eseguire simulazioni, di analizzare eventuali problemi di prestazioni del prodotto e di studiare possibili miglioramenti.

2.3 Vantaggi

Rispetto ad altri modelli statici, la presenza dei dati in real-time nel Digital Twin è un grande punto di forza. Infatti, la progettazione e la simulazione dei prodotti in tempo reale limitano notevolmente i tempi e i costi. Ad esempio, la creazione di un prototipo o la riprogettazione di un prodotto si svolgono in tempi più veloci grazie al Digital Twin e, nonostante i costi varino di volta in volta, sicuramente l'uso di risorse virtuali (al posto di materiali fisici) abbassa particolarmente le spese e gli sprechi²⁸.

La possibilità di prevedere i problemi e gli errori, durante le diverse fasi del ciclo di vita di un prodotto, è un altro vantaggio del Digital Twin. La rappresentazione virtuale in tempo reale dell'oggetto fisico, infatti, minimizza gli errori di progettazione con conseguenti diminuzione dei guasti del sistema fisico nella produzione o nell'uso effettivo. In ambito industriale, ad esempio, grazie alla previsione di problematiche nel sistema di produzione, si può programmare la manutenzione di un prodotto in anticipo. La caratteristica *what-if* del Digital Twin rende il tutto molto più semplice perché permette di analizzare simulazioni differenti in scenari diversi²⁹.

Il dispositivo fisico può essere controllato e monitorato a distanza. A differenza dei sistemi fisici, che sono limitati dalla posizione in cui si trovano, i sistemi virtuali si possono condividere e vi si può accedere a

²⁸ (Grieves and Vickers 2017).

²⁹ (Negri et al 2017, vol. 11, pp. 939-948).

distanza. In questo modo, il Digital Twin accumula dati che diventeranno preziosi nel tempo. Questo aspetto deve essere accompagnato da un'ottima sicurezza dei dati, per evitarne la perdita o altri possibili danni³⁰.

Infine, il Digital Twin riesce anche a collegare gruppi *multi-stakeholder*. Infatti, diversi gruppi provenienti da settori differenti si trovano a collaborare insieme in un ambiente virtuale³¹. Questo aspetto viene spesso sottovalutato.

Dati tali punti di forza, non stupisce il fatto che esistono molti studi e applicazioni del Digital Twin. Il settore dove viene utilizzato maggiormente il Digital Twin è quello manifatturiero³², il quale continua ad evolversi grazie alle moderne tecnologie digitali, che caratterizzano l'Industria 4.0.

³⁰ (Grieves and Vickers 2017).

³¹ (Alaei et al. 2018).

³² (Fuller et al. 2020, vol. 8, p. 108964).

3 Il contesto industriale e sociale

Negli ultimi anni il modo di lavorare, di relazionarsi e di vivere degli esseri umani si è modificato notevolmente: uno dei punti centrali di questo cambiamento riguarda il mondo del digitale. Lo sviluppo e l'uso delle tecnologie moderne hanno dato vita a una trasformazione sociale equiparabile alle tre rivoluzioni industriali precedenti³³.

3.1 Industria 4.0

Con il termine *Industria 4.0* si intende quella che è stata la *quarta rivoluzione industriale*. L'impiego del termine *rivoluzione*, per questo cambiamento prettamente scientifico e tecnologico, è giustificato da due motivazioni principali. La prima è collegata agli inevitabili cambiamenti culturali degli esseri umani, che costituiscono un punto chiave per la definizione della parola *rivoluzione*. In secondo luogo, è complicato assegnare all'Industria 4.0 un preciso punto d'inizio, in quanto costituisce un continuum con la rivoluzione precedente (la terza rivoluzione industriale).

“Il termine Industria 4.0 (o Industry 4.0) indica una tendenza dell'automazione industriale che integra alcune nuove tecnologie produttive per migliorare le condizioni di lavoro e aumentare la produttività e la qualità produttiva degli impianti.”³⁴

³³ (Impact Networking, *Infographic: Industry 4.0 In Numbers*).

³⁴ (Wichmann et al. 2019).

Nello specifico, si digitalizzano tutte le varie fasi di produzione fino alla creazione di un prodotto o di un servizio. Attraverso l'utilizzo delle tecnologie ICT³⁵, tutti gli elementi che hanno a che fare con il settore manifatturiero sono digitalmente connessi tra loro. I confini tra cose e persone sono diventati più labili. I dati e le informazioni vengono trasmessi in tempo reale tra i singoli soggetti permettendo un costante monitoraggio e controllo del prodotto reale³⁶.

3.1.1 Excursus storico

Dopo la prima grande rivoluzione avvenuta tra 10.000 e 8.000 a.C. in cui l'uomo è passato da cacciatore nomade ad agricoltore sedentario, facendo affidamento su nuove tecniche lavorative (come la domesticazione di animali), la specie umana ha affrontato altri tre cambiamenti in cui la forza dell'uomo e quella delle macchine si sono mescolate³⁷.

Dalla metà del 1700 ai primi decenni del 1800, il Regno Unito è stato il punto d'origine della prima rivoluzione industriale, grazie all'uso di macchinari azionati dalla scoperta della macchina a vapore all'interno delle fabbriche. A livello sociale si è assistito alla formazione di una nuova classe operaia, composta da contadini trasferiti in città per trovare lavoro in fabbrica. Particolare rilievo hanno avuto le conseguenze di questa rivoluzione: urbanizzazione, crescita demografica, e numerose scoperte scientifiche, che hanno permesso di migliorare le tecnologie industriali³⁸.

Il secolo successivo è quello dell'introduzione in ambito industriale dei primi impianti elettrici, che portarono alla seconda rivoluzione industriale: il motore a combustione interna, l'utilizzo del petrolio come nuova fonte energetica, l'avvento del capitalismo, la nascita della produzione di massa,

³⁵ *Information and Communication Technology*

³⁶ (Wichmann et al. 2019).

³⁷ (Enciclopedia Treccani, *Rivoluzione neolitica*).

³⁸ (Borgognone & Carpanetto, 2017).

l'introduzione di nuovi mezzi di trasporto e di comunicazione, hanno contribuito a cambiare la vita di tutti i giorni di ogni individuo.

Al diciannovesimo secolo appartengono anche le scoperte dell'ingegnere Frederick Taylor che, insieme all'OSL³⁹, è stato uno dei massimi esponenti delle teorie del periodo. Attraverso la sua *specializzazione organizzativa*, Taylor applicò la scienza alla gestione del lavoro industriale. Iconico è l'esempio della *catena di montaggio mobile* della *Ford Motors*, basata sulla suddivisione delle attività produttive in molteplici sequenze di operazioni più brevi e semplici. Conoscenza tecnica e sapere scientifico hanno, quindi, accelerato i ritmi dell'innovazione tecnologica e migliorato i guadagni, grazie alla realizzazione di prodotti non eccessivamente costosi⁴⁰.

Successivamente proprio questo modo di lavorare della catena di montaggio, che era diventato fin troppo pesante, in aggiunta al progresso tecnologico (con il suo picco nella nascita del computer) hanno permesso lo sviluppo della *terza rivoluzione industriale* oppure *rivoluzione informatica o digitale*. Nel 1900, infatti, l'elettronica e l'informatica hanno preso piede introducendo chip capaci di fare grandi calcoli in un breve lasso di tempo, fino ad arrivare all'avvento di Internet⁴¹.

Ancora una volta l'impiego e il progresso delle macchine è stato fondamentale per la produzione, spingendo tutte le imprese a modificare il loro approccio verso il cliente/consumatore. Infatti, se durante la seconda rivoluzione si parlava di produzione di massa completamente standardizzata, successivamente si è adottata una *mass customization*, ovvero una customizzazione di massa che ha permesso di soddisfare ogni

³⁹ Organizzazione Scientifica del Lavoro

⁴⁰ (Enciclopedia Treccani, *Taylorismo*).

⁴¹ (Enciclopedia Treccani, *Rivoluzione industriale*).

singolo consumatore, grazie alla migliore interazione dell'uomo con le nuove tecnologie⁴².

Nel 2011 tre ingegneri (Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas e Wolfgang Wahlster) hanno inventato e promosso il termine *Industria 4.0*, durante una conferenza stampa alla Fiera annuale di Hannover⁴³ in Germania. La quarta rivoluzione industriale è attualmente in corso, ma quest'anno si è già preannunciata una futura tipologia di industria, più incentrata sulla società e sulla sostenibilità: l'*Industria 5.0* (Figura 5).

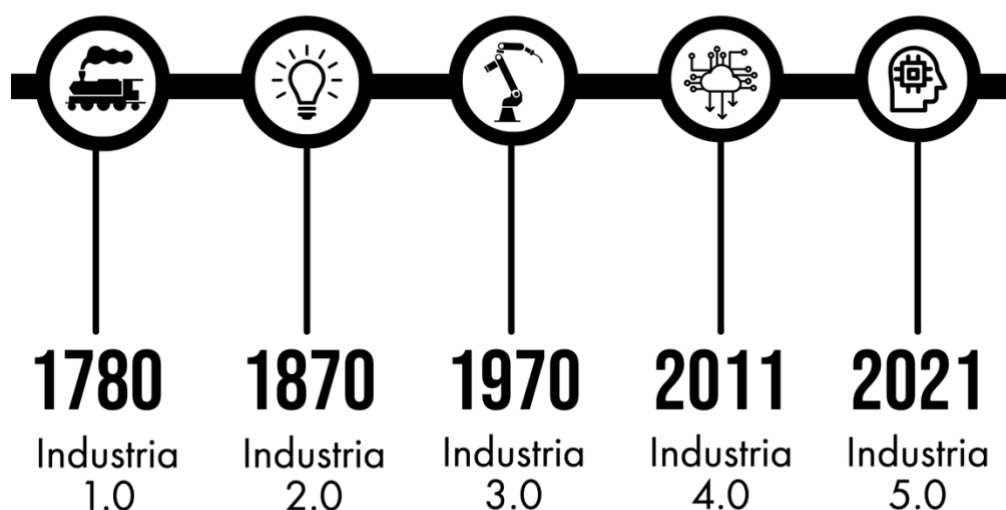


Figura 5 Linea temporale delle rivoluzioni industriali

3.1.2 Tecnologie abilitanti

Tecnologie che caratterizzano l'Industria 4.0, dette *abilitanti*⁴⁴, sono:

⁴² (Ibidem).

⁴³ Una delle più importanti fiere dell'industria e dell'automazione. (Hannover Messe, *About Us*).

⁴⁴ (bgc.com, *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*).

- *Augmented reality*: tecnologia che, attraverso un opportuno supporto visivo (ad esempio un visore, ma anche un computer), rende possibile l'aggiunta di elementi virtuali, interattivi e multimediali alla realtà fisica circostante;
1. *Industrial Internet of Things*: l'applicazione in campo industriale dell'Internet of Things. Quest'ultimo consiste nella connessione alla rete di tutti quegli oggetti che, autonomamente, possono agire per modificare il proprio stato o comunicare tra loro attraverso Internet. Gli oggetti dotati di questa capacità sono chiamati *smart objects* e, oltre all'interconnessione, sono caratterizzati dalla dotazione di sensori, RFID tags e QR code, che permettono loro di interagire con l'esterno, di raccogliere dati ambientali e di inviarli ad un elaboratore⁴⁵.
 2. *Cloud Computing*: tecnologia sempre più presente e utilizzata dai nostri dispositivi, che mette in collegamento un sistema locale (smartphone, *smart object*, PC) con una macchina remota, in modo da utilizzare la potenza computazionale e lo spazio di memoria di quest'ultimo. I due sistemi (quello locale, ovvero il client, e quello remoto, ovvero il server host) sono collegati tra loro tramite la rete Internet. La connessione rende possibile lo *storage* di enormi quantità di dati in remoto, senza impegnare la memoria del dispositivo locale; inoltre permette principalmente di utilizzare la potenza di calcolo di macchine estremamente potenti, costose e cooperanti, ottenendo risultati in locale in brevissimo tempo. In genere, se gli stessi *task* fossero indirizzati verso l'hardware locale, sarebbe necessario molto più tempo per ottenere gli stessi risultati.

⁴⁵ (Alcácer et al. 2019, vol. 22, pp. 899-919).

Questo comporta un'importante riduzione dei costi, in quanto l'impresa non deve occuparsi direttamente dell'installazione dell'infrastruttura IT⁴⁶ e, soprattutto, paga solo per quei servizi di cui effettivamente fruisce⁴⁷.

3. I *Big Data* sono tutti i dati strutturati (pronti per essere analizzati) e non strutturati (che richiedono una formalizzazione per essere elaborati) che sono prodotti dalle infrastrutture IT. Il termine è stato coniato a metà degli anni '90 dall'informatico statunitense John Mashey, direttore della SGI⁴⁸, e oggi è uno dei temi chiave per molti settori lavorativi e di ricerca⁴⁹. Per la natura massiccia e complessa, questa specifica categoria di dati necessita di tecnologie apposite (che spesso e volentieri comprendono Cloud Computing e Intelligenza Artificiale). L'analisi dei Big Data è necessaria per interpretare, descrivere e prendere decisioni all'interno di contesti estremamente articolati, complessi e numerosi. Esempi di Big Data potrebbero essere i log di sistema di un router, tutte le pagine web che compongono la rete e i relativi link ipertestuali o i dati relativi agli utenti di un Social Media⁵⁰.

Tra le tecnologie abilitanti, si menzionano anche *Advanced Robotics* (macchinari interconnessi, rapidamente programmabili e dotati di intelligenza artificiale), *Additive Manufacturing* (stampa 3D) e *Horizontal and Vertical System Integration* (comunicazione continua tra passaggi della *catena del valore*⁵¹).

⁴⁶ *Information Technology*

⁴⁷ (Enciclopedia Treccani, *Cloud Computing*).

⁴⁸ Silicon Graphics, Incorporated

⁴⁹ (Diebold 2012).

⁵⁰ (Zannetta 2018).

⁵¹ Un modello della struttura di una organizzazione in più fasi. (Enciclopedia Treccani, *Industria*)

3.2 L'Industria 5.0

Società e industria non si possono considerare due categorie separate, perché l'una condiziona l'altra, e viceversa. Tale condizionamento si è notato anche recentemente, a causa della crisi dovuta dal COVID-19, che ha spinto a una modernizzazione i metodi e gli approcci lavorativi più tradizionali. La pandemia costituisce, infatti, un contesto sociale che ha influenzato e continua ad influenzare l'industria⁵².

L'*Industry 5.0* è stata definita nel 2021 e rispecchia gli obiettivi della politica europea attuale. Alcuni documenti importanti emessi dalla Commissione europea, come *European Green Deal*⁵³ e *Europe Fit for the Digital Age*⁵⁴, sottolineano la necessità di continuare a sviluppare le tecnologie digitali avanzate, principalmente per affrontare alcuni nuovi requisiti emergenti di un contesto industriale e, soprattutto, di quello sociale ed ambientale⁵⁵.

Un aspetto da mettere in rilievo è che l'Industria 5.0 non è da considerare come il punto conclusivo della quarta rivoluzione industriale, bensì un nuovo tipo di approccio verso le tecnologie introdotte da quest'ultima.

⁵² (Fondazione Giacomo Brodolini, *Il covid-19 come acceleratore della trasformazione digitale nel mondo del lavoro*).

⁵³ Una serie di proposte, adottate dalla Commissione europea nel luglio 2021, per contenere il riscaldamento globale. Entro il 2050 la generazione di emissioni nette di gas a effetto serra sarà pari a zero. (europa.eu, *Un Green Deal europeo*)

⁵⁴ Strategie per avere un'Europa al passo dell'era digitale. (europa.eu, *Un'Europa pronta per l'era digitale*)

⁵⁵ (Directorate-General for Research and Innovation (European Commission) et al., *Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry*)

3.2.1 Tre punti cardine

Per poter dare una definizione completa di Industria 5.0, la Commissione europea ha definito tre punti chiave: approccio umano-centrico, sostenibilità e resilienza⁵⁶.

Il 18 dicembre 2020, a 5.0: “Gli strumenti digitali sono al servizio nostro e non il contrario”⁵⁷.

Come anticipato, si tratta di un cambio di paradigma rispetto all’Industria 4.0: un approccio incentrato sull’essere umano e non solo sulla tecnologia. Piuttosto che chiedersi come poter usare la tecnologia, sarebbe più utile domandarsi in che modo la tecnologia può essere d’aiuto all’uomo⁵⁸.

In tal senso i lavoratori, e in generale le persone, non si adattano in continuazione alle evoluzioni della tecnologia, ma vengono coinvolti nella progettazione e nell’implementazione della stessa. Si tratta di un’integrazione tra il digitale e le competenze umane, che mira a rafforzare proprio un approccio umano-centrico⁵⁹.

C’è il bisogno di riciclare le risorse naturali e di ridurre gli sprechi, i consumi energetici e le emissioni a effetto-serra, continuando a garantire i bisogni sia delle generazioni odierne, sia di quelle future⁶⁰.

Le innovazioni delle tecnologie, volte a non danneggiare l’ambiente, sono la base per un futuro più sostenibile. Per questo, le industrie che hanno una richiesta eccessiva di energia (e anche l’aumento delle emissioni di carbonio) per la produzione industriale dovrebbe cambiare traiettoria,

⁵⁶ (Ibidem)

⁵⁷ (economyup, *Gli strumenti digitali sono al servizio nostro e non il contrario*).

⁵⁸ (Dolci 2010).

⁵⁹ (Directorate-General for Research and Innovation (European Commission) et al., *Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry*)

⁶⁰ (Enciclopedia Treccani, *Sostenibilità*).

puntando a una pianificazione più intelligente, anche grazie all'uso di tecnologie maggiormente efficienti dal punto di vista energetico⁶¹.

Infine, con *resilienza* si fa riferimento al bisogno di migliorare la robustezza nella produzione industriale di fronte a situazioni critiche. In tempo di crisi (come per il COVID-19) si è notato il bisogno di sviluppare flessibili processi di produzione aziendali.

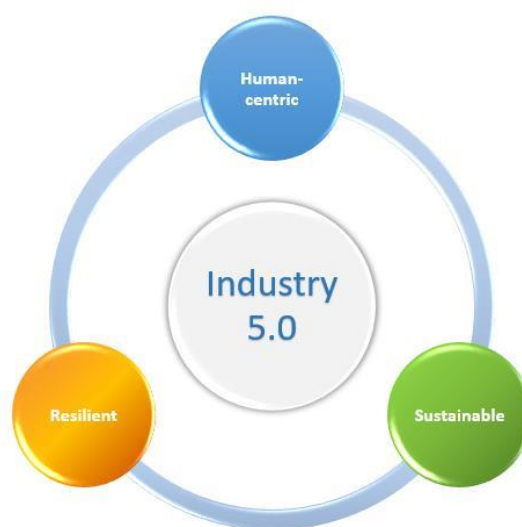


Figura 6 I punti cardine dell'Industria 5.0⁶².

Basandosi su questi tre aspetti chiave (Figura 6), la Commissione Europea ha definito l'Industria 5.0 come un'industria più resiliente, capace di raggiungere obiettivi sociali che mirano al benessere del lavoratore, il quale sta al centro del processo di produzione, rispettando i limiti del nostro pianeta⁶³.

Questo concetto, e quindi anche i tre punti sopra descritti, specificano ancor di più la differenza tra le due Industrie. Tale distinzione non è tanto

⁶¹ (Directorate-General for Research and Innovation (European Commission) et al., *Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry*)

⁶² (Directorate-General for Research and Innovation (European Commission) et al., *Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry*, p. 13)

⁶³ (Ibidem).

legata allo sviluppo di diverse tipologie di *macchine* (come potrebbe essere facendo un confronto con le altre rivoluzioni), quanto un differente tipo di approccio all'industria.

Le successive *word cloud*⁶⁴ (Figura 7) sono state create selezionando le definizioni più diffuse dell'Industria 4.0⁶⁵ e 5.0⁶⁶, con lo scopo di evidenziare la differenza concettuale tra le due tipologie di industrie.



Figura 7 Word Cloud di Industria 4.0 (sinistra) e Industria 5.0 (destra)

A conferma di quanto discusso finora, si può notare che, nelle definizioni dell'Industria 4.0, sono più frequenti le parole legate al settore industriale e alla tecnologia, come “manufacturing”, “technologies”, “production” e “product”. Mentre il valore della società, come punto di partenza per lo sviluppo tecnologico, è rilevante nelle definizioni dell'Industria 5.0, come si può notare dall'alta frequenza dei termini “human” e “social”.

L'importanza della società, della cultura e dell'essere umano sono al centro di un altro termine, non europeo, che attribuisce più valore agli aspetti sociali: Società 5.0.

⁶⁴ Le nuvole di parole, o word cloud, sono immagini composte da parole, la cui dimensione varia in base alla frequenza con cui esse ricorrono.

⁶⁵ (Tay et al. 2018, vol.10).

⁶⁶ (Salimova et al. 2019, vol. 497).

3.3 La Società 5.0

Mentre le industrie europee si confrontano sul paradigma Industria 4.0 e con i cambiamenti che esso provocava, il Giappone mira a superare questo concetto e si concentra sul benessere della popolazione.

La *Society 5.0* è una nuova società intelligente, che aiuta a risolvere i problemi sociali, piuttosto che migliorare solamente la produttività. Può anche essere definita una *Super Smart Society*⁶⁷ per i suoi legami con la tecnologia, anche se l'uomo rimane al centro del concetto.

Le *Società* precedenti (Figura 8) derivano da una scala temporale diversa e più lunga di quella delle rivoluzioni industriali. La *Società 1.0* e quella *2.0* coincidono con i periodi preindustriali e sono rispettivamente legate alla caccia, alla raccolta e all'economia agricola. La società successiva corrisponde a un periodo che parte dalla prima rivoluzione industriale fino all'inizio dell'*Industria 3.0*. Infine, la società targata *4.0* è caratterizzata dalla diffusione dell'informazione e si è evoluta a partire da una versione altamente digitalizzata della terza rivoluzione industriale, fino ad oggi⁶⁸.

⁶⁷ Società Super Intelligente

⁶⁸ (Directorate-General for Research and Innovation (European Commission) et al., *Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry*)

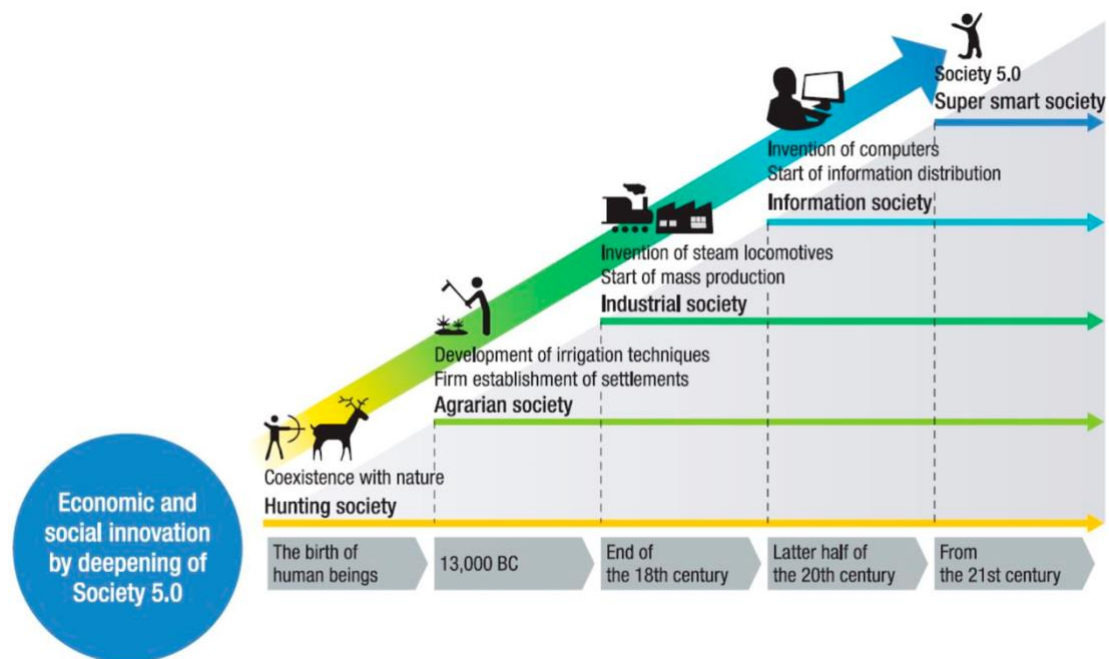


Figura 8 L'evoluzione delle Società⁶⁹.

Il termine *Società 5.0*, successivamente promosso dal governo giapponese⁷⁰, è stato presentato da *Keidanren*⁷¹, la più importante federazione imprenditoriale del Giappone nel 2018. Alcuni studiosi considerano la Società 5.0 come un'iniziativa politica strategica giapponese, emersa sotto l'influenza dell'Industria 4.0.⁷² In effetti, quest'ultima fornisce utili strumenti per migliorare la produzione all'interno delle imprese, senza preoccuparsi eccessivamente dello stato delle persone. La Società 5.0 si basa proprio sugli aspetti che sono stati trascurati dall'Industria 4.0, mirando, quindi, a una società umano-centrica.

⁶⁹ (Mavrodieva and Shaw 2020, vol. 12, pp. 3)‘

⁷⁰ (MDPI, *Society 5.0: Innovation, Uncertainty and Social Sciences*; Gladden 2019).

⁷¹ (Keidanren Japan Business Federation, *Keidanren*)

⁷² (Gladden, *Who Will Be the Members of Society 5.0?*)

La Società 5.0 costituisce la base dell'Industria 5.0. Esse sono rispettivamente la visione futura della società e dell'industria.

3.4 NextGenerationEU

Mentre la Società 5.0 e l'Industria 5.0 sono concetti con alla base degli obiettivi da raggiungere, *NextGenerationEU* è uno strumento che tenta di concretizzare tali obiettivi.

Il 18 dicembre 2020 Parlamento e Consiglio Europeo hanno raggiunto un accordo finale su *NextGenerationEU*⁷³, un programma temporaneo di ripresa e di rilancio economico. Si tratta di 750 miliardi di euro destinati a mitigare l'impatto economico e sociale generato dalla crisi sanitaria del COVID-19.⁷⁴

Attraverso il *NextGenerationEU*, la Commissione Europea si focalizza su sei obiettivi:

1. Digitalizzazione, innovazione, competitività e cultura, a cui deve essere dedicato il 20% di spesa per il settore digitale;
2. Rivoluzione verde e transizione ecologica. Ogni piano nazionale dovrà includere almeno il 37% del fondo del piano nazionale;
3. Infrastrutture per una mobilità sostenibile;
4. Istruzione e ricerca;
5. Inclusione e coesione;
6. Salute.

Raggiungere la neutralità climatica, applicare misure per la lotta al cambiamento del clima, aumentare le zone raggiunte da una buona

⁷³ (europa.eu, *NextGenerationEU*)

⁷⁴ (Parlamento Europeo Ufficio in Italia, *Nuovo bilancio e Next Generation EU*).

connessione Internet, e investire nella formazione delle conoscenze digitali dei cittadini, sono solo alcuni esempi degli obiettivi che ciascuno stato può programmare di raggiungere.

Nel caso dell'Italia, ad esempio, il 13 agosto 2021 la Commissione Europea ha erogato 24,9 miliardi di euro, pari al 13% dell'importo totale stanziato, per i seguenti progetti⁷⁵:

1. Garantire la transizione verde: saranno investiti 32 miliardi di euro, per aumentare il numero di località con reti ferroviarie ad alta velocità, con percorsi ciclabili e con linee di metro, di tram e di bus a zero emissioni. Viene data importanza anche all'installazione di punti di ricarica, per auto elettriche, in tutto il paese, e di stazioni di rifornimento a idrogeno, per il trasporto stradale e ferroviario;
2. Sostenere la transizione digitale: con circa 13,4 miliardi di euro sarà promossa l'adozione di tecnologie digitali da parte delle imprese, per sostenere e per accelerare la loro trasformazione digitale;
3. Rafforzare la resilienza economica e sociale: 26 miliardi di euro saranno investiti in una maggiore disponibilità di strutture scolastiche, in competenze degli insegnanti e nel favorire la partecipazione di donne e di giovani nel mondo del lavoro.

Questi tre termini (Industria 5.0, Società 5.0 e NextGenerationEU) hanno permesso di comprendere qual è la visione europea di società e industria del futuro, su cui l'Unione Europea ha intenzione di investire, e in quale direzione la tecnologia potrebbe evolversi.

⁷⁵ (europa.eu, *NextGenerationEU: la Commissione europea eroga all'Italia 24,9 miliardi di € di prefinanziamenti*)

4 Sviluppi del Digital Twin

Considerando la concettualizzazione del Digital Twin di Grieves come punto d'inizio dell'analisi, si può notare che, a partire dal 2017, il distacco del numero di pubblicazioni, rispetto all'anno precedente, aumenta sempre di più (Figura 9).

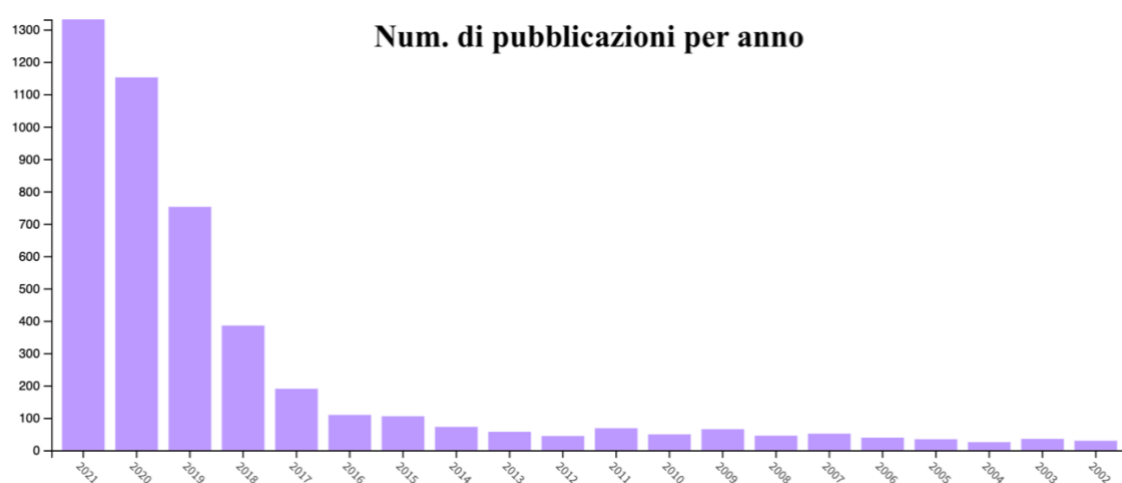


Figura 9 Incremento delle pubblicazioni del Digital Twin divise per anno nel database di Web Of Science.

Il lasso di tempo, che va dal 2003 al 2010 (circa), si può considerare come il periodo di conoscenza del Digital Twin, ovvero un periodo in cui il Digital Twin, nonostante non sia ancora ben definito, inizia a mostrare le sue potenzialità. Infatti, questa fascia temporale è anche caratterizzata dal rapido sviluppo dell'Internet of Things, della tecnologia dei sensori, dell'analisi dei Big Data e delle tecnologie di simulazione; inoltre, proprio

allo scattare del 2010, la NASA pubblica la definizione più accurata di Digital Twin con una prospettiva aerospaziale⁷⁶.

Nel 2017 inizia l'effettiva crescita del Digital Twin nella ricerca. In tale anno, inoltre, il rapporto di *Gartner*⁷⁷ del 2017 classifica il Digital Twin al quinto posto tra le dieci tendenze tecnologiche più promettenti del prossimo decennio⁷⁸. Nel 2018⁷⁹ e nel 2019⁸⁰, la classifica di Gartner sposta il Digital Twin su un gradino più alto, ovvero al quarto posto, mentre lo scorso anno il Digital Twin è arrivato al primo posto, sotto la categoria generale dell'*iperautomazione*⁸¹. Ciò dimostra che c'è stata una consapevolezza graduale delle potenzialità del Digital Twin e che quest'ultimo è riuscito a raggiungere gli alti livelli, quando è stato associato alle tecnologie moderne.

4.1.1 Analisi sui recenti sviluppi

Per trattare la diffusione del Digital Twin degli ultimi due anni (2019 e 2020), è stato compiuto uno studio di sondaggi, in modo tale da avere un quadro completo del Digital Twin. Infatti, trattare di quest'ultimo, considerando solo le pubblicazioni, potrebbe essere poco realistico.

Le analisi, prese in considerazione, riguardano la spinta verso la digitalizzazione delle aziende perché è in questo contesto che il Digital Twin ha avuto maggior successo⁸².

⁷⁶ (Glaessgen and Stargel 2010).

⁷⁷ una società che si occupa di consulenza strategica, ricerca e analisi nel campo della tecnologia dell'informazione ad alti livelli. (Gartner, *Gartner | Delivering Actionable, Objective Insight to Executives and Their Teams*).

⁷⁸ (Gartner, *Gartner's Top 10 Technology Trends 2017*).

⁷⁹ (Gartner, *Gartner's Top 10 Technology Trends 2018*).

⁸⁰ (Gartner, *Gartner's Top 10 Technology Trends 2019*).

⁸¹ Si occupa dell'applicazione di tecnologie avanzate, tra cui l'intelligenza artificiale (Intelligenza Artificiale) e l'apprendimento automatico (Machine Learning), per automatizzare sempre più i processi e aumentare gli esseri umani. (Gartner, *Gartner's Top 10 Technology Trends 2020*).

⁸² (Fuller et al. 2020, vol. 8, p. 108964).

Durante settembre dello scorso anno, il mercato globale dei Digital Twins è stato valutato 3,1 miliardi di dollari ed è previsto che raggiunga i 48.2 miliardi entro il 2026⁸³.

Concentrandosi sulla nostra nazione, il Digital Twin è stato analizzato solo all'interno delle aziende. Nel contesto aziendale, quindi, il Digital Twin ha subito un incremento d'interesse (+4%), ma si tratta comunque di una percentuale al di sotto del 10%. Secondo un sondaggio sull'implementazione di iniziative e processi di trasformazione digitale da parte di aziende, nel 2019⁸⁴ e 2020⁸⁵, il Digital Twin si trova nell'ultima posizione, tuttavia è previsto un incremento per i prossimi anni, proprio grazie alle tecnologie digitali che ruotano intorno al Digital Twin (Figura 10).

⁸³ (ReportLinker, *Digital Twin Market by Technology, Type, Application, Industry And Geography - Global Forecast to 2026*).

⁸⁴ (The Innovation Group, *Digital Business Transformation Survey 2019*).

⁸⁵ (The Innovation Group, *Digital Business Transformation Survey 2020*).

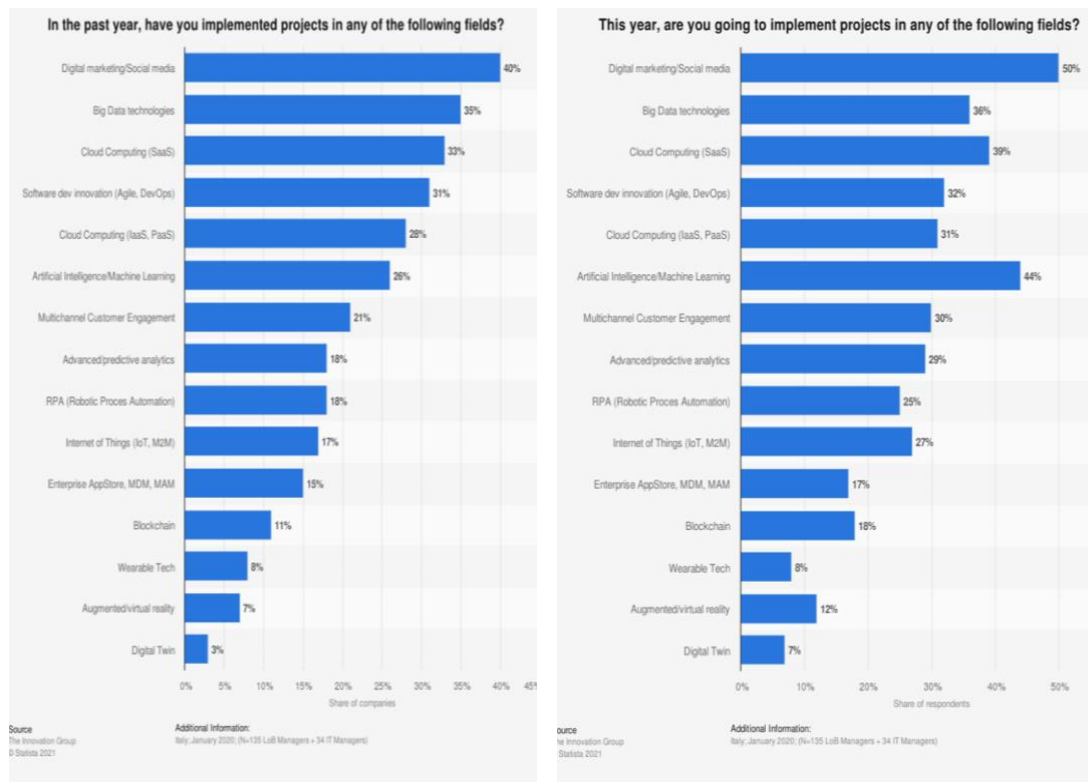


Figura 10 Digital Business Transformation Survey 2019⁸⁶ e 2020⁸⁷.

Un ulteriore sondaggio, conferma che il rilancio della ricerca del Digital Twin è stato innescato grazie al progresso tecnologico di altri settori. Considerando il settore manifatturiero, che è quello maggioritario tra gli ambiti di applicazione, tra il 2017 e il 2022, i Digital Twin, sviluppati “per singoli prodotti”, “per ambienti di fabbrica” e “per gli asset di produzione” stanno avendo e avranno una forte e netta crescita (Figura 11)⁸⁸.

⁸⁶ (Statista, *This year, are you going to implement projects in any of the following fields?*).

⁸⁷ (Statista, *In the past year, have you implemented projects in any of the following fields?*).

⁸⁸ (Statista, *Use of connectivity technologies and analytics by manufacturers in 2017 and 2022*).

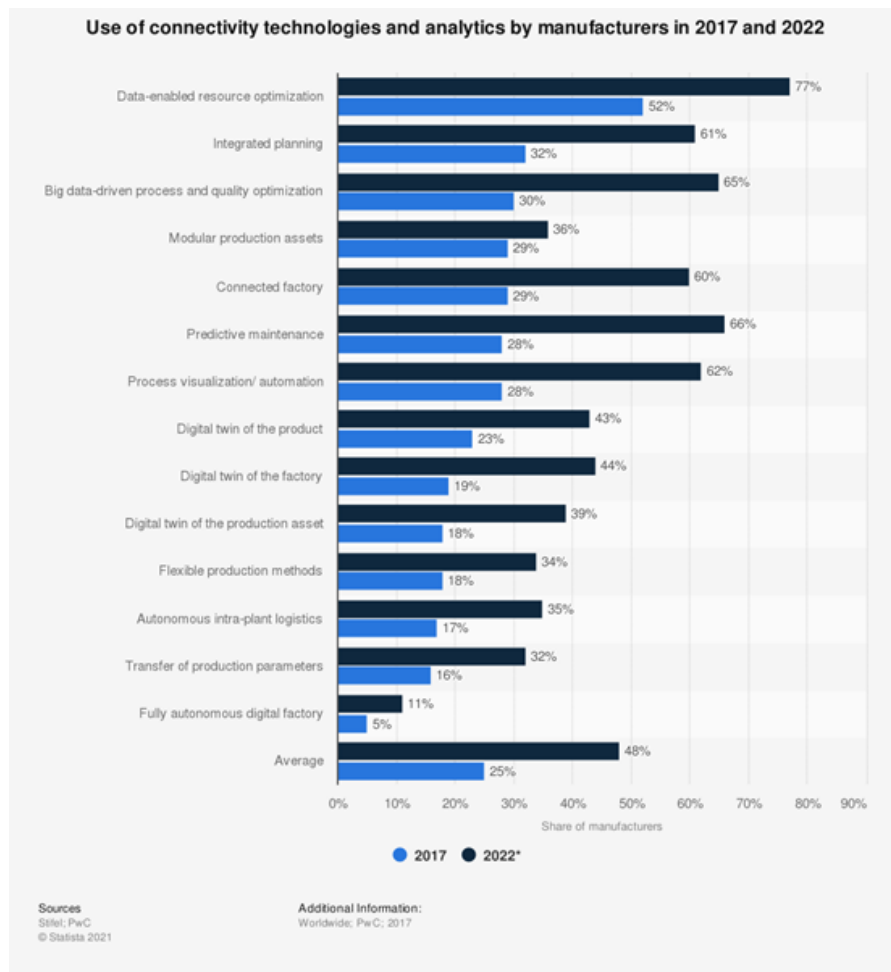


Figura 11 Uso di tecnologie di connessione e analisi da parte dei produttori nel 2017 e nel 2022⁸⁹.

Queste analisi mettono in luce che il Digital Twin riesce a stare al passo con i tempi, grazie al suo stretto legame con le tecnologie che caratterizzano l'Industria 4.0, e che, nonostante in Italia sia ancora poco considerato, il suo sviluppo dovrebbe aumentare nei prossimi anni.

4.2 Il futuro del Digital Twin

Considerando gli aspetti, trattati fino a questo punto, si può affermare che:

⁸⁹ (Ibidem).

1. Il Digital Twin costituisce un grande potenziale per raggiungere diversi obiettivi. Tra quest'ultimi, lo scopo attualmente più rilevante è quello di poter fabbricare e gestire la produzione in modo più efficiente, in linea con il concetto di Industria 4.0. Inoltre, le moderne tecnologie digitali permettono al Digital Twin di evolversi e migliorarsi continuamente. È dimostrato che all'aumentare degli investimenti nelle tecnologie all'interno delle aziende, aumenta anche la diffusione del Digital Twin.
2. Per definire gli obiettivi dei prossimi anni, l'Unione Europea ha elaborato una serie di documenti, che continuano a concentrarsi sullo sviluppo tecnologico, ma mettendo al primo posto gli aspetti legati a una migliore qualità di vita dell'essere umano, alla sostenibilità e all'inclusione sociale. È necessario investire nelle tecnologie per l'uomo e per l'ambiente, per giungere allo sviluppo di una nuova società (Società 5.0) e di una nuova industria (Industria 5.0), a partire dagli investimenti della NextGenerationEU.

Dati questi due punti, ci si pone una domanda: il Digital Twin rientra tra quelle tecnologie di frontiera che consentiranno di affrontare le sfide dettate dalle politiche europee?

Per trovare una risposta, sono stati selezionati tre settori che, grazie al Digital Twin, riescono a migliorarsi, senza tralasciare gli obiettivi delle politiche europee, ovvero sostenibilità, approccio umano-centrico e inclusione sociale.

5 Le città

Una fonte principale di inquinamento ambientale, in cui l'essere umano è a stretto contatto, sono le città. In questo settore, raggiungere obiettivi, come quelli delle politiche europee, che riguardano tanto l'uomo, quanto l'ambiente, sarebbe un importante passo in avanti.

L'urbanizzazione è tra gli argomenti più discussi a livello mondiale, a causa del suo continuo aumento⁹⁰. In tutti i paesi si prevede che, seppur con tassi diversi, le quote urbane aumenteranno nei prossimi decenni. Entro il 2050, si prevede che il 68% della popolazione mondiale vivrà in aree urbane; un aumento di più del 10% rispetto al 2016. A conferma di ciò, prima della seconda metà del XXI secolo, saranno davvero pochi i paesi in cui si prevede che le quote rurali saranno superiori a quelle urbane⁹¹.

Nonostante risulti che solamente lo 0,9% della superficie terrestre sia occupato da città (il 3% considerando solo la terraferma, la quale costituisce il 29% del mondo), gli edifici riescono ad occupare tra il 70% e l'80% di ogni città. Questo aspetto non è da sottovalutare, in quanto è stimato che in tali edifici una persona passa l'87% del tempo della propria vita⁹².

Osservando più da vicino l'impatto sulla sostenibilità, questi edifici, che rappresentano, quindi, una minima percentuale del pianeta, sono capaci di consumare il 75% dell'elettricità mondiale, il 40% dell'energia totale e il

⁹⁰ (Ritchie & Roser 2010).

⁹¹ (Ibidem).

⁹² (Dignan 2020, vol. 2, pp. 109-110).

25% della fornitura globale di acqua, oltre ad essere responsabili del 40% delle emissioni totali di gas serra e dei rifiuti⁹³.

Nel 2019 l'attenzione verso queste criticità è stata messa leggermente in secondo piano, a fronte del COVID-19 e dell'impatto che ha avuto sull'economia mondiale e sulle modalità in cui viviamo e lavoriamo. Tuttavia, è stata proprio l'emergenza, legata alla pandemia, a sottolineare l'importanza di una nuova gestione delle città, partendo da quelle sovrappopolate. Proprio quest'ultime rischiano di compromettere la sicurezza dei cittadini all'interno delle città.

In conclusione, se gli spazi urbani, e quindi anche gli edifici, fossero gestiti e resi più intelligenti (*smart city*), allora si troverebbero delle soluzioni per entrambe le problematiche (COVID-19 e sostenibilità)⁹⁴.

5.1 Smart City

Il Digital Twin in ambito urbano è spesso strettamente collegato con lo sviluppo delle *smart cities* perché permette di gestire le città in modo più intelligente. Tuttavia, ciò non significa che i due termini sono sinonimi, infatti il concetto di Digital Twin in ambito urbano va a inserirsi nell'idea più ampia di *smart city*.

Una *smart city* può essere descritta, genericamente, come un'area urbana, che utilizza le moderne tecnologie digitali per migliorare l'efficienza delle iniziative cittadine e la qualità dei servizi⁹⁵, forniti alla popolazione⁹⁶.

⁹³ (Ibidem).

⁹⁴ (Ibidem).

⁹⁵ Quality of Service (QoS)

⁹⁶ (europa.eu, *Smart Cities*).

Ampliando le prospettive, si può introdurre, in tale definizione generica, anche una crescita economica sostenibile e un'elevata qualità della vita⁹⁷. La ricercatrice italiana Annalisa Cocchia, sostiene che il motivo per cui sono nate le smart city è strettamente correlato con la richiesta globale dei cittadini (rivolta ai loro governi locali) di migliorare la propria qualità della vita, attraverso la progettazione innovativa e la ricostruzione degli spazi urbani⁹⁸.

Ad appoggiare questa affermazione c'è anche una ricerca⁹⁹ che raccoglie 7840 studi sulle smart cities, compiuti tra il 1990 e il 2019, in cui viene valorizzata anche la sostenibilità. Quest'ultima è indicata come un punto fondamentale, non solo per gli studiosi (principalmente di economia ambientale, della tecnologia e della scienza, della pianificazione urbana, dello sviluppo e della gestione), ma anche per i responsabili delle politiche urbane e per i professionisti.

Questo quadro permette di arrivare al collegamento chiave: le richieste dell'uomo si uniscono alla necessità di migliorare l'ambiente, attraverso progetti innovativi, come il Digital Twin.

In conclusione, è possibile considerare le smart cities come sistemi complessi che permettono un collegamento molto stretto tra persone, istituzioni, tecnologia, ambiente, edilizia e infrastrutture fisiche¹⁰⁰.

Le considerazioni, fatte finora sulle smart cities, danno un'ulteriore conferma sulla scelta di questo settore. Infatti, un Digital Twin urbano di una smart city potrebbe aiutare l'essere umano, senza tralasciare la sostenibilità e l'inclusione sociale.

⁹⁷ (Dignan 2020, vol. 2, p. 109).

⁹⁸ (Cocchia 2014, p.13).

⁹⁹ (Chuanjun 2020).

¹⁰⁰ (Dignan 2020, vol. 2, p. 109).

5.2 Smart City e Digital Twin

È stato affermato che il Digital Twin urbano, inteso come uno strumento per una progettualità e una gestione delle città, che rispetti sia le richieste sociali, che i requisiti dello sviluppo sostenibile, sia la strada più promettente da seguire, per affrontare le sfide urbane e demografiche del XXI secolo¹⁰¹.

Alcuni ricercatori hanno introdotto un paradigma di città intelligente, che può consentire una maggiore visibilità nelle interazioni uomo-infrastruttura-tecnologia delle città. Si identificano i vari stati in flusso spazio-temporale di una città e si integrano in una piattaforma di analisi dei dati, in cui si monitorano tali fluttuazioni in real-time, oltre a fare previsioni, grazie ai visori VR¹⁰² e al Digital Twin¹⁰³. Altri studiosi hanno presentato un concetto di Digital Twin per coinvolgere i cittadini nella pianificazione della città, basato sull'idea di accoppiare oggetti fisici con le loro controparti digitali¹⁰⁴.

Tuttavia, l'obiettivo di base del Digital Twin della città è raggiungere, nell'entità virtuale, somiglianze con il mondo reale a un livello di dettaglio sufficientemente accurato, in modo tale da affrontare problemi complessi. Infatti, il primo aspetto da considerare è che le città costituiscono il risultato di complesse interazioni tra molti fattori. Per tale motivo, le tecnologie chiave, integrate nel Digital Twin urbano, devono toccare tutti gli aspetti, in modo affidabile e accurato.

¹⁰¹ (Ibidem)

¹⁰² Virtual Reality

¹⁰³ (Mohammandi & Taylor 2017, pp.1-5)

¹⁰⁴ (Kent et al 2019, pp. 1014-1015)

In genere, un Digital Twin urbano si basa su una tecnologia di rilevamento e di mappatura, che costituisce la base per la raccolta dei dati statici degli edifici nelle città; la tecnologia BIM¹⁰⁵, per la gestione degli asset e delle infrastrutture delle città; e Internet of Things, per raccogliere dati dinamici e feedback in modo efficace.

Una volta che tutte queste tecnologie vengono implementate in un Digital Twin urbano, quest'ultimo potrà migliorare l'efficienza e la sostenibilità della logistica della città, del consumo energetico, delle comunicazioni, della pianificazione urbana, dei disastri ambientali, della costruzione di edifici e dei trasporti.

5.2.1 Rilevamento e mappatura

Grazie alle *tecnologie di rilevamento*, si può fare il rilevamento della topografia, dell'ambiente e della struttura spaziale della città. In questo gruppo, vengono considerate principalmente quattro tecnologie: fotografia inclinata, UAV¹⁰⁶, scansione laser 3D e GPS¹⁰⁷.

Grazie alla *tecnologia di mappatura*, invece, si possono mappare le informazioni della tecnologia di rilevamento in un sistema integrato, basato su *Geographic Information System*¹⁰⁸. In questa parte, si sottolineano due tecnologie: la tecnologia di elaborazione di dati geografici multi-sorgente e la tecnologia di ricostruzione 3D del mondo reale.

Mentre la tecnologia di elaborazione di dati geografici multi-sorgente è la base della tecnologia di mappatura, la tecnologia di ricostruzione 3D del mondo reale ne costituisce il punto chiave. Questa tecnologia ottiene

¹⁰⁵ *Building Information Model*

¹⁰⁶ *unmanned aerial vehicle*, ovvero velivolo senza pilota. (Enciclopedia Treccani, UAV)

¹⁰⁷ *Global Positioning System*

¹⁰⁸ Un sistema spaziale che crea, gestisce, analizza e mappa tutti i tipi di dati (GIS).

nuvole di punti 3D, modelli 3D e immagini reali attraverso processi automatizzati. L'accuratezza della posizione e la precisione geometrica evidenziano questa tecnologia rispetto alle altre.

5.2.2 BIM

Sono stati condotti molti studi per creare il BIM come infrastruttura digitale per supportare vari programmi di smart city¹⁰⁹. Tale tecnologia fornisce una rappresentazione della città e consente di realizzare un modello informativo digitale. Il Digital Twin urbano, oltre a mappare lo spazio urbano in una città virtuale, può anche modificare, duplicare e ricostruire tale città senza limitazioni.

Grazie alla *tecnologia dell'identità*¹¹⁰, il sistema BIM può riconoscere ogni entità utilizzando diversi approcci, come la tecnologia di rilevamento e mappatura, descritta precedentemente. Quindi, ad esempio, si possono integrare i dati delle reti elettriche, idriche e fognarie, che permettono di monitorare i consumi della città. Il modello può essere anche arricchito con i dati provenienti da una rete di sensori, che rilevano costantemente misure relative all'aria, all'acqua, al calore e al traffico, permettendo, così, la creazione di serie storiche e modelli previsionali molto attendibili.

I dati, provenienti dal GIS e dalla sensoristica, permettono di acquisire una maggiore consapevolezza del contesto ambientale e territoriale. Tale consapevolezza consente una comprensione immediata degli impatti positivi o negativi di progetti, prima che questi vengano realizzati.

¹⁰⁹ (Chen et al 2018, vol. 93, pp. 22-34)

¹¹⁰ Certifica l'identificazione univoca di ogni entità fisica nella città con la rispettiva *identificazione digitale*. La tecnologia dell'identità costituisce l'unica identificazione nel sistema BIM. (ScienceDirect, *Building Information Modeling - an overview*).

Infine, su modelli 3D virtuali, che sono stati creati attraverso il processo BIM e monitorati in tempo reale, è possibile adottare progetti e servizi IoT.

5.2.3 Internet of Things

Dato che, creare una città digitale, che interagisce con il mondo fisico, è un punto fondamentale per un Digital Twin urbano, è importante stabilire un sistema di percezione IoT a tempo pieno, con una precisione multidimensionale e multi-livello.

Negli ultimi anni, l'IoT ha permesso di monitorare e gestire i servizi urbani di *bike sharing* e parcheggio pubblico, ma anche aspetti più sostenibili, come i consumi idrici, l'inquinamento atmosferico e acustico e il traffico¹¹¹.

Il Digital Twin urbano potrebbe quindi aggiornarsi in base al flusso continuo di informazioni, implementando continuamente i possibili scenari, per fornire un supporto rilevante per le più svariate operazioni, orientate alla gestione smart dell'ambiente costruito. Ciò è possibile anche grazie all'integrazione di sistemi di Intelligenza Artificiale, che possano contribuire all'ottimizzazione funzionale delle attività, interconnesse al ciclo di vita degli immobili e delle infrastrutture. Più dati vengono raccolti dai sensori dell'IoT, maggiormente aumenteranno le ricerche finalizzate allo sviluppo di algoritmi avanzati dell'Intelligenza Artificiale¹¹².

È stato presentato anche un *framework*, dal nome *mySMARTlife*¹¹³, che permette di creare un Digital Twin della città, grazie ai progressi dell'Internet of Things. Tale framework aiuta principalmente per la

¹¹¹ (Vojnovic 2014, vol. 41, pp. S30-S44).

¹¹² (Mohammandi & Taylor 2017, pp.1-5; Pargmann et al 2018, pp. 233-237; Ruohomaki et al 2018, pp. 155-161).

¹¹³ (mySMARTlife, *Cities – MySMARTLife*)

pianificazione urbana, ma può essere usato anche per il consumo energetico, grazie alla capacità del Digital Twin di monitorare e confrontare l'impiego di energia in base all'ambiente e all'impatto umano¹¹⁴.

In sintesi, si può affermare che il Digital Twin è un potenziale prezioso per una smart city. Esso contribuisce a raccogliere tutte le informazioni e a rielaborarle, per fare in modo che siano facilmente fruibili. In questo modo, una città gestisce con più semplicità aspetti legati alla sostenibilità, evitando grosse spese economiche. Tutte le amministrazioni cittadine dovrebbero poter occuparsi della gestione della città in questo modo, applicando le strategie migliori.

Con il Digital Twin, riprodurre virtualmente un'area urbana nel settore ambientale, comporta costruire quartieri alla maggiore esposizione dell'energia solare, portando anche vantaggi nel risparmio energetico, dove un Digital Twin urbano, progettando edifici intelligenti, potrebbe gestire l'energia in base all'occupazione.

¹¹⁴ (Ruohomaki et al 2018, pp. 155-161)

6 Esempi di Digital Twin urbani

Sono stati selezionati alcuni esempi di smart city, basate su un Digital Twin, con lo scopo di approfondire alcuni aspetti, precedentemente descritti in modo generale. Tali aspetti, presi in considerazione per ciascun caso, non riguardano tanto gli aspetti tecnici di un Digital Twin, quanto le funzionalità di quest'ultimo, che più si avvicinano agli obiettivi delle politiche europee.

Le prime due città, prese in analisi, sono Singapore e Zurigo, le quali sono arrivate rispettivamente al primo e al secondo posto nella classifica di *Smart City Index*.¹¹⁵ Inoltre, mentre Singapore è caratterizzata da molteplici funzionalità, che le permettono di essere un punto di riferimento per altre città¹¹⁶, Zurigo ha un buon quadro di approfondimento sugli *Open Data*, che hanno consentito lo sviluppo di diverse applicazioni, tra le quali una in particolare, in cui i cittadini possono partecipare attivamente.

Kalasadama, un distretto di Helsinki, è la terza città selezionata, che si evidenzia principalmente per due pregi: il primo riguarda la partecipazione dei cittadini per la selezione delle informazioni, da visualizzare su una piattaforma web, il secondo interessa alcune simulazioni ambientali, che permettono di rimanere in linea con la sostenibilità.

¹¹⁵ (IMD business school, *Data shows effects of COVID-19 and climate change on citizens' perceptions of how smart their cities are*).

¹¹⁶ (White et al 2021, vol. 110)

Già da queste premesse, si può notare come il Digital Twin possa effettivamente rientrare tra quelle tecnologie, che riescono a raggiungere gli obiettivi delle politiche europee.

6.1 Singapore

*Virtual Singapore*¹¹⁷ è il nome attribuito alla replica digitale di Singapore, composta da un modello dinamico 3D della città e da una piattaforma di dati collaborativi, che comprende anche le mappe tridimensionali.

La piattaforma digitale (Figura 12 *Virtual Singapore* è stata creata per essere destinata a qualsiasi persona, anche se, alla fine, sono i ricercatori a poterla usare al meglio, sviluppando strumenti più complessi e applicazioni, che testano progetti, servizi, pianificazioni e processi decisionali.

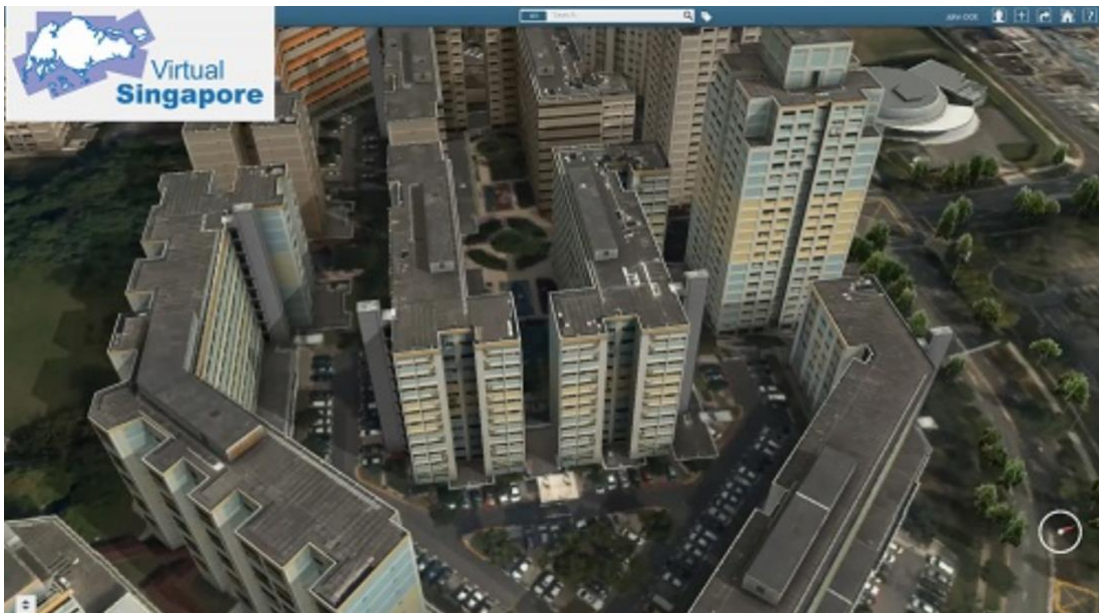


Figura 12 *Virtual Singapore*¹¹⁸.

¹¹⁷ (National Research Foundation, *Virtual Singapore*).

¹¹⁸ (Ibidem).

Dal 2018, infatti, Singapore ha la sua versione virtuale, caratterizzata, non solo dalla modellazione semantica 3D della città, ma anche dai dati del trasporto pubblico, del consumo elettrico, dei componenti degli edifici e delle infrastrutture. Inoltre, sono stati inseriti anche i dati demografici, del clima e del traffico, utili sia in fase di pianificazione, in ottica di sviluppo sostenibile urbano, sia per simulazioni di emergenza. Tutti questi dati permettono di fare analisi, utili per migliorare l'ambiente e la qualità di vita dell'essere umano. Per questo sono stati fatti, ad esempio, delle analisi di traffico e dei modelli di movimento pedonale, in modo tale da rendere il trasporto più efficiente e per apportare modifiche, in base ai requisiti del mondo reale.¹¹⁹

La città virtuale di Singapore fa parte del IDD¹²⁰, un progetto sviluppato dalla *Building and Construction Authority* di Singapore, la quale specifica che il suo principale scopo è quello di integrare i vari processi lavorativi e creare una connessione tra le parti, che lavorano su un determinato progetto, usando le tecnologie digitali¹²¹.

L'IDD è montato sul BIM, il quale consente, alle parti interessate, di preparare, sui gemelli fisici, ricalibrizioni, modificandole digitalmente in tempo reale. Tutti gli elementi fisici aggiornati vengono testati su un modello digitale 3D (*CityGML*) che consente sia di tracciare e di analizzare il lavoro svolto, sia di prevenire possibili malfunzionamenti¹²².

Infatti, il punto centrale di Virtual Singapore è la visualizzazione e creazione del modello 3D. Essa è stata sviluppata sulla base di immagini e dati geometrici raccolti da fonti diverse (agenzie pubbliche, piattaforme geospaziali e non) che si integrano con dati e informazioni statiche,

¹¹⁹ (Ibidem).

¹²⁰ *Integrated Digital Delivery*

¹²¹ (BCA Corp, *Integrated Digital Delivery*).

¹²² (National Research Foundation, *Virtual Singapore*).

dinamiche e in tempo reale sulla città (es. dati demografici, movimento, clima)¹²³.

6.1.1 Funzionalità di Virtual Singapore

Questa ricca quantità e varietà di dati rende attualmente Virtual Singapore l'esempio più avanzato di Digital Twin urbano, basato su quattro funzionalità principali:

1. **Sperimentazione virtuale:** la piattaforma permette sia di analizzare e apportare modifiche nella controparte digitale, sia di osservarne i risultati. Ad esempio, si possono esaminare le aree di copertura delle reti 3G/4G, fornire una visualizzazione realistica delle zone con scarsa copertura ed evidenziare quelle località che possono essere migliorate nel modello 3D della città;
2. **Banco di prova virtuale:** è possibile, per esempio, calcolare le procedure d'evacuazione durante un'emergenza o simulare la dispersione della folla. Per questo, si parla di una piattaforma di prova per convalidare la fornitura di servizi;
3. **Pianificazione e processo decisionale:** la piattaforma è multifunzionale e integrata per lo sviluppo di applicazioni analitiche. Ad esempio, sono stati creati modelli di movimento dei pedoni e un'applicazione per l'analisi dei flussi di trasporto;
4. **Ricerca e sviluppo:** grazie ai dati completamente accessibili, i ricercatori (e non solo) hanno l'opportunità di innovare e di sviluppare nuove tecnologie o funzionalità.

Di conseguenza, gli usi di Virtual Singapore sono correlati alle caratteristiche sopra elencate. Un esempio, che si può aggiungere, per confermare l'utilità di Virtual Singapore come strumento d'aiuto per la

¹²³ (Ibidem).

comunità, è la possibilità di migliorare l'accessibilità di una zona, potendo adoperare la mappa 3D, che mostra tutti i dettagli di un'area, compresi i corpi idrici, la vegetazione e le infrastrutture di trasporto.

Spostando l'attenzione su un punto di vista più urbanistico, grazie alle informazioni sulle oscillazioni giornaliere della temperatura e della luce solare, gli esperti degli spazi urbani hanno la possibilità di visualizzare le conseguenze della costruzione di nuovi edifici/installazioni, oppure fare delle simulazioni con le mappe di colore e rumore. Quindi gli urbanisti possono, ad esempio, usare Virtual Singapore per filtrare rapidamente gli elementi, adatti all'installazione di pannelli solari, in base a parametri preimpostati (es. il numero dei piani o il tipo del tetto).

Rimanendo sempre in un contesto urbano, è stato dato particolare rilievo alla produzione di energia solare. Le informazioni sugli edifici, unite alla mappa della luce solare, consentono agli urbanisti di analizzare i complessi edili e valutare quali sono i più adatti per l'installazione di pannelli solari. Inoltre, è possibile calcolare i risparmi energetici, i costi e la quantità di energia prodotta in una giornata tipo.

Non sono solo gli urbanisti a trarre vantaggio dal Digital Twin, il quale può essere considerato la macchina centrale di Virtual Singapore. Infatti, più figure sono entrante in campo, per creare Virtual Singapore, e molte altre possono intervenire (dai ricercatori alle aziende) con il grande obiettivo di arrivare ai singoli individui, che popolano la città stessa. Infatti, gli abitanti di Singapore, da questa piattaforma, possono trarre vantaggi sia a breve termine (es. trovare la fermata dell'autobus più vicina, le piste ciclabili, i percorsi senza barriere per i disabili) sia a lungo termine (tenere traccia degli sviluppi della pianificazione urbana eseguiti dalle

autorità, consentendo così maggiore trasparenza e una migliore comunicazione tra le parti)¹²⁴.

6.2 Zurigo

Una stima ha previsto che, entro il 2040, circa 520.000 persone vivranno nella città di Zurigo, ovvero quasi il doppio di quelle presenti nel 2019. L'80% di questo incremento avverrà negli spazi urbani. Quest'ultimo dato ha suscitato molta preoccupazione nell'amministrazione cittadina, la quale, già a partire dal 2018, ha mostrato interesse verso la trasformazione digitale, vedendola come un mezzo vantaggioso, non solo per sé stessa, ma anche per la popolazione e per le imprese. Così, si è iniziato a parlare di *Smart City Zurich*.

L'amministrazione cittadina è stata la prima a sottolineare i valori che stanno dietro la parola *smart*, ovvero la capacità di connettere persone, organizzazioni e infrastrutture, in modo da creare benefici sociali, ecologici ed economici. Inoltre, aggiunge che la digitalizzazione di dati, i sensori e le applicazioni permettono di trovare soluzioni nuove e più efficienti, sia per gli utenti delle infrastrutture urbane, sia per chi lavora all'interno della città. Si tratta di un'opportunità per far partecipare i cittadini e per renderli più vicini all'amministrazione¹²⁵.

¹²⁴ (techDetector, *Digital Twins: The Link Towards Sustainability*).

¹²⁵ (Hürzeler & Schrotter 2020, vol. 88, pp. 99-112).

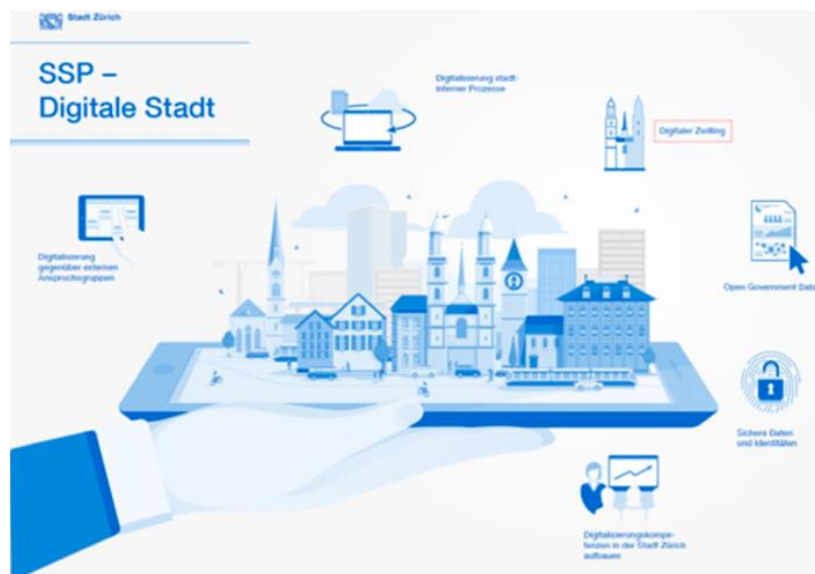


Figura 13 Il programma della strategia Digital City¹²⁶.

Tra i vari progetti presi in considerazione per Smart City Zurich (Figura 13), è stato considerato anche il Digital Twin, con l'obiettivo di rappresentare digitalmente lo spazio urbano e fare situazioni *what-if*¹²⁷, in modo tale da migliorare la pianificazione urbana, tenendo in considerazione, in primis, il cambiamento climatico.

In questo progetto, si sottolinea l'importanza del Digital Twin nella società e la sua capacità di essere un ponte, non solo tra il mondo fisico e quello virtuale, ma anche tra aziende, istituti di ricerca, e così via. Infatti, è stata proprio la collaborazione di più enti (ETH Zurich¹²⁸, Fachhochschule Nordwestschweiz¹²⁹, TU Munich¹³⁰, GIS Competence Centre of the Department of Building and Planning e GIS Centre for

¹²⁶ (Hürzeler & Schrotter 2020, vol. 88, p. 100).

¹²⁷ Simulare diversi scenari per identificare le migliori azioni da applicare successivamente sul gemello fisico.

¹²⁸ <https://ethz.ch/en.html>

¹²⁹ <https://www.fhnw.ch/de/>

¹³⁰ <https://www.tum.de/>

Geomatics + Surveying) a creare nel 2011 il primo modello di città 3D, che sarà parte integrante del Digital Twin.

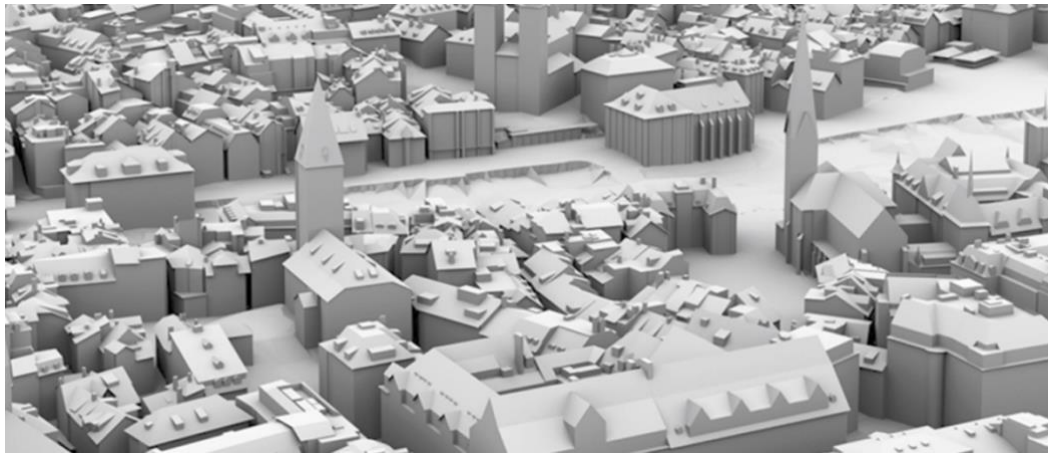


Figura 14 Modello 3D della città¹³¹.

Si inizia a parlare di Digital Twin nel momento in cui è avvenuta l'integrazione dell'infrastruttura delle informazioni, relative al *modello digitale dei dati spaziali*¹³² di Zurigo, con il modello 3D, che costituisce la base per la connessione di tutti i dati. Di conseguenza, i processi, l'acquisizione e l'aggiornamento dei dati sono completamente descritti per i dati spaziali 3D¹³³, i modelli e i metadati¹³⁴. Ciò implica che, anche i processi della misurazione catastale e dell'ingegneria, sono stati elaborati per adattarsi al modello 3D.

Oltre alla descrizione dettagliata dei dati spaziali e dei loro modelli (tramite i metadati), viene rappresentato anche il ciclo di vita di tali dati. In questo modo, lo sviluppo di diversi componenti del Digital Twin (edifici, strade, etc.) viene pianificato e aggiornato digitalmente. Tali

¹³¹ (Hürzeler & Schrotter 2020, vol. 88, p. 101).

¹³²Rappresentazioni della realtà, che determinano la struttura e il contenuto, indipendentemente da uno specifico sistema di dati spaziali.

¹³³L'estensione e le caratteristiche di determinati spazi e oggetti. In particolare, la loro ubicazione, condizione ed uso e relazioni giuridiche, con un determinato riferimento temporale.

¹³⁴Una componente essenziale per stabilire e gestire un'infrastruttura di geodati.

aggiornamenti possono avvenire a brevi intervalli di tempo, riuscendo ad essere d'aiuto, per esempio, al settore edilizio e immobiliare. Infatti, in tali campi, si può usare il Digital Twin per mappare i processi di costruzione e, successivamente, di manutenzione, facendo uso di dati spaziali 3D e di un modello di edificio, replicato digitalmente. Tale modello mostra la struttura e il comportamento dell'edificio, ma anche le connessioni interattive¹³⁵ con l'oggetto fisico.

Dopo aver creato ed ampliato un'infrastruttura di dati spaziali urbani SDI¹³⁶, tramite una cooperazione tra *GIS Stadt Zürich*¹³⁷ e altri partner¹³⁸, nel Digital Twin si possono aggiungere diversi progetti. Ad esempio, sono stati integrati alcuni progetti immobiliari in fase di pianificazione o scenari di sviluppo urbano.

Tutto ciò costituisce la base per varie analisi e calcoli per diversi aspetti, tra i quali la propagazione del rumore, le analisi del potenziale solare e le simulazioni delle inondazioni¹³⁹.

Per acquisire i dati in modo efficiente e per ridurre la necessità di fare continui controlli, lo spazio pubblico della città di Zurigo è stato catturato in tre dimensioni, integrato nel Digital Twin e reso disponibile online. Nell'autunno 2020 è stato messo a disposizione di tutti i dipendenti comunali un servizio di immagini, in cui sarà possibile rivivere lo spazio stradale in modo digitale. Inoltre, sarà possibile selezionare altri oggetti in 3D, misurarli e visualizzarli, con le loro rispettive informazioni¹⁴⁰.

¹³⁵ Le connessioni interattive trasmettono informazioni come lo stato, l'uso o i dati di analisi dell'oggetto fisico

¹³⁶ Spatial Data Infrastructure, ovvero un quadro di politiche, accordi istituzionali, tecnologie, dati e persone che consente la condivisione e l'uso efficace delle informazioni geografiche standardizzando formati e protocolli per l'accesso e l'interoperabilità.

¹³⁷ GIS di Zurigo

¹³⁸ Venticinque servizi della città di Zurigo (Schrotter & Hürzeler 2020, vol. 88).

¹³⁹ (Schrotter & Hürzeler 2020, vol. 88).

¹⁴⁰ (Ibidem).

Innovativa è stata la collaborazione con l'archeologia subacquea, che ha fornito i dati spaziali 3D storici. In questo modo, la storia della città può essere vissuta interattivamente in diversi periodi temporali: dalle prime palafitte della Zurigo romana, passando dal Medioevo, fino ai giorni d'oggi. Questo aspetto potrebbe suscitare l'interesse di molti esperti della storia, che vanno ad ampliare il raggio di figure professionali, che ruotano intorno al Digital Twin.

6.2.1 Open Data

Per far avvicinare più persone possibili al Digital Twin, è necessario che i dataset siano resi disponibili come *Open Government Data*¹⁴¹. Questo permette di creare nuovi progetti e modelli di business, come *startup*¹⁴².

Un esempio di applicazione, reso possibile grazie agli Open Government Data, è il gioco *(re)format Z*:¹⁴³ basato sulla Riforma a Zurigo (Figura 15). Tale gioco distopico della città ha suscitato l'interesse dei giovani su un argomento storico. Per completare il progetto "(re)format Z:" in un breve lasso di tempo e per garantire una rappresentazione accurata della città, sono stati utilizzati gli edifici 3D di Zurigo. Nel giro di poche settimane il gioco ha avuto molto successo¹⁴⁴.

Questo è un esempio di come, a partire da un Digital Twin, c'è stato un processo di inclusione sociale, che è uno degli obiettivi delle politiche europee.

¹⁴¹ Tutte le attività dei Governi e delle Amministrazioni dello Stato devono essere open e disponibili per favorire azioni efficaci e garantire un controllo diffuso sulla gestione della cosa pubblica.

¹⁴²Fase iniziale di avvio delle attività di una nuova impresa, di un'impresa appena costituita o di un'impresa che si è appena quotata in borsa. (Enciclopedia Treccani, *startup*).

¹⁴³ (Blindflug Studios, *(re)format Z: - a game by Blindflug Studios*).

¹⁴⁴ (Schrotter & Hürzeler 2020, vol. 88).



Figura 15 Estratti dal gioco "re(format) Z:" e strumenti di sviluppo¹⁴⁵.

6.3 Le applicazioni di Virtual Zurigo

Zurigo rientra tra quelle città, che più hanno investito nella propria virtualizzazione, cercando il più possibile di migliorare le situazioni relative all'ambiente (analisi del rumore, dell'inquinamento atmosferico e la modellazione delle radiazioni dei telefoni cellulari), all'energia (analisi dell'energia solare), alla pianificazione urbana (visualizzazione di progetti edilizi, analisi delle ombre e della visibilità), senza tralasciare altri settori (Figura 16).

¹⁴⁵ (Blindflug Studios, *(re)format Z: - a game by Blindflug Studios*)

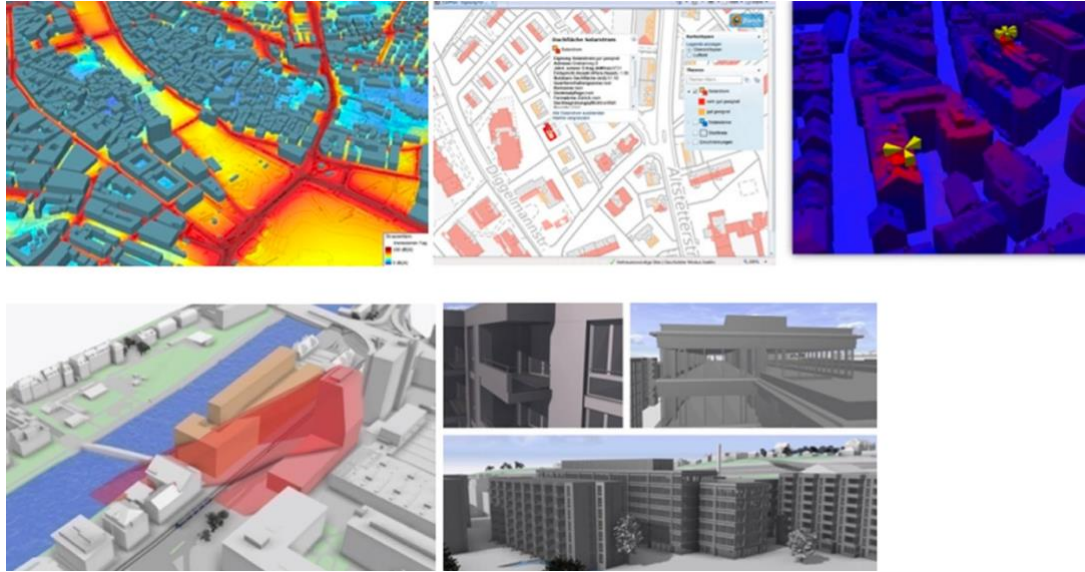


Figura 16 Andando da sinistra verso destra e partendo dall'angolo in alto a sinistra le applicazioni riguardano: rumore, inquinamento dell'aria, radiazioni dei cellulari, energia solare, visualizzazione dei progetti di costruzione¹⁴⁶.

Fino al 2020 le applicazioni, implementate su Virtual Zurigo, sono cinque e verranno descritte, in linea generale, per dimostrare che un Digital Twin urbano può rientrare tra le tecnologie, destinate a migliorare la società. Alcune applicazioni si avvicinano maggiormente all'inclusione sociale, altre alla sostenibilità, altri ancora sottolineano l'importanza del Digital Twin come mezzo di aiuto per l'uomo.

6.3.1 Piano di sviluppo comunale

La prima applicazione è stata pensata per cercare di rallentare l'urbanizzazione. Per questo, è stato sviluppato un piano comunale che riguarda edifici, infrastrutture e spazi verdi.

Per raggiungere questo obiettivo, è stata creata un'applicazione web interattiva, che visualizza il modello 3D, composto da sotto-modelli 3D di diverse zone di Zurigo. Questi sotto-modelli possono contare sui dati del Digital Twin, per quanto riguarda lo sviluppo edilizio attuale.

¹⁴⁶ (Hürzeler & Schrotter 2020, vol. 88, p. 106).

L'applicazione ha permesso, ai pianificatori dell'amministrazione cittadina, di fare un confronto dello stato attuale con altri progetti in fase di progettazione, per poi sceglierne il migliore¹⁴⁷.

6.3.2 Pianificazione dei grattacieli

Con lo stesso intento dell'applicazione precedente, l'Ufficio di Pianificazione Urbana ha creato un'applicazione interattiva 3D su Internet¹⁴⁸. Essa visualizza tutti i grattacieli, esistenti e pianificati della città, in un modello spazio-temporale. La base di dati più importante dell'applicazione è proprio il Digital Twin, il quale fornisce una rappresentazione spaziale dei grattacieli in 3D. Grazie ai dati storici degli edifici, è stato anche possibile rendere disponibili gli anni di costruzione di tutti i grattacieli¹⁴⁹.

6.3.3 Clima urbano

Secondo il *Climate Scenarios for Switzerland*¹⁵⁰, per la città di Zurigo si prevede una media di 21 giorni di calore nel 2060, in confronto ai 6 del 2019. Questa situazione, in aggiunta alle notti tropicali, può portare a problemi di salute, soprattutto a gruppi sensibili, come gli anziani, le persone deboli e i bambini. Per tali motivi ed altri (es. rallentare il riscaldamento globale/locale), l'adattamento al clima è una delle sfide più importanti per lo sviluppo urbano.

Nel progetto *Pianificazione settoriale della riduzione del calore*, vengono analizzati gli effetti degli edifici, in fase di pianificazione, sui flussi di aria fredda, in determinate aree urbane. L'analisi è stata effettuata con un modello 3D, basato su GIS, che è stato costruito con vari dati del Digital

¹⁴⁷ (Hürzeler & Schrotter 2020, vol. 88).

¹⁴⁸ <https://hochhaeuser.stadt-zuerich.ch/>

¹⁴⁹ (Stadt Zürich 2018, vol. 88).

¹⁵⁰ (NCCS, *CH2018 technical report*).

Twin (terreno, edifici esistenti e pianificati, posizioni degli alberi). Tale analisi hanno dimostrato che gli edifici influenzano i fattori climatici, come la temperatura (Figura 17), il vento e il flusso di aria fredda¹⁵¹.

Grazie ai dati del Digital Twin, le questioni climatiche possono essere meglio integrate nel processo decisionale di pianificazione. Infatti, insieme ad altri elementi come il rumore, il traffico e l'urbanistica, il clima è diventato un fattore determinante per le decisioni nelle procedure di pianificazione.

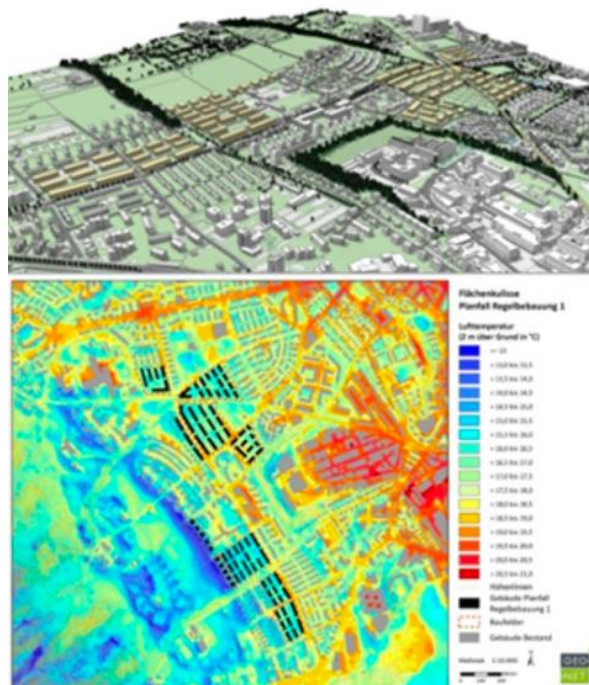


Figura 17 Analisi della temperatura basata sullo studio degli edifici¹⁵².

6.3.4 Concorsi di architettura

Nell'architettura e nell'urbanistica, da diversi anni, si tengono a Zurigo concorsi per trovare il progetto ottimale di pianificazione urbana. Tra

¹⁵¹ (Stadt Zürich 2018, vol. 88).

¹⁵² (Hürzeler & Schrotter 2020, vol. 88, p. 108).

questi, il concorso di architettura ha contribuito a rendere Zurigo una città con una cultura edilizia elevata e sostenibile.

Tali concorsi si sono svolti per anni in forma analogica, anche se gli studi di architettura partecipanti disegnano i loro progetti digitalmente al computer, per poi presentarli stampati insieme al modello. La valutazione dei progetti, da parte della giuria, si basa, infatti, esclusivamente sui progetti stampati su carta e sui modelli fisici. Con la continua digitalizzazione dei processi amministrativi e dei metodi lavorativi, questo flusso di processo, completamente analogico, viene messo in discussione da molti partecipanti¹⁵³.

L'Ufficio per la Costruzione di Edifici sta portando avanti progetti verso la digitalizzazione nella fase del processo di valutazione. Due nuovi strumenti digitali, basati sul Digital Twin, saranno di supporto nella valutazione dei progetti presentati. Il primo strumento riguarda da vicino i partecipanti, i quali avranno a disposizione una mappa 3D basata sul web, in cui il modello 3D, del progetto proposto, sarà controllato e presentato successivamente. Tale mappa 3D verrà poi proiettata su uno schermo per la valutazione. La giuria, inoltre, potrà visualizzare i singoli modelli insieme, cambiare le prospettive e le scale, e mettere a confronto i progetti in modo sincrono.

Il secondo strumento digitale è un'applicazione di Realtà Aumentata. Con l'aiuto degli occhiali HoloLens AR¹⁵⁴, i progetti e il loro ambiente esteso sono proiettati dal Digital Twin, come un ologramma 3D interattivo. Si possono confrontare i disegni e simulare le ombre, attivare i dati spaziali, modificare le scale e generare sezioni trasversali. L'applicazione AR permette anche la visualizzazione delle bozze sul posto in scala 1:1

¹⁵³ (Ibidem).

¹⁵⁴ <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>

(Figura 18Figura 18 Applicazione di Realtà Aumentata con il design di un concorso di architettura). Infine, il progetto vincitore viene integrato nel Digital Twin¹⁵⁵.



Figura 18 Applicazione di Realtà Aumentata con il design di un concorso di architettura¹⁵⁶

In questa quarta applicazione, i progetti vengono, prima pianificati nel digitale, e poi costruiti nella realtà, evitando molti sprechi. Inoltre, si possono tenere in considerazione diversi aspetti sostenibili, che altrimenti sarebbero rimasti in secondo piano.

6.3.5 Partecipazione digitale

Il Digital Twin permette alla popolazione di partecipare attivamente nella pianificazione urbana, migliorando l'inclusione sociale. Una di queste possibilità è il videogioco *Minecraft*, dove i giocatori creano il loro mondo, usando diversi dadi. Il gioco è già stato usato in altre città per coinvolgere principalmente i giovani¹⁵⁷. Nei laboratori, nelle scuole o a casa, i ragazzi sviluppano le loro idee e le presentano alla città. In via sperimentale, l'Ufficio per lo Sviluppo Urbano¹⁵⁸ ha trasformato parti di

¹⁵⁵ (Hürzeler & Schrotter 2020, vol. 88, p. 109).

¹⁵⁶ (Ibidem).

¹⁵⁷ (Ibidem)

¹⁵⁸ <https://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/staedtebau/afs.html>

Zurigo in un mondo Minecraft, per testare la realizzazione di future procedure di partecipazione (Figura 19).



Figura 19 Minecraft della sezione di Zurigo¹⁵⁹.

Uno strumento 3D interattivo basato sul web è stato usato per testare un'altra forma di partecipazione digitale all'interno della città. Oltre alle solite funzioni di navigazione, l'applicazione ha molti semplici strumenti di progettazione. All'interno dell'area di pianificazione, gli utenti possono progettare le loro idee, disegnando facilmente diversi elementi, come edifici, aree di sviluppo, spazi verdi ed alberi, per poi inviare il progetto finito all'amministrazione cittadina.

Un'analisi di prova su persone, senza un background di pianificazione e senza grandi competenze digitali, ha dimostrato che lo strumento è facile e intuitivo da usare (nonostante la sua terza dimensione) e permette di approcciarsi, in modo giocoso, al tema della pianificazione urbana. Un altro vantaggio di questo strumento è che, rispetto alle procedure

¹⁵⁹ (Hürzeler & Schrotter 2020, vol. 88, p. 110).

convenzionali di partecipazione, dove è richiesta la presenza a un evento, organizzato dall'amministrazione cittadina, in un determinato momento, in questo caso si può intervenire comodamente da casa con un computer collegato ad Internet¹⁶⁰.

6.4 Helsinki

Un distretto della città di Helsinki è stato premiato nella categoria delle *Digital Cities*, durante *The Year In Infrastructure 2020*, una conferenza che riconosce i migliori risultati nell'edilizia urbana e nelle infrastrutture a livello globale¹⁶¹.

A partire dal 2016, Kalasatama (il nome del distretto di Helsinki) ha iniziato a definire gli obiettivi, che dovevano essere raggiunti con il *Progetto Kalasatama*, il quale avrebbe reso questa città una *super smart city*.

In generale, l'obiettivo di base del progetto è di produrre e di condividere i modelli digitali di alta qualità dell'area di Kalasatama. I modelli servono come piattaforma per progettare, testare, applicare e assistere l'intero ciclo di vita dell'ambiente costruito.

Lo sviluppo del progetto è stato diviso in cinque sotto-obiettivi, tra i quali il primo corrisponde a quello di base, ovvero alla creazione di modelli. I restanti quattro sono:

1. condividere i *Twin Models* creati come Open Data;
2. i *Twin Models* come piattaforma di sviluppo smart;
3. i *Twin Models* come piattaforma di simulazione;

¹⁶⁰ (Stadt Zürich 2018, vol. 88).

¹⁶¹ <https://www.goodnewsfinland.com/helsinki-wins-at-oscar-of-urban-construction/>

4. i *Twin Models* nei processi cittadini¹⁶².

Di questi obiettivi, sono stati analizzati nel dettaglio solamente due, perché sono quelli che meglio dimostrano quanto il Digital Twin sia in linea con i punti delle politiche europee.

6.4.1 Condividere i Twin Models come Open Data

Attualmente i dataset dei *Twin Models* creati sono resi disponibili sotto licenza CC BY 4.0¹⁶³, in modo semplice e intuitivo, per permettere a chiunque di essere utilizzati e ampliati al meglio.

Sia per una motivazione analitica, sia storica, si vuole sottolineare che, all'interno del sito di *Helsinki Region Infoshare*¹⁶⁴, è presente una trasparente cronologia modifiche che riguarda sia i file caricati sia le correzioni, effettuate all'interno dei dataset stessi (Figura 20).

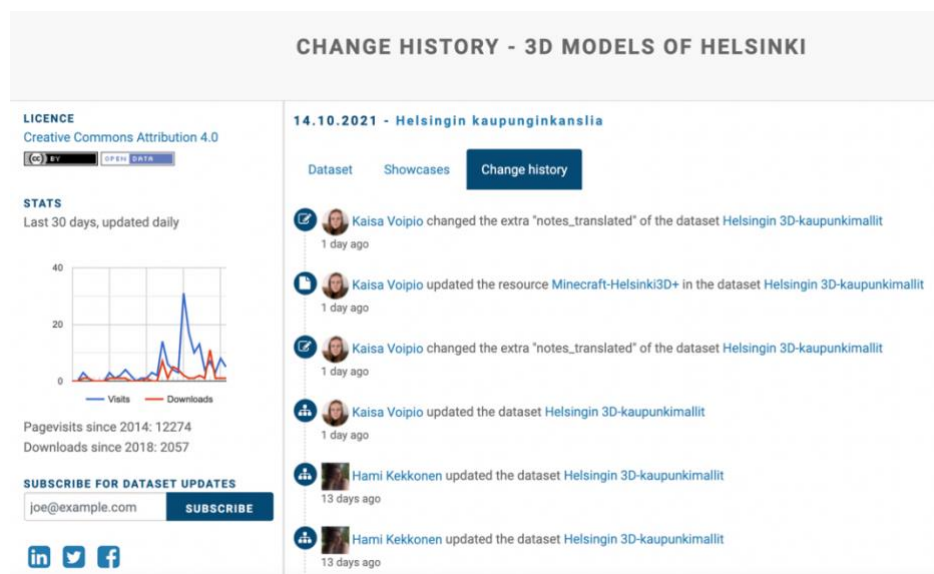


Figura 20 Sito web “3D MODELS OF HELSINKI”, sezione “Change history”¹⁶⁵.

¹⁶²(Airaksinen, et al., 2019, p. 4).

¹⁶³ *Creative Commons Attribution 4.0*

¹⁶⁴ (Helsinki Region Infoshare, *3D models of Helsinki*).

¹⁶⁵ (Ibidem).

6.4.2 I Twin Models come piattaforma di sviluppo smart

Questo è il punto principale del progetto, in quanto si cercano nuove soluzioni intelligenti per permettere a chiunque di essere partecipi e per rendere la città più sostenibile.

Non a caso, tra i temi di *Smart Kalasatama*¹⁶⁶, tre prevalgono sugli altri:

1. energia: sono state testate e presentate soluzioni per l'utilizzo dell'energia solare e la neutralità del carbonio;
2. mobilità sostenibile: con l'intento di ridurre la mobilità a zero emissioni, grazie ad auto elettriche e ad un migliore sostegno nel traffico ferroviario;
3. servizi quotidiani intelligenti: detti anche *tema 25/7* perché, sviluppando questi servizi, aumenterà il tempo libero durante la giornata.

Quindi il Digital Twin ha la funzione di essere usato come piattaforma¹⁶⁷ di sviluppo virtuale, a fronte di tali tematiche. La piattaforma in questione riguarda un'applicazione (basata su browser e disponibile anche su mobile), che è stata integrata con altri progetti, sviluppati per Smart Kalasatama. Tale piattaforma permette, quindi, di visualizzare e di sperimentare le altre iniziative smart in un ambiente virtuale, prima di arrivare alla realizzazione finale.

A differenza della modellazione dei progetti di costruzione regionale di Kalasatama, che è stata implementata direttamente sull'applicazione, tutti gli altri progetti sono stati inseriti come livelli separati, per comodità verso

¹⁶⁶ <https://fiksukalasatama.fi/en/>

¹⁶⁷ <https://cityplanneronline.com/helsinki/kalasatama>

gli utenti. Prima di passare alla rassegna dei progetti eco-sostenibili, si vuole dare il giusto peso ad un aspetto che ha anticipato la selezione di tali progetti.

È stato realizzato un questionario interattivo (Figura 21) per capire quali fossero gli interessi degli abitanti di Kalasatama, cosa quest'ultimi raccomanderebbero ai visitatori e che tipo di soluzioni smart stavano usando in quel periodo temporale. Le risposte del questionario, presenti nella barra laterale della piattaforma, sono state utili per procedere alla selezione e, se necessario, alla creazione di progetti¹⁶⁸.

Questo questionario viene sottolineato perché si mette in evidenza, anche se indirettamente, l'importanza del contesto sociale e lo scopo di questa piattaforma, nonché del Digital Twin. Infatti, prima di pianificare e implementare i progetti, così come altri modelli, è necessario, in questo settore, capire bene i bisogni del pubblico di riferimento. Per fare questo, è necessario far intervenire più persone possibili. Anche in questo caso, si è di fronte a una situazione, in cui è presente un approccio umano-centrico e l'inclusione sociale.

¹⁶⁸ (Airaksinen, et al., 2019, p. 38).

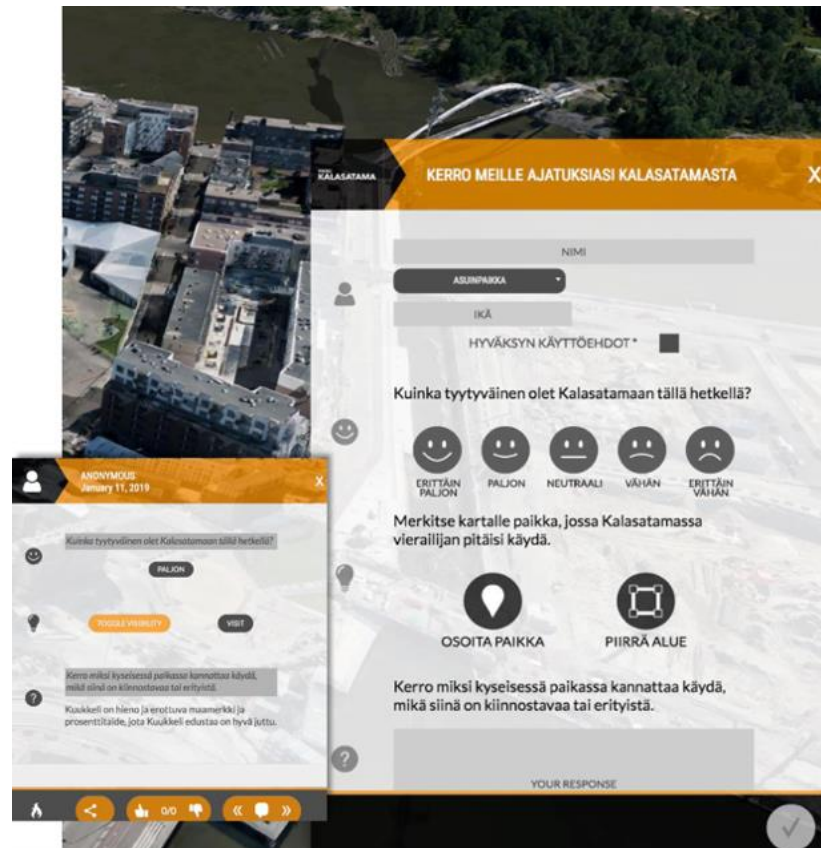


Figura 21 Questionario OpenCities Planner in lingua originale¹⁶⁹.

6.5 I progetti sostenibili di Kalasatama

Kalasatama, grazie al Digital Twin, ha potuto sviluppare due progetti eco-sostenibili: simulazione del vento e studio del sole. Questi due aspetti rientrano perfettamente in uno dei punti cardine delle politiche europee, ovvero la sostenibilità.

6.5.1 Simulazione del vento

L'implementazione delle simulazioni del vento è uno degli aspetti che permettono di pianificare un ambiente urbano confortevole e sicuro.

¹⁶⁹(Ibidem).

Per effettuare una simulazione del vento, è necessario, in primis, indicare velocità e direzione del vento. Ciò è possibile usando uno strumento di un software, che unisce modellazione 3D e simulazioni ambientali, e che prende il nome di *Ladybug Tools*¹⁷⁰. Il risultato è stata una serie di rose dei venti, create con i dati di Helsinki del 1990 e provenienti da *EnergyPlus Weather*¹⁷¹. Il motivo, per cui i dati non sono così recenti, è dato dal fatto che, secondo l'Istituto Meteorologico Finlandese, il vento nel Golfo di Finlandia potrebbe crescere veramente poco in un lungo lasso temporale (da due a quattro punti percentuali dal 2000 al 2100). Inoltre, non ci sono stati cambiamenti significativi nel vento durante il periodo di osservazione 1971 - 2000. Su questa base, la realizzazione di simulazioni del vento con i dati del 1990 è stata indicata come più che accurata¹⁷².

¹⁷⁰ Una collezione di applicazioni gratuite per computer che supportano la pianificazione e lo sviluppo ambientale (Airaksinen et al., 2019, p. 39).

¹⁷¹ EnergyPlus™ è un programma di simulazione energetica dell'intero edificio che esperti del settore usano per modellare sia il consumo di energia sia l'uso dell'acqua negli edifici.

¹⁷² (hel.fi, *The Kalasatama Digital Twins Project*).

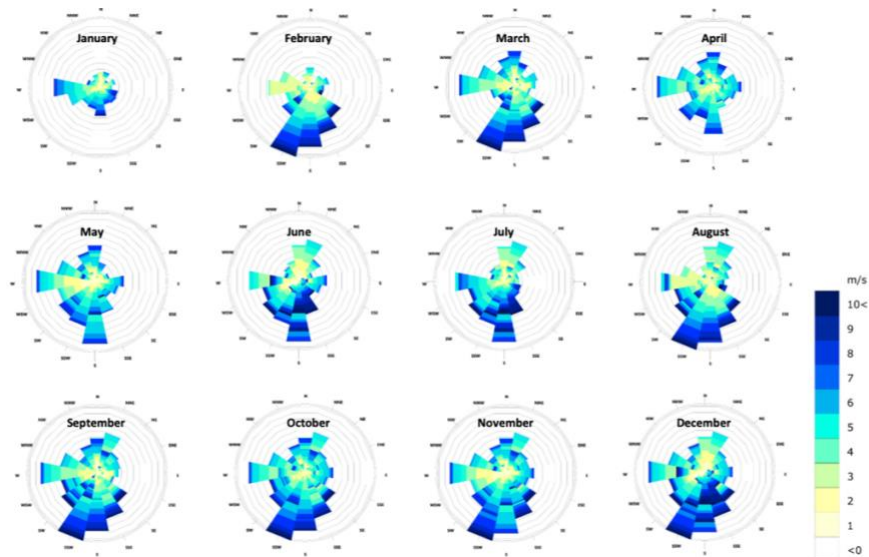


Figura 22 Le rose dei venti di Helsinki¹⁷³.

Tale simulatore è stato in grado, ad esempio, di analizzare quale e come il vento si è comportato intorno agli edifici e ai loro tetti e cortili.

Oltre alla velocità del vento, queste simulazioni possono essere usate per studiare la pressione dell'aria, causata dai flussi di quest'ultima. Capire il comportamento della pressione dell'aria può essere utile perché grandi sbalzi causano un impatto negativo sulle condizioni degli edifici. Inoltre, può limitare i problemi che causano l'accumulo di neve. Tutti questi aspetti (insieme e non) sono complicati da studiare, senza il Digital Twin, e i risultati finali, grazie ad esso, sono stati molto accurati, sia per aree ampie, che ristrette (come per una semplice strada¹⁷⁴).

¹⁷³ Airaksinen, et al., 2019, p. 40).

¹⁷⁴ (Ibidem).

6.5.2 Studio del sole

L'intento di questo progetto consiste nel provare nuove metodologie per osservare il comportamento della luce solare in un ambiente costruito. Due delle simulazioni effettuate riguardano l'analisi delle ore solari e quella delle ombre. Mentre la prima riguarda il calcolo del tempo, in cui il sole splende nel distretto di Helsinki, la seconda esamina quali tipi di ombre si creano a causa dagli oggetti costruiti. Due simulazioni prettamente dedicate alla pianificazione e alla sperimentazione nella parte digitale¹⁷⁵.

Se si pensa ad Helsinki, o in generale alla Finlandia, s'intuisce l'importanza del sole in queste zone, non solo per la produzione energetica, ma anche per la qualità di vita delle persone. Usando lo strumento *Grasshopper* di *Rhinoceros*¹⁷⁶, sono state effettuate analisi sulle ore solari¹⁷⁷ e sulle immagini relative ad esse.

Ad esempio, gli esperti hanno notato che un parco, costruito sul tetto (al quinto piano) del centro commerciale REDI, costituiva un'importante area ricreativa a Kalasatama. Per questo motivo, l'edificio di REDI è stato rimosso dal modello, in modo che fosse possibile osservare l'andamento delle ore solari in quell'area, senza tale struttura¹⁷⁸.

¹⁷⁵ (Airaksinen, et al., 2019, p. 49).

¹⁷⁶ <https://www.rhino3d.com/>

¹⁷⁷ Un'ora solare si riferisce al tempo in cui il suolo o i cortili degli edifici ricevono la luce solare. (Airaksinen et al 2019, p. 49)

¹⁷⁸ (Ibidem).

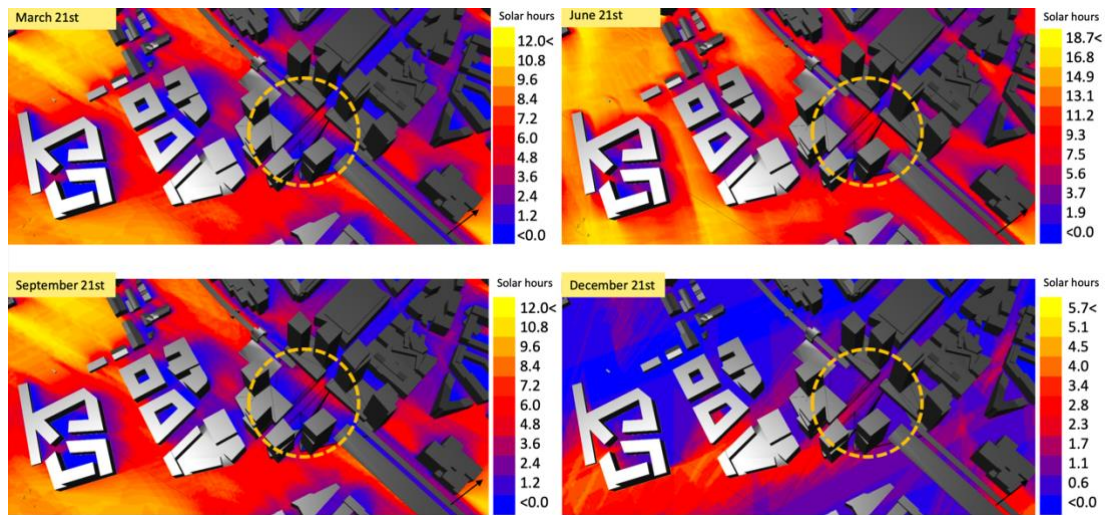


Figura 23 Analisi del sole del centro di Kalasatama in marzo, giugno, settembre e dicembre¹⁷⁹.

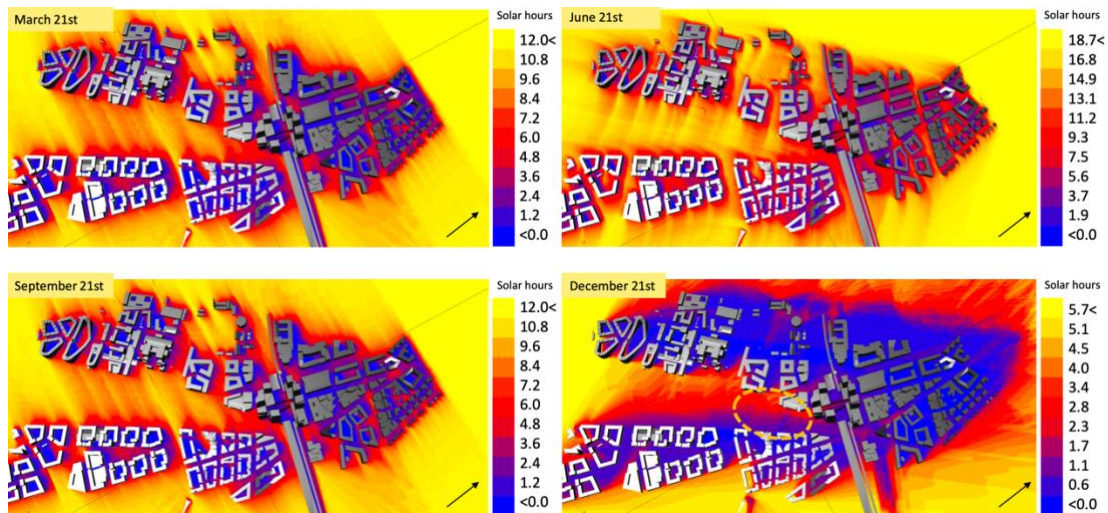


Figura 24 Analisi delle ore solari dal centro di Kalasatama ad una distanza più vicina e senza l'edificio RED¹⁸⁰.

In merito alla seconda simulazione, l'analisi delle ombre ha prodotto buoni risultati, svolgendo pochi e semplici passaggi. Ad esempio, gli edifici selezionati in fase di pianificazione, possono essere rimossi oppure

¹⁷⁹ (Airaksinen, et al., 2019, p. 50).

¹⁸⁰ (Airaksinen, et al., 2019, p. 51).

ripianificati testando, direttamente nella simulazione, il nuovo progetto, facilmente inseribile nell'analisi.

Tale simulazione permette di capire qual è il giorno più buio e quello più luminoso dell'anno, inoltre in base all'analisi, si può vedere che il parco Kalasatama (il cerchio giallo in Figura 27 Analisi delle ombre del centro Kalasatama del 21 dicembre 2019.) riceve luce anche nel momento più buio dell'anno, a mezzogiorno, il che significa che il parco è sempre illuminato¹⁸¹.



Figura 25 Analisi delle ombre del centro Kalasatama del 21 giugno 2019¹⁸².



Figura 26 Analisi delle ombre del centro Kalasatama del 21 settembre 2019¹⁸³.

¹⁸¹ (Airaksinen et al. 2019, p. 52).

¹⁸² (Ibidem)

¹⁸³ (Ibidem).



Figura 27 Analisi delle ombre del centro Kalasatama del 21 dicembre 2019¹⁸⁴.



Figura 28 Analisi delle ombre del centro Kalasatama del 21 marzo 2019¹⁸⁵.

¹⁸⁴ (Airaksinen et al. 2019, p. 53).

¹⁸⁵ (Ibidem).

7 Settore manifatturiero

Le attività industriali sono il fattore più importante che porta alle emissioni di anidride carbonica nel mondo. L'industria manifatturiera in Cina rappresenta il 58,27% delle emissioni totali di CO₂¹⁸⁶, che sono aumentate di circa il 220,77% negli ultimi vent'anni¹⁸⁷.

Due obiettivi tra quelli indicati da *Sustainable Development Goals*¹⁸⁸, vale a dire l'obiettivo 9 (“Industria, innovazione e infrastrutture e l'obiettivo”) e il 12 (“Consumo e produzione responsabili”) possono essere strettamente collegati ai Digital Twin, i quali dovrebbero essere introdotti nell'industria per migliorare la sostenibilità delle aziende.

Il Digital Twin può essere un'importante innovazione per molte aziende e permette di migliorare un'infrastruttura fisica grazie alla sua controparte digitale. Esso può essere utilizzato per molti scopi, ad esempio per prevedere e prevenire problemi, ottimizzare e testare i processi lavorativi con l'uso di simulazioni¹⁸⁹. In ogni caso, il Digital Twin tutela le risorse ambientali, in quanto tutte le operazioni vengono realizzate virtualmente.

7.1 Applicazioni e ricerche

Conducendo un esperimento di simulazione per una linea di produzione automobilistica, è stato presentato un Digital Twin per un sistema manifatturiero efficiente dal punto di vista energetico¹⁹⁰. Grazie allo sviluppo dell'IoT, il Digital Twin svolge un ruolo importante per il monitoraggio della produzione in tempo reale, l'analisi della simulazione

¹⁸⁶ Anidride carbonica

¹⁸⁷ (Sun et al 2019, vol.11)

¹⁸⁸ (United Nations Sustainable Development, *17 Goals to Transform Our World*)

¹⁸⁹ (Latif e Starly 2020, vol. 48, pp. 932-939)

¹⁹⁰ (Wang et al. 2018, vol. 11)

e il controllo del feedback dei sistemi fisici. Viene, quindi, presentato un metodo decisionale che tenga conto del massimo risparmio energetico e delle minime conseguenze sul rendimento delle macchine. Grazie ai risultati dell'esperimento di produzione automobilistica semplificata, è stato possibile evidenziare che possibili risparmi hanno un'influenza positiva sugli aspetti ecologici ed economici dello sviluppo sostenibile¹⁹¹.

In un altro lavoro¹⁹², è stato proposto un framework per un Digital Twin da applicare nell'industria petrolchimica. Grazie alle tecnologie IoT, Data mining e Machine Learning, questo modello di Digital Twin può essere applicato nella gestione della *supply chain*¹⁹³, dell'energia, della sicurezza, delle attrezzature e in molti altri domini collegati alle fabbriche. Per esempio, con un Digital Twin basato sul Machine Learning, è possibile analizzare e anticipare il consumo di energia e ottimizzare il consumo di acqua, di elettricità e altre risorse pubbliche; prevedere il benessere umano e fare previsioni sui rischi per la sicurezza delle persone; valutare le prestazioni ambientali e fornire avvertimenti sui rischi. Questo modello di Digital twin può essere un potenziale anche per i problemi della smart city, già presentati¹⁹⁴.

Sono stati analizzati anche i benefici dell'uso dei Digital Twin per monitorare il ciclo di vita di un prodotto e le condizioni dei suoi componenti, i quali non dovrebbero essere sostituiti troppo presto, se le loro condizioni tecniche sono ancora accettabili. Grazie alle tecnologie abilitanti, compresi i Digital Twin, è possibile migliorare notevolmente l'efficienza economica delle risorse materiali e ridurre il tempo di sviluppo e di implementazione di nuovi componenti. Viene particolarmente

¹⁹¹ (Wang et al. 2018, vol. 11).

¹⁹² (Min et al. 2019, vol. 49, p. 502-519).

¹⁹³ Catena di approvvigionamento, ovvero il processo che consente di far arrivare un prodotto dal fornitore, fino al cliente.

¹⁹⁴ (Min et al. 2019, vol. 49, p. 517).

evidenziato la necessità di poter utilizzare razionalmente le risorse naturali, diminuire i rifiuti e i consumi di energia, principalmente grazie al Digital Twin¹⁹⁵.

Per quanto riguarda il monitoraggio e la previsione di guasti alle strutture industriali, è stata evidenziata, in generale, la mancanza di dati relativi alla condizione delle macchine. Inoltre, l'imprevedibilità dei guasti riduce la *disponibilità*¹⁹⁶ delle macchine e, di conseguenza, diminuisce a sua volta la produttività. Anche in questo caso, le tecnologie abilitanti, come Digital Twin, IoT, Big Data, Cloud computing e Intelligenza Artificiale, permettono di prevedere i guasti più critici. Per questo, è stata presentata una soluzione di Digital Twin¹⁹⁷ per la manutenzione di una macchina di perforazione che manca di dati storici, descrivendo l'intero processo (dall'acquisizione dei dati alla previsione della *Remaining Useful Life*¹⁹⁸).

È stata presentata una rassegna di problemi legati ai *digital twin-based sustainable intelligent manufacturing systems*¹⁹⁹. La produzione intelligente, combinata con un gemello digitale, ha sia le funzioni di rilevamento e simulazione intelligente, che rendono la produzione di prodotti più efficiente e intelligente, sia la possibilità di monitorare lo stato dei prodotti e delle attrezzature di produzione in tempo reale, e prevedere possibili guasti in tempo. Dopo aver fatto un'introduzione di un Digital Twin e la sua applicazione, sono stati introdotti tre aspetti *digital twin-based sustainable intelligent manufacturing*, ovvero le attrezzature, i

¹⁹⁵ (Czwick & Anderl 2020, vol. 90, pp. 584-588).

¹⁹⁶ Percentuale dell'effettivo tempo di attività della macchina rispetto a quello disponibile.

¹⁹⁷ (Cattaneo & MacChi 2019, vol. 52, pp. 37-42).

¹⁹⁸ Una stima del tempo rimanente del funzionamento di un prodotto, di un componente o di un sistema, prima di essere sostituiti.

¹⁹⁹ Sistemi di produzione intelligente sostenibile basati su Digital Twin.

sistemi e i servizi. In sintesi, il framework proposto include la sostenibilità in tutti i passaggi (dal design alla produzione)²⁰⁰.

Da questi casi, è possibile notare che, nonostante il Digital Twin nel settore manifatturiero sia poco discusso, esso può portare molti vantaggi in linea con le politiche europee.

In conclusione, dato che l'obiettivo di questa analisi era capire se il Digital Twin rientrasse tra quelle tecnologie di frontiera che permetteranno di affrontare le sfide dettate dalle politiche europee, è possibile, non solo dare una risposta affermativa, ma anche sottolineare la necessità che ciò avvenga.

²⁰⁰ (He & Bai 2020, vol. 9, pp. 1-21).

8 DestinationEarth

Recentemente sta prendendo sempre più forma la possibilità di creare un Digital Twin della Terra. Nonostante ci siano ancora diversi dubbi sulla realizzazione, questo caso potrebbe rappresentare un grande punto di svolta per poter considerare il Digital Twin tra le tecnologie di frontiera che consentiranno di affrontare le sfide dettate dalle politiche europee²⁰¹.

L'essere umano affronta ogni giorno varie sfide ambientali, come la sicurezza idrica/energetica, lo sviluppo di un'economia sostenibile e il cambiamento climatico. Inoltre, attualmente, la situazione risulta essere peggiorata rispetto al 2003, anno in cui si è svolto il primo *Earth Observation Summit*²⁰² a Washington. In tale incontro, governi e organizzazioni internazionali si sono impegnati ad adottare una visione di futuro in cui decisioni e azioni politiche, a beneficio dell'umanità, si sarebbero dovute basare su informazioni raccolte dalle osservazioni della Terra.

Quindi, un primo aspetto, che è emerso al Earth Observation Summit, riguarda l'importanza dell'osservazione sulla Terra. Essa è fondamentale per fornire informazioni sul nostro pianeta e rilevarne i cambiamenti. L'uomo, per molti anni, si è affidato a rappresentazioni statiche della Terra, come mappe, dipinti e fotografie, ma, con il rapido sviluppo e l'introduzione di tecnologie emergenti innovative (come il Digital Twin), è stato fatto un bel passo in avanti.

²⁰¹ (Nativi et al. 2021).

²⁰² (U.S. Department of State, *Earth Observation Summit*).

Infatti, se esistesse una tecnologia che sappia, sia monitorare in modo attivo i fatti che avvengono in real-time sulla Terra, sia prevedere le conseguenze di tali cambiamenti in atto, si avrebbe a disposizione un *mezzo* importante per raggiungere gli obiettivi dettati dalle politiche europee.

Tale tecnologia è attualmente in fase di elaborazione e rientra tra le iniziative dell'Unione Europea. Infatti, per affrontare le sfide relative alla sostenibilità e alla trasformazione digitale (che insieme dovrebbero raggiungere la neutralità del carbonio entro il 2050), la Commissione dell'UE²⁰³ ha iniziato a discutere di una simulazione digitale della Terra con un Digital Twin: *DestinationEarth* o *DestinationE*²⁰⁴. Si tratta di una quantità senza precedenti di dati in tempo reale provenienti da sensori climatici, meteorologici e atmosferici, per sviluppare un modello digitale ad alta precisione della Terra²⁰⁵.

In sintesi, l'obiettivo di *DestinationE*, descritto dalla Commissione Europea, è quello di sviluppare un gemello dinamico, interattivo, multidimensionale e accurato della Terra, che possa permettere, a più gruppi di utenti (enti pubblici, scientifici e privati), di interagire con grandi quantità di dati sulle risorse naturali e sulle informazioni socio-economiche²⁰⁶.

Il Digital Twin della Terra avrà una struttura innovativa rispetto a un generico Digital Twin, perché combina osservazioni dello spazio e simulazioni su una scala spaziale molto più ampia rispetto a un comune prodotto industriale. Tuttavia, proprio tale architettura complessa, permetterà a *DestinationEarth* di fare previsioni e monitorare i dati

²⁰³ Unione Europea

²⁰⁴ (europa.eu, *Destination Earth*).

²⁰⁵ (Geographical, *The EU announces plans to build Destination Earth, a digital twin of our planet*).

²⁰⁶ (europa.eu, *Destination Earth*).

multimodali, derivanti dalla realtà ambientale e umana, come i disastri climatici imprevedibili, la gestione dell'uso del suolo e le emissioni di gas serra²⁰⁷.

8.1 Obiettivi

Nel 2023 è stato previsto l'avvio della piattaforma, quindi, attualmente, non è possibile confermare che tutti gli obiettivi, prefissati da DestinationEarth, saranno raggiunti.

Il modello virtuale della Terra, basato su un Digital Twin, potrebbe:

1. Monitorare la salute del pianeta: tenere sotto controllo, ad esempio, gli effetti indotti dai cambiamenti climatici, lo stato degli oceani e della biodiversità, l'uso del suolo e delle risorse naturali;
2. Eseguire simulazioni dinamiche ad alta precisione dei sistemi naturali della Terra;
3. Ottimizzare capacità di modellazione e di sistemi di predizione: ad esempio, per aiutare ad anticipare e a pianificare soluzioni, in caso di uragani e altri eventi meteorologici estremi (come tempeste o inondazioni) o disastri naturali (come eruzioni vulcaniche, terremoti), e per contribuire all'analisi degli squilibri socio-economiche (ad esempio, malattie e pandemie);
4. Rafforzare le capacità industriali e tecnologiche della Terra nella simulazione, nella modellazione, nell'analisi predittiva dei dati e nell'intelligenza artificiale, nonché nell'elaborazione avanzata e ad alte prestazioni.

²⁰⁷ (techDetector, *Digital Twins: The Link Towards Sustainability*).

Essendo un progetto dell'UE, tutti questi punti non possono che essere coerenti con le politiche europee, ma è stata la scelta di optare per un Digital Twin a inserire DestinationEarth nell'analisi della tesi.

8.2 Sfide

Il Digital Twin della Terra deve superare due ostacoli: la trasformazione digitale e una sfida *green*²⁰⁸.

In generale, con la prima s'intende la completa interconnessione tra mondo fisico e digitale, partendo dalla conversione di tutti gli aspetti della vita dell'essere umano in dati quantificati (in una parola, *datification*). Per fare ciò è necessario fare una ricca raccolta di dati, analizzarli con tecniche specifiche, principalmente usando sistemi avanzati di gestione dei dati e tecnologie d'Intelligenza Artificiale, ed infine interpretare queste analisi, in modo da fare diventare i dati, informazioni utili. Tutto ciò, applicato allo studio del cambiamento globale e dello sviluppo sostenibile (ovvero la seconda sfida), ha dato vita a una collaborazione stretta tra scienziati e persone della società civile, dell'industria e delle istituzioni pubbliche. Non si tratta solo di una riunione tra diverse discipline scientifiche, ma anche dello sviluppo di conoscenze transdisciplinari. Per questo, è stato dato un nome a una nuova scienza basata sui dati e capace di affrontare questioni sociali, ambientali e globali: *Big Earth Data* (BED)²⁰⁹.

²⁰⁸ “[termine] usato, nella sua accezione più ampia, per fare riferimento ai temi legati alla salvaguardia dell'ambiente naturale e per attribuire a un'azione, a un'attività o a uno status una connotazione che richiami i principi della sostenibilità ambientale.” (Enciclopedia Treccani, *Green*).

²⁰⁹ (Nativi et al. 2021).

8.3 Ipotesi

Attualmente non esiste nessun Digital Twin della Terra completo, però è stata fatta un'ipotesi su quale struttura potrebbe essere la migliore²¹⁰.

Nel 2015 ha iniziato a funzionare *GEOSS*²¹¹, un'infrastruttura basata su un approccio *bottom-up system-of-systems* in continuo aggiornamento con le esigenze politiche, sociali ed economiche. Si tratta di un quadro di conoscenze, composto da sistemi già esistenti, e potrebbe essere un buon esempio su cui basare l'architettura del Digital Twin della Terra. L'unione di diversi sotto-Digital Twins, creati e sviluppati indipendentemente, in un solo grande Digital Twin²¹².

Nel settembre 2020, l'Agenzia Spaziale Europea²¹³ ha dato il via a diverse attività che potrebbero andare a comporre il Digital Twin della Terra e quindi a costituire quei sotto-Digital Twin. Queste attività riguardano le foreste, l'idrologia, l'Antartide, i sistemi alimentari, gli oceani e gli hot-spot del clima.

Ogni attività ha affrontato una diversa sfida scientifica, tecnica e operativa che potrebbe riscontrare anche il Digital Twin della Terra²¹⁴. Queste attività sviluppate o sostenute da ESA potrebbero essere i futuri sotto-Digital Twin dell'atteso Digital Twin della Terra.

Per adesso, l'unica informazione certa è che sarà presente anche il contributo di *Copernicus*²¹⁵ per quanto riguarda i dati di alta qualità. Copernicus, infatti, costituisce il più grande fornitore di dati spaziali al mondo, producendo attualmente 12 terabyte al giorno.

²¹⁰ Ibidem

²¹¹ Global Earth Observation System of Systems.

²¹² (Nativi et al. 2021).

²¹³ European Space Agency

²¹⁴ (Geosmart Magazine, *Earth Digital Twin presentato il progetto ESA*)

²¹⁵ Il programma di osservazione della Terra dell'Unione Europea (Copernicus, *Homepage/Copernicus*).

Durante una videoconferenza, tenuta dagli Stati Generali dell'Innovazione²¹⁶, Andrea Taramelli, Delegato Nazionale Comitato Copernicus, ha affermato che il primo passo, che Copernicus ha intenzione di compiere, consiste nell'averne un'idea chiara degli scopi di DestinationEarth. Infatti, oltre agli obiettivi definiti dall'Unione Europea, Copernicus vuole proporre un questionario alla popolazione per poter fare una selezione e dare la precedenza a quei dati che più interessano all'uomo.

Quest'ultima iniziativa di Copernicus, insieme al quadro complessivo di DestinationEarth, è un'ulteriore risposta alla domanda posta precedentemente, ovvero se il Digital Twin possa rientrare tra quelle tecnologie di frontiera che consentiranno di affrontare le sfide dettate dalle politiche europee.

Grazie a DestinationEarth, l'innovazione delle tecnologie digitali avviene a partire da una situazione urgente dell'ambiente, che riguarda da vicino l'essere umano, motivo per cui, non solo viene incluso nel progetto, ma, nel caso di Copernicus, costituisce anche il primo passo.

²¹⁶ Un'iniziativa di associazioni, aziende e cittadini convinti che le migliori opportunità di crescita per l'Italia sono offerte dalla creatività dei giovani. (SGI - Stati Generali dell'Innovazione, *Chi siamo*)

9 Conclusioni

Questa tesi ha cercato di trovare una correlazione tra un'innovazione tecnologica, recentemente molto discussa, ovvero il Digital Twin, e gli obiettivi posti dalle politiche europee su una visione di futuro, basata principalmente sulla sostenibilità, sull'inclusione sociale e su un approccio umano-centrico.

Si è iniziato partendo dalla descrizione della storia e del concetto del Digital Twin, fino ad arrivare ai recenti sviluppi di quest'ultimo, grazie alle tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0. Proprio tali tecnologie, infatti, permettono al Digital Twin di contraddistinguersi da altri modelli già presenti.

Un'analisi più dettagliata del contesto storico e culturale, in cui si è sviluppato e continuerà a svilupparsi il Digital Twin, mostra che nei prossimi anni le politiche europee intendono puntare sulle tecnologie digitali, ma partendo da un'altra prospettiva. Prima si cercano di comprendere i bisogni principali dell'uomo e poi si sviluppano le tecnologie. Il tutto considerando, in primo luogo, la sostenibilità. L'obiettivo generale, quindi, è di arrivare, grazie alle tecnologie, ad avere un mondo più green, senza limitare la qualità della vita dell'essere umano.

Per capire se il Digital Twin possa raggiungere gli scopi delle politiche europee, sono stati analizzati tre scenari, ovvero il settore urbano, quello manifatturiero e DestinationEarth.

Facendo riferimento principalmente alle smart cities, è stato dimostrato che il Digital Twin è effettivamente utile nella gestione delle città, le quali

sono il massimo generatore di inquinamento del pianeta. Inoltre, è più semplice occuparsi di alcuni aspetti legati alla sostenibilità, come il consumo energetico.

Tra le smart cities, basate sul Digital Twin, sono state selezionate tre città: Singapore, Zurigo e il distretto di Kalasatama. Quest'ultime sono dei chiari esempi di quanto il Digital Twin possa toccare, tanto la sostenibilità, quanto l'inclusione sociale.

Il settore manifatturiero è stato scelto sia perché è una delle principali cause dell'inquinamento ambientale sia perché esistono numerose ricerche. Tuttavia, tra tutte queste ricerche, pochissime tengono in considerazione la sostenibilità.

È stata, quindi, fatta una raccolta di studi che mostrano quanto il settore manifatturiero sia pronto a una trasformazione basata sul Digital Twin, in cui si dà valore sia all'ottimizzazione della produzione sia alla cura dell'ambiente. In sintesi, anche in questo caso, il Digital Twin rientra nei piani delle politiche europee, limitando, ad esempio, l'uso eccessivo di risorse energetiche.

Infine, si è descritta un'iniziativa europea che considera il Digital Twin una grande occasione per poter monitorare i dati della Terra (e non solo), attraverso una replica digitale del pianeta in continuo aggiornamento. Tale iniziativa non è ancora in atto, ma si pensa possa entrare in funzione nel 2023. Tra gli obiettivi che può raggiungere DestinationEarth, non manca quello di poter prevedere i disastri ambientali o tenere sotto controllo lo stato degli oceani.

Quindi, in conclusione, basandosi sui tre scenari (città, settore manifatturiero e DestinationEarth), è possibile affermare che il Digital

Twin è al servizio di una frontiera della tecnologia che permette all'essere umano di raggiungere gli obiettivi previsti dalle politiche europee.

9.1 Il ruolo dell'Informatica Umanistica

Per affrontare l'argomento di questa tesi, è necessario avere delle conoscenze sia in ambito informatico, sia in quello umanistico. Infatti, a partire dalle competenze personali di Sociologia dei Nuovi Media, è stato più semplice avere delle ipotesi sugli scenari da selezionare, che poi sono state, in parte, confermate con l'analisi di lavori, già presenti, sul Digital Twin.

Inoltre, a causa della crescita sostanziale di pubblicazioni, avvenuta negli ultimi anni, è stato necessario saper gestire e analizzare grandi quantità di articoli; organizzare, strutturare concetti sul Digital Twin e, infine, rielaborarli in termini più semplici e adatti a qualsiasi tipo di pubblico, per poterne ampliare la conoscenza.

9.2 Sviluppi futuri

Per questo, tra i possibili sviluppi futuri, sarebbe interessante rendere il più accessibile possibile il Digital Twin, presentandolo come una soluzione, non solo e soltanto tecnica, ma anche di una certa importanza per l'essere umano, per la società e per l'ambiente. Sotto quest'ottica, non possono mancare alcune figure professionali, che hanno le competenze per raccogliere, analizzare e organizzare dati storici, geografici e ambientali. Queste figure, inoltre, devono anche saper collaborare in un team, composto da colleghi provenienti da più settori. Il Digital Twin, infatti, può essere visto come una sintesi della cultura digitale, che ha alle spalle un gruppo di lavoro con un mix di competenze, le quali interagiscono tra di loro. Chi si troverà di fronte a un Digital Twin, quindi, non deve essere valevole solo nel proprio settore specializzato, che esso

sia informatica, matematica o ingegneria, ma deve anche avere delle buone competenze trasversali, come capacità di collaborare e comunicare in un team. Quest'ultime competenze vengono definite *soft skills* e sono spesso sottovalutate, tuttavia costituiscono la base dell'Informatica Umanistica.

Bibliografia & Sitografia

‘3D Models of Helsinki - Helsinki Region Infoshare’. 2021. Hri.Fi. 9 November 2021. https://hri.fi/data/en_GB/dataset/helsingin-3d-kaupunkimalli.

‘About Us’. n.d. Hannover Messe. <https://www.hannovermesse.de>. Accessed 13 November 2021. <https://www.hannovermesse.de/en/about-us/>.

Alcácer, V., and V. Cruz-Machado. 2019. ‘Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems’. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 22 (3): 899–919. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>.

Barni, Andrea, Alessandro Fontana, Silvia Menato, Marzio Sorlini, and Luca Canetta. 2018. ‘Exploiting the Digital Twin in the Assessment and Optimization of Sustainability Performances’. In *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 706–13. <https://doi.org/10.1109/IS.2018.8710554>.

Besselink, Bart, Valerio Turri, Sebastian H. van de Hoef, Kuo-Yun Liang, Assad Alam, Jonas Martensson, and Karl H. Johansson. 2016. ‘Cyber–Physical Control of Road Freight Transport’. *Proceedings of the IEEE* 104 (5): 1128–41. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2511446>.

‘Building Information Modeling - an Overview’. 2012. ScienceDirect. 2012. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/building-information-modeling>.

Cattaneo, Laura, and Marco Macchi. 2019. 'A Digital Twin Proof of Concept to Support Machine Prognostics with Low Availability of Run-To-Failure Data'. *IFAC-PapersOnLine*, 13th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS 2019, 52 (10): 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.016>.

Chen, Ke, Weisheng Lu, Fan Xue, Pingbo Tang, and Ling Hin Li. 2018. 'Automatic Building Information Model Reconstruction in High-Density Urban Areas: Augmenting Multi-Source Data with Architectural Knowledge'. *Automation in Construction* 93 (September): 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.009>.

Chen, Ximing, Eunsuk Kang, Shinichi Shiraishi, Victor M. Preciado, and Zhihao Jiang. 2018. 'Digital Behavioral Twins for Safe Connected Cars'. In *Proceedings of the 21th ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*, 144–53. Copenhagen Denmark: ACM. <https://doi.org/10.1145/3239372.3239401>.

'Chi siamo'. 2011. *SGI - Stati Generali dell'Innovazione* (blog). 6 January 2011. <https://www.statigeneralinnovazione.it/online/chi-siamo/>.

'Cities - MySMARTLife'. n.d. MySMARTlife. Accessed 14 November 2021. <https://www.mysmartlife.eu/cities/>.

'Cloud computing nell'Enciclopedia Treccani'. 2021. 7 November 2021. <https://www.treccani.it/enciclopedia/cloud-computing>.

Cocchia, Annalisa. 2014. 'Smart and Digital City: A Systematic Literature Review'. In , 13–43. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06160-3_2.

Czwick, Cordula, and Reiner Anderl. 2020. 'Cyber-Physical Twins - Definition, Conception and Benefit'. *Procedia CIRP*, 27th CIRP Life Cycle Engineering Conference (LCE2020)Advancing Life Cycle

Engineering: from technological eco-efficiency to technology that supports a world that meets the development goals and the absolute sustainability, 90 (January): 584–88. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.070>.

‘Data Shows Effects of COVID-19 and Climate Change on Citizens’ Perceptions of How Smart Their Cities Are’. n.d. IMD Business School. Accessed 15 November 2021. <https://www.imd.org/news/updates/data-shows-effects-of-covid-and-climate-change-on-citizens-perceptions-of-how-smart-their-cities-are/>.

Deng, Tianhu, Keren Zhang, and Zuo-Jun (Max) Shen. 2021. ‘A Systematic Review of a Digital Twin City: A New Pattern of Urban Governance toward Smart Cities’. *Journal of Management Science and Engineering* 6 (2): 125–34. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.03.003>.

Department Of State. The Office of Electronic Information, Bureau of Public Affairs. 2021. ‘Earth Observation Summit’. U.S. Department of State. Department Of State. The Office of Electronic Information, Bureau of Public Affairs. 9 November 2021. <https://2001-2009.state.gov/g/oes/rls/fs/2004/30235.htm>.

‘Destination Earth | Shaping Europe’s Digital Future’. 2021. European Commission. 9 November 2021. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>.

‘Destination Earth (DestinE) Architecture Validation Workshop - Summary Report | Shaping Europe’s Digital Future’. 2021. European Commission. 9 November 2021. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/destination-earth-destine-architecture-validation-workshop-summary-report>.

Diebold, Francis X. 2012. ‘On the Origin(s) and Development of the Term “Big Data”’. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.2152421>.

‘Digital Business Transformation Survey 2019’. 2019. *THE INNOVATION GROUP* (blog). 30 July 2019.
<https://www.theinnovationgroup.it/digital-business-transformation-survey-2019/?lang=it>.

‘Digital Business Transformation Survey 2020’. 2020. *THE INNOVATION GROUP* (blog). 10 June 2020.
<https://www.theinnovationgroup.it/digital-business-transformation-survey-2020/?lang=it>.

‘Digital Twin Market by Technology, Type, Application, Industry And Geography - Global Forecast to 2026’. 2020. Digital Twin Market by Technology, Type, Application, Industry And Geography - Global Forecast to 2026. ReportLinker. 2020.
<https://www.reportlinker.com/p05092748/Digital-Twin-Market-by-End-User-And-Geography-Forecast-to.html>.

‘Digital Twins: The Link Towards Sustainability’. 2021. TechDetector. 8 November 2021. <https://techdetector.de/stories/digital-twins-the-link-towards-sustainability#creating-a-sustainable-economy>.

Dignan, Joseph. 2020. ‘Smart Cities in the Time of Climate Change and Covid-19 Need Digital Twins’. *IET Smart Cities* 2 (3): 109–10.
<https://doi.org/10.1049/iet-smc.2020.0071>.

‘Earth Digital Twin presentato il progetto ESA’. 2021. *Geosmart Magazine* (blog). 14 October 2021.

<https://www.geosmartmagazine.it/2021/10/14/earth-digital-twin-esa-presenta-il-gemello-digitale-della-terra/>.

Esch, Jim. 2013. 'Prolog to "Aviation Cyber-Physical Systems: Foundations for Future Aircraft and Air Transport"'. *Proceedings of the IEEE* 101 (8): 1831–33. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2268677>.

Facchini, Mauro. 2021. 'COPERNICUS, DALLO SPAZIO UN AIUTO PER L'AMBIENTE', 38.

Fu, Yu, Suling Jia, and Jinxing Hao. 2015. 'A Scalable Cloud for Internet of Things in Smart Cities' 26 (3): 14.

Fuller, Aidan, Zhong Fan, Charles Day, and Chris Barlow. 2020. 'Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research'. *IEEE Access* 8: 108952–71. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.

Gartner. n.d. 'Gartner | Delivering Actionable, Objective Insight to Executives and Their Teams'. Gartner | Delivering Actionable, Objective Insight to Executives and Their Teams. Gartner. Accessed 13 November 2021. <https://www.gartner.com/en>.

Gladden, Matthew E. 2019. 'Who Will Be the Members of Society 5.0? Towards an Anthropology of Technologically Posthumanized Future Societies'. *Social Sciences* 8 (5): 148. <https://doi.org/10.3390/socsci8050148>.

Glaessgen, Edward H., and D. S. Stargel. 2012. 'The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles'. In . Honolulu, HI. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120008178>.

'green in "Dizionario di Economia e Finanza"'. 2021. Enciclopedia Treccani. 9 November 2021.

[https://www.treccani.it/enciclopedia/green_\(Dizionario-di-Economia-e-Finanza\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/green_(Dizionario-di-Economia-e-Finanza)).

Guo, Yanxiang, Xiping Hu, Bin Hu, Jun Cheng, Mengchu Zhou, and Ricky Y. K. Kwok. 2018. 'Mobile Cyber Physical Systems: Current Challenges and Future Networking Applications'. *IEEE Access* 6: 12360–68. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2782881>.

'HANNOVER MESSE: Facts & Figures of HANNOVER MESSE'. n.d. <https://www.hannovermesse.de>. Accessed 13 November 2021. <https://www.hannovermesse.de/en/about-us/about-the-show/>.

He, Bin, and Kai-Jian Bai. 2021. 'Digital Twin-Based Sustainable Intelligent Manufacturing: A Review'. *Advances in Manufacturing* 9 (1): 1–21. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00302-5>.

'Homepage | Copernicus'. n.d. Copernicus. Accessed 14 November 2021. <https://www.copernicus.eu/it>.

'INDUSTRIA in "Enciclopedia Italiana"'. n.d. Enciclopedia Treccani. Accessed 14 November 2021. [https://www.treccani.it/enciclopedia/industria_res-592fd6bf-dd78-11e6-add6-00271042e8d9_\(Enciclopedia-Italiana\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/industria_res-592fd6bf-dd78-11e6-add6-00271042e8d9_(Enciclopedia-Italiana)).

'Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries'. 2015. [bcg.com](https://www.bcg.com). 2015. https://www.bcg.com/it-it/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.

'Industry 5.0: Towards More Sustainable, Resilient and Human-Centric Industry'. 2021. Text. European Commission. 2021. https://ec.europa.eu/info/news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industry-2021-jan-07_en.

InfoCamere. 2020. *IGF Italia 2020-Sessioni Parallele CCIAA Firenze (2° Giornata)*. <https://www.youtube.com/watch?v=9CVtSGrbE9o>.

‘Infographic: Industry 4.0 In Numbers’. 2020. *Impact Networking* (blog). 2020. <https://www.impactmybiz.com/blog/infographic-industry-4-0-stats-2020/>.

‘Integrated Digital Delivery (IDD)’. 2021. BCA Corp. 8 November 2021. <https://www1.bca.gov.sg/buildsg/digitalisation/integrated-digital-delivery-idd>.

‘Italy: Digital Transformation Projects by Field 2020’. 2021. This year, are you going to implement projects in any of the following fields? Statista. 7 November 2021. <https://www.statista.com/statistics/1079859/digital-transformation-projects-implemented-by-field-italy/>.

‘Italy: Digital Transformation Projects Implemented by Field 2019’. 2021. In the past year, have you implemented projects in any of the following fields? Statista. 7 November 2021. <https://www.statista.com/statistics/1079826/digital-transformation-projects-implemented-by-field-italy/>.

‘Keidanren’. n.d. Keidanren Japan Business Federation. Accessed 13 November 2021. <http://www.keidanren.or.jp/en/>.

Kent, Lee, Chris Snider, and Ben Hicks. 2019. ‘Early Stage Digital-Physical Twinning to Engage Citizens with City Planning and Design’. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 1014–15. Osaka, Japan: IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8798250>.

Latif, Hasan, and Binil Starly. 2020. ‘A Simulation Algorithm of a Digital Twin for Manual Assembly Process’. *Procedia Manufacturing*, 48th SME

North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 48, 48 (January): 932–39. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.132>.

Mavrodieva, Aleksandrina V., and Rajib Shaw. 2020. ‘Disaster and Climate Change Issues in Japan’s Society 5.0—A Discussion’. *Sustainability* 12 (5): 1893. <https://doi.org/10.3390/su12051893>.

Min, Qingfei, Yangguang Lu, Zhiyong Liu, Chao Su, and Bo Wang. 2019. ‘Machine Learning Based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry’. *International Journal of Information Management* 49 (December): 502–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.020>.

Mohammadi, Neda, and John E. Taylor. 2017. ‘Smart City Digital Twins’. In *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 1–5. Honolulu, HI: IEEE. <https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285439>.

Nativi, Stefano, Paolo Mazzetti, and Max Craglia. 2021. ‘Digital Ecosystems for Developing Digital Twins of the Earth: The Destination Earth Case’. *Remote Sensing* 13 (11): 2119. <https://doi.org/10.3390/rs13112119>.

NCCS, National Centre for Climate Services. 2021. ‘CH2018 Technical Report’. NCCS. 9 November 2021. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/technical-report.html>.

‘Neolitica, rivoluzione in “Enciclopedia delle scienze sociali”’. 2021. Enciclopedia Treccani. 8 November 2021. [https://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzione-neolitica_\(Enciclopedia-delle-scienze-sociali\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzione-neolitica_(Enciclopedia-delle-scienze-sociali)).

Neshovski, Robert. n.d. '17 Goals to Transform Our World'. *United Nations Sustainable Development* (blog). Accessed 16 November 2021. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>.

'NextGenerationEU'. n.d. Unione Europea. Accessed 13 November 2021. https://europa.eu/next-generation-eu/index_it.

'NextGenerationEU: la Commissione europea eroga all'Italia 24,9 miliardi di € di prefinanziamenti'. n.d. Accessed 13 November 2021. https://italy.representation.ec.europa.eu/notizie-ed-eventi/notizie/nextgenerationeu-la-commissione-europea-eroga-allitalia-249-miliardi-di_it.

'Nuovo bilancio e Next Generation EU: ne parliamo il 18 dicembre'. n.d. Parlamento Europeo Ufficio in Italia. Accessed 13 November 2021. <http://www.europarl.europa.eu/italy/it/succede-al-pe/nuovo-bilancio-e-next-generation-eu-ne-parliamo-il-18-dicembre>.

Panetta, Kasey. 2016. 'Gartners Top 10 Technology Trends 2017'. *Gartners Top 10 Technology Trends 2017*. Gartner. 18 October 2016. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017>.

———. 2017. 'Gartner Top 10 Strategic Technology Trends For 2018'. *Gartner Top 10 Strategic Technology Trends For 2018*. Gartner. 3 October 2017. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018>.

———. 2018. 'Gartner Top 10 Strategic Technology Trends For 2019'. *Gartner Top 10 Strategic Technology Trends For 2019*. Gartner. 15 October 2018. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>.

———. n.d. ‘Gartner Top 10 Strategic Technology Trends For 2020’. Gartner. Accessed 13 November 2021. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2020>.

Pargmann, Hergen, Dorthe Euhausen, and Robin Faber. 2018. ‘Intelligent Big Data Processing for Wind Farm Monitoring and Analysis Based on Cloud-Technologies and Digital Twins: A Quantitative Approach’. In *2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA)*, 233–37. Chengdu: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCCBDA.2018.8386518>.

‘Piano per la ripresa dell’Europa’. n.d. Text. Commissione europea - European Commission. Accessed 13 November 2021. https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_it.

‘Progetto SAMBA’. n.d. SAMBA. Accessed 14 November 2021. <https://italiansmartbuilding.eu/pagina-home>.

‘(Re)Format Z: - A Game by Blindflug Studios’. n.d. Blindflug Studios. Accessed 15 November 2021. <https://www.blindflugstudios.com/our-games/reformat-z/>.

Ritchie, Hannah, and Max Roser. 2010. ‘Urbanization’. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/urbanization>.

Ruohomaki, Timo, Enni Airaksinen, Petteri Huuska, Outi Kesaniemi, Mikko Martikka, and Jarmo Suomisto. 2018. ‘Smart City Platform Enabling Digital Twin’. In *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 155–61. Funchal - Madeira, Portugal: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IS.2018.8710517>.

Salimova, Tatiana, Nadezhda Guskova, and Irina Krakovskaya. 2019. 'From Industry 4.0 to Society 5.0: Challenges for Sustainable Competitiveness of Russian Industry'. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 497: 012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/497/1/012090>.

Salvadori, Massimo. 2021. 'Rivoluzione industriale in "Enciclopedia dei ragazzi"'. *Enciclopedia Treccani*. 6 November 2021. [https://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzione-industriale_\(Enciclopedia-dei-ragazzi\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzione-industriale_(Enciclopedia-dei-ragazzi)).

Schrotter, Gerhard, and Christian Hürzeler. 2020. 'The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning'. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* 88 (1): 99–112. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2>.

Serpa, Sandro, and Carlos Miguel Ferreria. 2019. 'Society 5.0: Innovation, Uncertainty and Social Sciences'. MDPI. 2019. https://www.mdpi.com/journal/socsci/special_issues/Society_5.0.

Sivalingam, Krishnamoorthi, Marco Sepulveda, Mark Spring, and Peter Davies. 2018. 'A Review and Methodology Development for Remaining Useful Life Prediction of Offshore Fixed and Floating Wind Turbine Power Converter with Digital Twin Technology Perspective'. In *2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, 197–204. Singapore: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICGEA.2018.8356292>.

'Smart Cities'. 2021. Text. European Commission. 8 November 2021. https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en.

‘startup in “Dizionario di Economia e Finanza”’. n.d. Enciclopedia Treccani. Accessed 16 November 2021. [https://www.treccani.it/enciclopedia/startup_\(Dizionario-di-Economia-e-Finanza\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/startup_(Dizionario-di-Economia-e-Finanza)).

‘Stati Generali dell’Innovazione all’Internet Governance Forum Italia 2021’. 2021. *SGI - Stati Generali dell’Innovazione* (blog). 8 November 2021. <https://www.statigeneralinnovazione.it/online/stati-generalidellinnovazione-allinternet-governance-forum-italia-2021/>.

Sun, Wei, Yufei Hou, and Lanjiang Guo. 2019. ‘Analyzing and Forecasting Energy Consumption in China’s Manufacturing Industry and Its Subindustries’. *Sustainability* 11 (1): 99. <https://doi.org/10.3390/su11010099>.

Tay, Shu, Lee Te Chuan, A. Aziati, and Ahmad Nur Aizat Ahmad. 2018. ‘An Overview of Industry 4.0: Definition, Components, and Government Initiatives’. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems* 10: 14.

‘taylorismo in “Dizionario di Economia e Finanza”’. 2021. Enciclopedia Treccani. 8 November 2021. [https://www.treccani.it/enciclopedia/taylorismo_\(Dizionario-di-Economia-e-Finanza\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/taylorismo_(Dizionario-di-Economia-e-Finanza)).

‘The Kalasatama Digital Twins Project’. 2019.

‘The PI System and Industrie 4.0.Pdf’. n.d.

‘UAV nell’Enciclopedia Treccani’. n.d. Accessed 15 November 2021. <https://www.treccani.it/enciclopedia/uav>.

‘Un Green Deal europeo’. n.d. Text. Commissione europea - European Commission. Accessed 13 November 2021.

https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it.

‘Uniontrasporti - Tecnologie Abilitanti - 28mar18.Pdf’. n.d. Accessed 16 November 2021. <https://www.bo.camcom.gov.it/sites/default/files/formazione/seminari/28marzo18/Uniontrasporti%20-%20tecnologie%20abilitanti%20-%2028mar18.pdf>.

‘Use of Connectivity Technologies and Analytics by Manufacturers in 2017 and 2022’. 2021. Use of connectivity technologies and analytics by manufacturers in 2017 and 2022. Statista. 7 November 2021. <https://www.statista.com/statistics/1200504/connectivity-technologies-and-analytics-in-manufacturing/>.

Vinot, Jean-Luc, Catherine Letondal, Rémi Lesbordes, Stéphane Chatty, Stéphane Conversy, and Christophe Hurter. 2014. ‘Tangible Augmented Reality for Air Traffic Control’. *Interactions* 21 (4): 54–57. <https://doi.org/10.1145/2627598>.

‘Virtual Singapore’. 2021. National Research Foundation. 8 November 2021. <https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>.

Vojnovic, Igor. 2014. ‘Urban Sustainability: Research, Politics, Policy and Practice’. *Cities* 41 (July): S30–44. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2014.06.002>.

Wang, Junfeng, Yaqin Huang, Qing Chang, and Shiqi Li. 2019. ‘Event-Driven Online Machine State Decision for Energy-Efficient Manufacturing System Based on Digital Twin Using Max-Plus Algebra’. *Sustainability* 11 (18): 5036. <https://doi.org/10.3390/su11185036>.

White, Gary, Anna Zink, Lara Codecá, and Siobhán Clarke. 2021. 'A Digital Twin Smart City for Citizen Feedback'. *Cities* 110 (March): 103064. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064>.

Wichmann, Robert Lawrence, Boris Eisenbart, and Kilian Gericke. 2019. 'The Direction of Industry: A Literature Review on Industry 4.0'. In . Delft.

Zabala, Laura, Jesus Febres, Raymond Sterling, Susana López, and Marcus Keane. 2020. 'Virtual Testbed for Model Predictive Control Development in District Cooling Systems'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 129 (September): 109920. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109920>.

Zheng, Chuanjun, Jingfeng Yuan, Lei Zhu, Yajing Zhang, and Qiuhe Shao. 2020. 'From Digital to Sustainable: A Scientometric Review of Smart City Literature between 1990 and 2019'. *Journal of Cleaner Production* 258: 120689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120689>.

G.Borgognone, D.Carpanetto- L'idea della storia volume 2- dalla metà del.Seicento alla fine dell'Ottocento, Pearson

Ringraziamenti

Alla fine di questa tesi, è doveroso porre un sincero ringraziamento a tutti coloro che, in momenti diversi e in vari modi, mi sono stati accanto in questo percorso universitario.

Desidero ringraziare i professori che si sono resi disponibili durante la stesura di questa tesi. Avere delle persone, che credono in me e nel lavoro che sto facendo, mi è stato di grande aiuto per poter andare avanti. Inoltre, ci tengo a ringraziare tutti gli esperti esterni all'università, che non hanno indugiato a rispondere alle domande, relative all'argomento della mia tesi.

Il ringraziamento più grande va alla mia famiglia e, principalmente ai miei genitori. Mio padre e mia madre mi hanno permesso di iniziare un percorso formativo totalmente nuovo per me, fino ad arrivare a quest'ultimo traguardo. Mi sono sempre stati accanto, anche nei momenti più bui di questi due anni. Non so se, in questo caso, un sincero *grazie* possa bastare.

Vorrei ringraziare i miei nonni: sagge persone dal cuore d'oro, esempi di vita e punti di riferimento costanti. Loro mi hanno insegnato che la vita è dura, ma che restare in piedi è mio dovere. D'altra parte, sono proprio i miei nonni a fornirmi le scarpe giuste per il mio cammino.

Un enorme ringraziamento va ai miei amici, colleghi e persone speciali. Mi riferisco a tutte quelle persone che mi sono state vicine, ognuno in un modo diverso. Ho dovuto superare diversi ostacoli e, senza di voi, sarebbe stato tutto più difficile. In particolare, ringrazio chi mi conosce da sempre e non esita ad allontanarsi; chi ha iniziato a conoscermi da poco, ma che crede in me più di quanto lo faccia io stessa; e, infine, quelle persone che

ho perso durante la strada, perché mi hanno fatto capire quanto effettivamente valgo.

E poi ci sono io.

L'ultimo grazie, infatti, va alla Beatrice del passato, per non essersi mai arresa, alla Beatrice del presente, che continua a coltivare i propri sogni, e alla Beatrice del futuro, una persona che confido, un giorno, possa sentirsi orgogliosa di tutto il sudore e la fatica con cui ha avuto a che fare.

Concludo con una citazione di William Shakespeare, che spero possa rappresentare almeno una piccola parte di tutto il mio affetto e gratitudine:

*Altra risposta non posso darvi che “grazie”, e ancora
“grazie”.*