



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in
Architettura per il Progetto Sostenibile
a.a. 2022/2023

Urban Digital Twin a supporto della transizione verso città Net Zero

Relatore:
Prof.ssa Patrizia Lombardi

Candidata:
Allegra Montefusco s291510

Dicembre 2023

Indice

ABSTRACT IT	1
ABSTRACT EN	2
<u>CAPITOLO 1: LE CITTÀ DEL FUTURO VERSO LA SOSTENIBILITÀ</u>	3
BACKGROUND	3
CITTÀ ED EMISSIONI	4
PROGRAMMI E STRATEGIE VERSO LA SOSTENIBILITÀ	6
PROGRAMMA NET ZERO CITIES	10
OBIETTIVI TESI	12
DOMANDE DI RICERCA	12
METODOLOGIA DI LAVORO	13
STRUTTURA TESI	15
<u>CAPITOLO 2: DIGITAL TWIN, DEFINIZIONE E APPLICAZIONE IN AMBITO URBANO</u>	16
TECNOLOGIE DELLA CITTÀ DEL FUTURO	16
DIGITAL TWIN	23
URBAN DIGITAL TWIN	26
URBAN DIGITAL TWIN E LA CRISI CLIMATICA	29
I SETTORI IN AMBIENTE URBANO	30
EDILIZIA	30
MOBILITÀ E GESTIONE DELLE RISORSE	33
INIZIATIVE EUROPEE	35
HORIZON 2020 PROJECTS	35
PROGRAMMA NET ZERO CITIES	36
<u>CAPITOLO 3: SVILUPPO DEL FRAMEWORK DI VALUTAZIONE</u>	40
METODOLOGIA DI ANALISI DELLA LETTERATURA	40
IDENTIFICAZIONE TEMATICA	41
SELEZIONE DELLE CITTÀ	50
ELABORAZIONE DEL FRAMEWORK PER L'ANALISI DEI CASI STUDIO	52
<u>CAPITOLO 4: APPLICAZIONE DEL FRAMEWORK ALLE CITTÀ SELEZIONATE</u>	56
A CHE PUNTO SONO LE CITTÀ CON LE STRATEGIE DI DECARBONIZZAZIONE	56
APPLICAZIONE DEL FRAMEWORK DI ANALISI	64
ATENE	64
HELSINKI	69
FIRENZE	74
I FATTORI DI SUCCESSO PER L'APPLICAZIONE DEL DIGITAL TWIN NELLE CITTÀ	79
<u>CAPITOLO 5: VALUTAZIONE DEI FATTORI DI SUCCESSO TRAMITE METODO DELPHI</u>	83

CHE COS'È IL METODO DELPHI?	83
ANALISI STAKEHOLDER	84
IDENTIFICAZIONE PANEL DI ESPERTI	89
DISCUSSIONE DEI RISULTATI	90
CAPITOLO 6: ELABORAZIONE DI POLICY BRIEFS	93
CAPITOLO 7: CONCLUSIONI	98
BIBLIOGRAFIA	101
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	101
BIBLIOGRAFIA GENERALE	103
SITOGRAFIA	104
APPENDICI	106
APPENDICE A1: STAKEHOLDERS CASI STUDIO	106
APPENDICE A2: RISPOSTE SONDAGGIO	112

Indice delle Figure

FIGURA 1 LARGEST URBAN AGGLOMERATION 2055, 2020, 2035, FONTE: EUROSTAT 2018	3
FIGURA 2 EXCEEDANCE OF AIR QUALITY STANDARDS IN EUROPE, FONTE: EEA 2020	4
FIGURA 3 ANDAMENTO DELLE EMISSIONI (LINEA BLU) RISPETTO ALLE ATTIVITÀ UMANE (LINEA GRIGIA) DAL 1750 AL 2021, FONTE: NOAA 2020	6
FIGURA 4 RELAZIONE TRA LE COMPONENTI DEL PNRR RILEVANTI PER GLI ENTI LOCALI E GLI SDG E TARGET DELL'AGENDA 2030, FONTE: AUMIT 2022	9
FIGURA 5 PROGRAMMA NET ZERO CITIES LOGO, FONTE: NZC	10
FIGURA 6 DIAGRAMMA ESPLICATIVO DELLA METODOLOGIA	14
FIGURA 7 DIMENSIONI OPERATIVE SMART CITIES, FONTE: RANKING OF EUROPEAN MEDIUM-SIZED CITIES, 2007	18
FIGURA 8 INCREMENTO USO TECNOLOGIA DIGITAL TWIN PER SETTORE, FONTE: WEF 2022	24
FIGURA 9 DIGITAL TWIN PER LA PIANIFICAZIONE URBANA, FONTE: CNN 2023	28
FIGURA 10 ELENCO MISSION CITIES, FONTE NZC	39
FIGURA 11 PRISMA FLOW DIAGRAM	41
FIGURA 12 ELENCO OBIETTIVI E RISPETTIVI SETTORI DI INTERESSE INDIVIDUATI DALL'AGENDA URBANA DEL MIT, FONTE: AUMIT 2022	53
FIGURA 13 PERCENTUALE EMISSIONI HELSINKI (1990-2030), FONTE: HELSINKI CITY	56
FIGURA 14 AZIONI 2022 E IL LORO STATO DI AVANZAMENTO, FONTE: HELSINKI CITY	57
FIGURA 15 TEMPERATURA IN GRECIA 2000-2020, FONTE: IEA 2020	59
FIGURA 16 NUMERO PIANI STRATEGICI, FONTE: PUMS 2023	61
FIGURA 17 STAZIONI DI RILEVAMENTO FIRENZE FONTE: MOBILITARIA 2023	62
FIGURA 18 INTERFACCIA DIGITAL TWIN ATENE, FONTE: DUET	64
FIGURA 19 INTERFACCIA DIGITAL TWIN HELSINKI, FONTE: HELSINKY CITY	69
FIGURA 20 INTERFACCIA DIGITAL TWIN FIRENZE, FONTE: SNAP4CITY FIRENZE	74
FIGURA 21 GRIGLIA POTERE-INTERESSE STAKEHOLDER, FONTE: SCIENCE DIRECT	87
FIGURA 22 MATRICE POTERE-INTERESSE STAKEHOLDER DIGITAL TWIN CASI STUDIO	88
FIGURA 23 RISULTATI SONDAGGIO	90

Indice delle Tabelle

TABELLA 1 INDIVIDUAZIONE TEMATICHE DIGITAL TWIN	42
TABELLA 2 INDIVIDUAZIONE MODELLI URBAN DIGITAL TWIN DALL'ANALISI DELLA LETTERATURA	50
TABELLA 3 "MISSION CITIES" ESTRAPOLATE DALL'ANALISI DELLA LETTERATURA CHE UTILIZZANO IL DIGITAL TWIN	51
TABELLA 4 FATTORI DI SUCCESSO PER LA DECARBONIZZAZIONE DELLE CITTÀ TRAMITE L'USO DEL DIGITAL TWIN	79
TABELLA 5 PARTECIPANTI SONDAGGIO	89
TABELLA 6 IDENTIFICAZIONE DEGLI STAKHOLDER DEL DIGITAL TWIN DI HELSINKI	107
TABELLA 7 IDENTIFICAZIONE DEGLI STAKEHOLDER DEL DIGITAL TWIN DI ATENE	109
TABELLA 8 IDENTIFICAZIONE DEGLI STAKHOLDER DEL DIGITAL TWIN DI FIRENZE	111

Abstract IT

L'impegno per una società più ecologicamente sostenibile è una priorità di portata globale, e in questo contesto le città rivestono un ruolo fondamentale. L'accelerata urbanizzazione, l'aumento delle emissioni dei gas-serra e la "corsa" verso il raggiungimento degli obiettivi climatici nel 2030, hanno dato vita al progetto europeo di "Missione Net Zero Cities". In questo contesto, un ruolo è giocato dall' "Urban Digital Twin" (Gemello Digitale Urbano), ovvero la creazione di una replica digitale in tempo reale di un ambiente urbano fisico, permettendo la simulazione, la visualizzazione e la gestione integrata di tutti gli aspetti legati alla città. L'Urban Digital Twin si presenta come uno strumento potenzialmente potente per guidare la trasformazione sostenibile delle città. Questo studio si concentra sull'esplorazione dello strumento del Gemello Digitale e delle sue applicazioni in campo urbano. Grazie alla revisione della letteratura, i modelli esistenti e operativi delle città appartenenti al progetto "Net Zero Cities", sono stati mappati e concettualizzati in termini di Visualizzazione, Data management, Accessibilità, Previsione e Partecipazione, individuate le relative applicazioni e analizzate al fine di estrapolarne le potenzialità per la pianificazione e la gestione delle smart city. L'analisi critica sviluppata nella tesi, insieme all'applicazione del metodo Delphi ed il confronto fra le città Net Zero selezionate permetteranno di individuare gli elementi di successo e di replicabilità dello strumento tecnologico, al fine di delineare delle Policy Brief utili ad un decisore pubblico per l'applicazione del Digital Twin nella propria città.

Abstract EN

The commitment to a more ecologically sustainable society is a global priority, and in this context, cities have a vital role. Accelerated urbanization, the increase of greenhouse gas emissions and the "race" towards climate goals set for 2050 have led to the birth of the European project "Mission Net Zero Cities". In support of the social and digital evolution towards Climate Change, the tool "Urban Digital Twin" is emerging, which consists of a live-time digital replica of a physical urban environment, thus allowing the simulation, visualization and integrated management of all aspects concerning the city. The Urban Digital Twin presents itself as a potentially powerful instrument to drive the sustainable transformation of cities. This thesis study will focus on exploring the concept of Digital Twin. Thanks to a review of the available literature, the existing and operational models of cities within the Net Zero Cities project have been mapped and conceptualized in terms of Visualization, Data Management, accessibility, forecast and Participation. The corresponding applications have been identified and analyzed with the goal of extrapolating their potential towards management and planning of smart cities. The comparison among cities and the application of a Delphi method allow to identify the fields which require further analysis, weaknesses, and open points of the current situation to outline Policy Briefs useful for a public decision-maker considering the application of the Digital Twin in their city.

CAPITOLO 1: Le città del Futuro verso la Sostenibilità

Background

Prima di parlare di “Città del Futuro” è necessario fare un passo indietro verso le dinamiche dei “sistemi urbani”, nello spazio fisico in cui si intrecciano innovazione, tecnologia, sperimentazione e cambiamento. La città è complessa nel suo evolversi continuo parallelamente alle sfide che, nel corso della storia, si sono presentate (*Climate change*, pandemie, guerre politiche, crisi economiche...), ed è all’interno dei suoi limiti geografici che la città risponde alle esigenze dell’uomo tramite i servizi e le infrastrutture che offre. Tenendo conto dei trend verificatosi negli ultimi decenni, nel 2015 le aree urbane hanno ospitato oltre 6,1 miliardi persone, quasi il doppio rispetto al 1975, e la loro superficie (impronta edificata) ha superato la metà un milione di km² (un aumento del 20% dal 2000)¹.

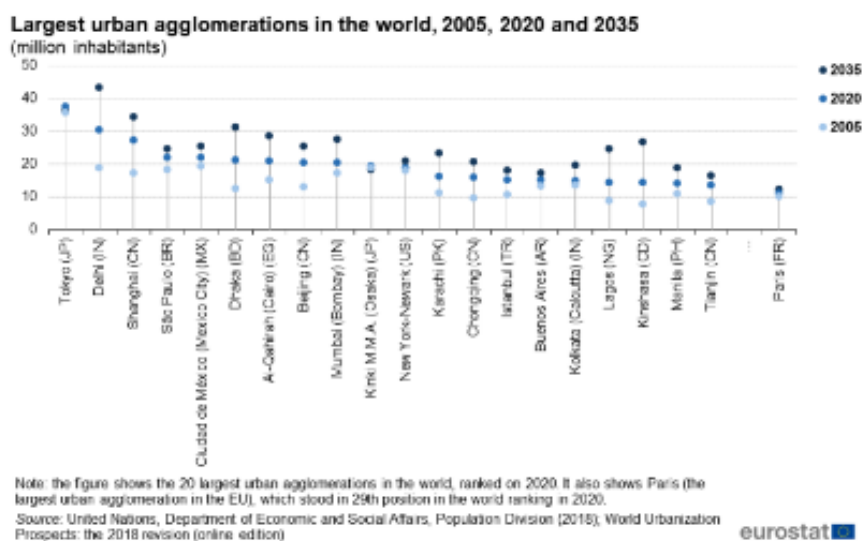


Figura 1 Largest urban agglomeration 2005, 2020, 2035, Fonte: Eurostat 2018

Diversamente dal resto del mondo, in particolare dai Paesi dalle economie emergenti, la popolazione in Europa e nel Nord America, ha avuto un andamento inverso rispetto alla crescita dell’area urbana. Ciò significa che viene consumata molta più terra per ospitare nuovi cittadini rispetto al passato, e le previsioni saranno

¹ European Commission, Joint Research Center (JRC), “Future of the Cities – Opportunities, Challenges and the way forward” report, April 2019

che entro il 2030 l'area edificata aumenterà del 3%. A seguito di queste tendenze, possiamo dire che l'urbanizzazione e la crescita demografica, sono fortemente legati ma richiedono uno sviluppo che sia necessariamente sostenibile affinché si creino le migliori condizioni di benessere e un'alta qualità della vita nelle "Città del Futuro".

Città ed Emissioni

Con la crescita demografica e degli insediamenti urbani aumentano anche le sfide che una città deve affrontare.

Attualmente, pur occupando solo il 4% a livello di impronta territoriale, la percentuale di energia che viene consumata dalle città equivale al 65-70%. Essendo luoghi di residenza, di lavoro e socialità di circa il 75% della popolazione, le emissioni dovute agli edifici, trasporto, gestione rifiuti (costruzione, climatizzazione, trasporto materie prime, trasporto cittadini, approvvigionamento alimentare, produzione...) creano un grande problema di inquinamento atmosferico. Secondo le valutazioni dell' *European Environment Agency* (EEA), quasi il 97% dei cittadini è esposto a concentrazioni di particolato fine (PM_{2.5}) e ad elevati livelli di ozono e biossido di azoto, Particolato (PM), ozono (O₃), biossido di azoto (NO₂), anidride solforosa (SO₂) e il benzo[α]pirene (BaP) andando ben oltre gli standard definiti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS).

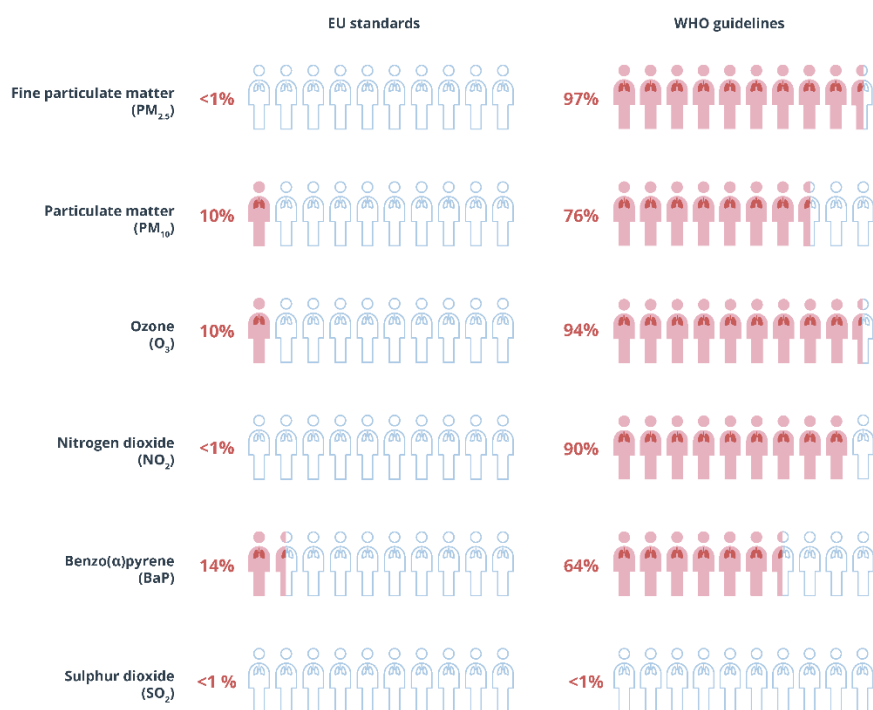


Figura 2 Exceedance of air quality standards in Europe, Fonte: EEA 2020

L'uso di energia è la prima causa responsabile dell'emissione dei gas serra, attribuibile principalmente ai trasporti, all'agricoltura, dalla combustione dei combustibili fossili per l'utilizzo industriale e per la gestione dei rifiuti. Valori che inoltre, sono notevolmente incrementati dalla ripresa post-pandemia e ha provocato un considerevole aumento delle temperature (si prevedono +1.5°C nei prossimi 10 anni). Inoltre, limitare l'aumento della temperatura globale a 1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali è essenziale per evitare i peggiori impatti dei cambiamenti climatici e proteggere il pianeta ma la Terra è già circa 1,1 °C più calda rispetto alla fine del 1800 e le emissioni di gas a effetto serra continuano ad aumentare. Per raggiungere gli obiettivi stipulati dall'Accordo di Parigi, ovvero:

- Mantenere l'aumento della temperatura globale al di sotto del 1,5°C;
- Riduzione dei gas serra entro il 2030;
- Raggiungimento zero netto entro il 2050;
- Piantagione di 3 miliardi di nuovi alberi nell'UE entro il 2030

è necessaria una transizione rapida ed efficace verso fonti di energia rinnovabile oltre alla riduzione dell'uso dei combustibili fossili, il tutto coniugato a forti azioni di governo per incentivare questi cambiamenti e affrontare altre cause dei cambiamenti climatici.

Sempre più comune è l'espressione 'Net Zero' che si riferisce all'equilibrio tra la quantità di gas serra prodotti dalle attività umane e la quantità rimossa dall'atmosfera². Invece, le emissioni residue devono essere necessariamente bilanciate in quanto considerate inevitabili, attraverso un assorbimento equivalente. Sulla base delle analisi del NOAA (*National Oceanic and Atmosphere Administration*) immettiamo più anidride carbonica nell'atmosfera di quanto i "pozzi naturali" (processi che assorbono l'anidride carbonica ovvero foreste e oceani) possano rimuovere, per cui la quantità di CO₂ nell'atmosfera aumenta ogni anno inarrestabile. L'urbanizzazione in atto in questi ultimi anni e l'incremento demografico, non fanno altro che concentrare le emissioni di carbonio all'interno e nei pressi delle città, dove avvengono le maggiori attività dell'uomo. Dal grafico sottostante, infatti si evince una stretta relazione fra le attività umane e l'incremento dell'anidride carbonica [2].

² Carlon, O. (2022). Net zero (emissioni). IPCC - Focal Point Italia. <https://ipccitalia.cmcc.it/net-zero-emissioni>

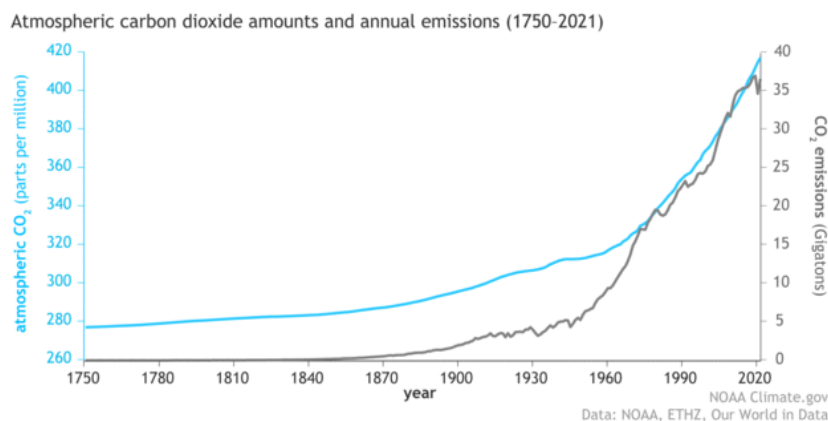


Figura 3 Andamento delle emissioni (linea blu) rispetto alle attività umane (linea grigia) dal 1750 al 2021, Fonte: NOAA 2020

Gli Stati membri dell'UE, secondo il regolamento della governance ((UE) 2018/1999), sono obbligati annualmente a comunicare tramite un inventario, circa le emissioni di ogni settore, da cui emerge che il settore energetico (72%), industriale (9%) e agricolo (10%)³ sono i maggiori emettitori di gas a effetto serra, come emerso dal report del 2021 dell'EEA, ed è molto importante far emergere ed essere a conoscenza dei seguenti dati in modo da direzionare i rispettivi Stati verso le strategie più adeguate. Le città risultano per cui essere contemporaneamente parte del problema e della soluzione in quanto luogo di sviluppo di tecnologie di opportunità per convertire i vari settori e renderli resilienti e sostenibili.

Programmi e Strategie verso la Sostenibilità

“Per conseguire l'obiettivo a lungo termine relativo alla temperatura [...], le Parti mirano a raggiungere il picco mondiale di emissioni di gas a effetto serra al più presto possibile [...] e a intraprendere rapide riduzioni in seguito, in linea con le migliori conoscenze scientifiche a disposizione, così da raggiungere un equilibrio tra le fonti di emissioni e gli assorbimenti antropogenici di gas a effetto serra nella seconda metà del secolo.”

Articolo 4 dell'Accordo di Parigi

L'avvio di una transazione energetica richiede un lavoro (fra tutti gli enti istituzionali, pubblici e privati) che non sia più verticale ma trasversale e sistemico. La collaborazione fra energia, trasporto, gestione rifiuti ecc.... risulta complicata da ottenere ma

³ <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20180301STO98928/emissioni-di-gas-serra-per-paese-e-settore-infografica>

assolutamente necessaria affinché si raggiunga lo sviluppo sostenibile in linea con gli obiettivi dell'Accordo di Parigi.

È in questo contesto che le città si impegna a contrastare queste sfide attraverso il supporto delle strategie politiche, sociali ed economiche (su diverse scale) per garantire la cooperazione internazionale, delle tecnologie e dei dati per accelerare lo sviluppo e l'adattamento, della governance e della partecipazione cittadina per conoscere e divulgare.

In relazione al Green Deal, le città e i cittadini e i sindaci iniziano ad avanzare in prima linea verso il cambiamento. Infatti, già nel 2008, l'*European Commission* (EU) ha lanciato l'iniziativa *Covenant of Mayors* (CoM) che riunisce annualmente migliaia di governi locali e autorità, che si impegnano volontariamente nella realizzazione degli obiettivi climatici. L'originalità e la forza dell'iniziativa sta nell'aver introdotto un approccio dal basso verso l'alto in un processo di cooperazione multilivello tra i business locali e i cittadini.

In particolare nell'ambito delle iniziative, le città firmatarie si impegnano a sviluppare un piano d'azione per l'energia e il clima sostenibile (PAES, documento tecnico- politico che esplica le misure dettagliate e le strategie a lungo termine che si scelgono di intraprendere) e a fornire un monitoraggio della sua attuazione per le azioni di mitigazione (attraverso un inventario delle emissioni sul territorio, IBE⁴ e IME⁵) e per le azioni di adattamento (su una valutazione dei rischi e delle criticità provocate dal cambiamento climatico). I settori strategici per l'elaborazione delle azioni: terziario, municipale e trasporti per quanto riguarda la mitigazione; nel caso dell'adattamento: edifici, trasporti, energia, acqua, rifiuti, gestione del territorio, ambiente e biodiversità, agricoltura, salute, emergenza, turismo⁶.

A 10 anni dalla sua nascita, sono stati sviluppati circa 5900 piani di azione e sulla base dell'analisi condotta dal JRC, le città firmatarie hanno ottenuto una riduzione del 23% delle emissioni di CO2.

Nella logica di un pensiero globale e a lungo termine, il Ministero della Transizione Ecologica (MiTE) nel luglio 2019, ha lanciato un bando il cui obiettivo principale è quello di allineare le azioni delle diverse regioni e città metropolitane italiani agli obiettivi stabiliti nell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite e nella Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile (SNSvS).

⁴ L'IBE quantifica la CO2 associata ai consumi energetici all'interno del territorio comunale e consente di scegliere le azioni più appropriate

⁵ L'IME mostrano l'avanzamento verso l'obiettivo

⁶ <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1KuerR3oXo1spkHb1upQLo3brgrVd08Y1/edit#gid=559896346>

L'Agenda 2030 è un programma d'azione globale adottato nel 2015 dalle Nazioni Unite, che mira a promuovere lo sviluppo sostenibile in tutto il mondo. L'agenda comprende 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs, *Sustainable Development Goals*) che coprono diverse sfere, tra cui la riduzione della povertà, la lotta al cambiamento climatico, l'accesso all'energia pulita, l'istruzione di qualità e la promozione della pace e della giustizia.

La *Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile* (SNSvS) è un documento tecnico che definisce gli obiettivi, le priorità e le azioni per il raggiungimento dello sviluppo sostenibile in Italia. Questa strategia mira a integrare gli aspetti economici, sociali e ambientali per promuovere un modello di sviluppo equo, inclusivo e rispettoso dell'ambiente.

Attraverso il bando lanciato dal MiTE, le Regioni e le Città metropolitane italiane possono presentare progetti e proposte per sviluppare Agende regionali e metropolitane per lo sviluppo sostenibile. Queste agende dovrebbero includere azioni concrete e misure per promuovere la sostenibilità in diverse aree, come l'energia, l'ambiente, l'agricoltura, la mobilità, l'istruzione e l'economia.

Le linee guida per la definizione dell'Agenda Urbana per lo Sviluppo Sostenibile si basano su quattro aspetti fondamentali che consistono nella Policy Coherence (Coerenza con il PNRR, Integrazione di Piani Strategici e Allineamento con piani settoriali), Processo Multi-Stakeholder (Stakeholder Istituzionali e sociali, Imprese e Cittadini, SDG, Target e Indicatori (Processo di monitoraggio e reporting), Risorse Umane e Strumentali (Investimenti, attribuzione delle responsabilità e formazione).

Coerentemente con le linee guida sopracitate, si procede a step verso la redazione del documento, redatto dal Sindaco e approvato dalla Giunta comunale, in cui si traccia il percorso, si esplicano gli obiettivi, gli attori coinvolti con un'impostazione metodologica che procede in parallelo. E' opportuno fornire un quadro di contesto per caratterizzare e dare attendibilità agli interventi che si scelgono di attuare, e identificare e allocare i fondi economici destinati al progetto⁷.

Particolarmente interessanti risultano, in Italia, le risorse del *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza* (PNRR), i cui fondi possono contribuire al raggiungimento degli SDG. Una buona parte di questi

⁷ Università Bocconi, Linee guida per l'implementazione di un percorso di agenda urbana e territoriale orientata agli SDG – Progetto: Linee guida nazionali per l'Agenda Urbana, settembre 2022

fondi⁸ sono stati indirizzati al settore delle infrastrutture e reti multimodali di trasporto, in quanto cruciali nella modernizzazione del Paese e fondamentali ai fini della transizione energetica. Nel periodo del Governo Draghi, il *Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibile* (MIMS), ora Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT), ha infatti promosso diverse strategie per accompagnare un miglioramento della qualità della vita attraverso il potenziamento delle infrastrutture e della mobilità sostenibile, investendo non solo nei servizi strettamente legati al settore, ma avviando programmi sull'edilizia e la qualità dell'abitare al fine di rafforzare quell'approccio globale e trasversale. Lo stesso MIT ha promosso e messo a punto la Prima Agenda Urbana Nazionale⁹, concepita come uno strumento dinamico di orientamento delle politiche urbane del Ministero verso il conseguimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda ONU 2030 e comprende uno specifico focus su Tecnologie e Città.

M1C3	Turismo e cultura 4.0	SDG e target dell'Agenda 2030
M2C1	Agricoltura sostenibile ed economia circolare	SDG 2 (target 2.3 e 2.4); SDG 6 (target 6.3); SDG 8 (target 8.1-8.4); SDG 11 (target 11.4 e 11.6); SDG 12 (target 12.1-12.6)
M2C2	Transizione energetica e mobilità sostenibile	SDG 2 (target 2.4); SDG 7 (target 7.2); SDG 8 (target 8.1 e 8.9); SDG 9 (target 9.5 e 9.c); SDG 11 (target 11.2, 11.4 e 11.6); SDG 12 (target 12.1, 12.2 e 12.6)
M2C3	Efficienza energetica e riqualificazione degli edifici	SDG 7 (target 7.2 e 7.3); SDG 8 (target 8.1 e 8.9); SDG 11 (target 11.1 e 11.6); SDG 12 (target 12.1 e 12.2)
M2C4	Tutela del territorio e della risorsa idrica	SDG 3 (target 3.9); SDG 6 (target 6.3 e 6.5); SDG 11 (target 11.3-11.5); SDG 12 (target 12.5); SDG 13 (target 13.1); SDG 15 (target 15.3 e 15.9)
M4C1	Potenziamento dell'offerta dei servizi di istruzione dagli asili nido alle Università	SDG 4 (target 4.1, 4.4 e 4.7); SDG 8 (target 8.1, 8.2, 8.3 e 8.6); SDG 9 (target 9.1, 9.4 e 9.5); SDG 11 (target 11.3 e 11.5)
M5C2	Infrastrutture sociali, famiglie, comunità e terzo settore	SDG 1 (target 1.2 e 1.5); SDG 3 (target 3.5); SDG 5 (target 5.4); SDG 10 (target 10.2); SDG 11 (target 11.1); SDG 16 (target 16.1)
M5C3	Interventi speciali per la coesione territoriale	SDG 11 (target 11.1, 11.3-11.5 e 11.b); SDG 13 (target 13.1)

Figura 4 Relazione tra le componenti del PNRR rilevanti per gli Enti locali e gli SDG e target dell'Agenda 2030, Fonte: AUMIT 2022

⁸ Nell'ambito del PNRR, Missione 2, Componente M2C2, con il D.M. n. 530 del 23/12/2021 sono stati ripartiti **1,915 miliardi di euro** destinati all'acquisto di autobus ad emissioni zero con alimentazione elettrica o ad idrogeno, e alla realizzazione delle relative infrastrutture di supporto all'alimentazione, per il rinnovo del parco veicoli dei servizi di trasporto pubblico locale, nei Comuni.

Ulteriori **500 milioni di euro** destinati all'acquisto di treni ad alimentazione elettrica o a idrogeno per il rinnovo delle flotte del materiale rotabile ferroviario utilizzato per servizi di trasporto regionale di interesse delle Regioni e Province autonome.

Nell'ambito del PNRR, Missione 2, Componente M2C2, con il D.M. n. 509 del 15/12/2021, sono stati ripartiti ulteriori **150 milioni di euro** destinati al rafforzamento della mobilità ciclistica e in particolare realizzazione di almeno **200 km aggiuntivi di piste ciclabili urbane e metropolitane** entro il 31 dicembre 2023 e alla realizzazione di almeno **365 km aggiuntivi di piste ciclabili urbane e metropolitane** entro il 30 giugno 2026, da realizzare nelle città che ospitano le principali università, da collegare a nodi ferroviari o metropolitani ad opera dei Comuni.

⁹ https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2023-01/AGENDA_URBANA_MIMS.pdf

Il 9 settembre 2022, è stato sottoscritto da parte del MIT, Un Protocollo d'Intesa con i sindaci di nove città metropolitane, facenti parte della Missione 100 *Climate neutral and smart cities by 2030* in cui l'Unione Europea ha selezionato 100 città dei propri Stati Membri tra cui 9 italiane: Bergamo, Bologna, Firenze, Milano, Padova, Parma, Prato, Roma e Torino. Le città verranno supportate dal programma *NetZero Cities* di Horizon Europe, formata da associazioni, reti di città e Università, e si impegneranno con i propri *Climate City Contract*, nei confronti dell'Unione Europea, delle autorità nazionale, regionali e locali a raggiungere la neutralità climatica in tutti i settori.

Il *Climate City Contract* è uno strumento focale nell'indirizzare le sfide del *climate neutrality* e realizzare al meglio l'EU policies attraverso un approccio multilivello trasversale. Lo scopo è di:

- esplicitare le ambizioni e gli impegni di tutte le parti coinvolte nella Missione;
- identificare e superare le criticità come base della strategia di transizione;
- coordinare stakeholder e potenziare le città sulla base di un obiettivo comune;
- coordinare le autorità nazionali/regionali/locali coinvolte e fornire alle città un quadro di riferimento normativo ed economico che supporti i progetti;



Figura 5 Programma Net Zero Cities Logo, Fonte: NZC

La caratteristica di ogni Climate Contract è che si adatta alle circostanze di ciascuna città ma si attende ai goals e ai target dell'Agenda 2030, specificandone le strategie, i piani, gli stakeholders e le responsabilità. Il contratto viene stipulato da più parti che comprendono: la città (compresa del suo primo cittadino e della giunta, degli enti e delle aziende scelte nell'avviare il progetto, e non ultima la cittadinanza), la Commissione Europea e le rispettive autorità nazionali e regionali che si impegnano ad affrontare le seguenti sfide:

- **Gestione della domanda di energia**, perché il consumo globale di elettricità è destinato a crescere di quasi il 60% entro il 2050¹⁰;
- **Controllo del settore edilizio** e delle richieste di abitazione, parallelamente all'aumento della popolazione;
- Rispondere alla pressione delle **infrastrutture**, perché più persone significano più domanda di trasporti pubblici, sistemi sanitari, scuole, logistica, acqua e infrastrutture per i rifiuti;
- Ottimizzando l'**uso delle nuove tecnologie**, le città devono sfruttare i cambiamenti indotti dalla quarta rivoluzione industriale per passare a nuove fonti di energia, promuovere nuovi materiali da costruzione e sfruttare il potenziale delle tecnologie digitali per migliorare l'efficienza del carbonio;
- Ottimizzazione dei **nuovi modelli economici**, poiché le città devono sfruttare il potere dell'economia circolare, in cui il riciclaggio svolge un ruolo importante e le merci possono essere prestate più volte. Il 12 maggio 2023 è stato organizzato a Bologna, il Festival dello Sviluppo Sostenibile 2023 dove i rappresentanti comunali delle nove città italiane coinvolte nella Missione Europea, hanno presentato le proprie strategie e gli sviluppi delle strategie già attuate.

La maggior parte delle città hanno investito sulle infrastrutture legate alla mobilità (incremento del servizio ferroviario da 1 ora a 15 minuti, sostituzione degli autobus con autobus elettrici, incremento dei percorsi ciclabili e pedonali) e sull'edilizia (prestazione ed efficientamento energetica, teleriscaldamento e distribuzione).

Si Introduce dunque, un modello nuovo di città, che non solo deve coinvolgere tutti i settori in una stretta collaborazione ma deve garantire anche parità di accesso alle risorse e durabilità in un sistema urbano organizzato, pianificato e innovativo¹¹.

¹⁰ International Energy Agency IEA, World Energy Outlook 2022 Report, November 2022

¹¹ European Commission, Proposed Mission: 100 Climate-neutral Cities by 2030 – by and for the Citizens, Report of the Mission Board for climate-neutral and smart cities, Independent Expert Report, Brussels, Settembre 2020

Le città beneficiano di tecnologie digitali avanzate come Internet of Things (IoT), Intelligenza Artificiale (AI) e data analytic solution per raggiungere gli obiettivi del Green Deal e far fronte alle sfide del cambiamento climatico. Investendo nelle tecnologie, la città offre un servizio ai cittadini quanto più chiaro e trasparente anche dal punto di vista burocratico, migliora la governance e attrae i cittadini ad agire in modo positivo per la rete urbana stessa.

Obiettivi Tesi

La transizione verso una società più sostenibile è una priorità globale, e le città svolgono un ruolo cruciale in questo processo. La crescente urbanizzazione e la rapida evoluzione delle tecnologie digitali hanno portato all'emergere del "Digital Twin Urbano". Questo strumento si riferisce alla creazione di una replica digitale in tempo reale di una città fisica, consentendo la simulazione, la visualizzazione e la gestione integrata di tutti gli aspetti urbani. Il "Gemello Digitale" potrebbe rappresentare uno strumento potente nel supportare la trasformazione sostenibile delle città.

Il lavoro della tesi, mira ad individuare le strategie e tecnologie messe in atto dalle città facenti parte della Missione Net Zero Cities, esplorando il concetto di Digital Twin Urbano, analizzando le sue potenzialità, applicazioni e benefici per la pianificazione e la gestione delle città intelligenti. In particolare, si intende, attraverso l'analisi di letteratura e casi studio, verificare se esistono fattori abilitanti e di successo per l'applicazione di questa tecnologia che possano supportare il percorso di decarbonizzazione delle città che si dirigono verso la neutralità climatica.

Domande di ricerca

- *“Quali sono gli ambiti di maggior applicazione del Gemello Digitale in ambito urbano?” “In che modo si adatta alle diverse città?”*
- *“Quali sono i fattori abilitanti e di successo di questa tecnologia in ambito urbano?”*
- *Come il Digital twin aiuta la decarbonizzazione delle città?*

La ricerca è suddivisa in cinque fasi chiaramente definite, ognuna delle quali è progettata per contribuire al raggiungimento degli obiettivi della tesi relativi all'applicazione dei Digital Twin nelle città Mission.

Fase 1: Analisi della Letteratura e delle Politiche Europee per le 100 Mission Cities

La prima fase di questo processo di ricerca è dedicata a una revisione della letteratura esistente relativa all'implementazione dei Digital Twin in contesti urbani. Questa fase è di importanza fondamentale poiché ci permette di ottenere una comprensione approfondita dei concetti chiave, delle sfide e delle opportunità legate all'utilizzo dei Digital Twin nelle città. Inoltre, esamineremo le politiche europee relative alle Mission Cities, con un focus particolare su come queste politiche possano sostenere o essere integrate nell'adozione dei Digital Twin. Questa fase svolge un ruolo cruciale nel fornire le basi teoriche e il contesto necessari per le fasi successive.

Fase 2: Sviluppo di un Quadro di Analisi e Selezione di una Campione di Città Mission

La seconda fase comporta lo sviluppo di un quadro di analisi basato sui risultati della revisione della letteratura. Questo quadro è progettato per valutare l'applicabilità e il potenziale successo dei Digital Twin nelle città Mission. In parallelo, selezioneremo un campione rappresentativo di città Mission che saranno soggette a uno studio approfondito. Queste città sono state scelte per coprire una vasta gamma di contesti urbani ed economici e saranno esaminate alla luce dei fattori identificati nel quadro di analisi.

Fase 3: Applicazione del Quadro di Analisi ai Casi Studio e Identificazione dei Fattori di Successo

Nella terza fase, il quadro di analisi sviluppato sarà applicato alle città campione precedentemente identificate. Questa analisi mira a identificare i fattori chiave di successo per l'implementazione dei Digital Twin in questi contesti urbani. Saranno presi in considerazione gli aspetti tecnici, organizzativi, economici e sociali, consentendo una visione completa delle sfide e delle opportunità.

Fase 4: Verifica dell'Applicabilità dei Fattori Identificati tramite il Metodo Delphi

La quarta fase coinvolge la verifica dell'applicabilità dei fattori di successo. Questa verifica verrà effettuata attraverso l'utilizzo del Metodo Delphi, coinvolgendo esperti nei settori dei Digital Twin e della pianificazione urbana. L'obiettivo principale di questa fase è fornire chiarezza su sé i fattori individuati possono essere replicati con successo nelle città o se richiedono adattamenti.

Fase 5: Definizione di Linee Guida

L'ultima fase del processo di ricerca comporta la definizione di linee guida basate sui risultati ottenuti. Queste linee guida forniranno indicazioni pratiche per la futura implementazione dei Digital Twin nelle città Mission. Saranno un contributo prezioso per i responsabili politici, gli urbanisti e altri stakeholder interessati a sfruttare questa tecnologia per migliorare la pianificazione urbana e la sostenibilità delle città.

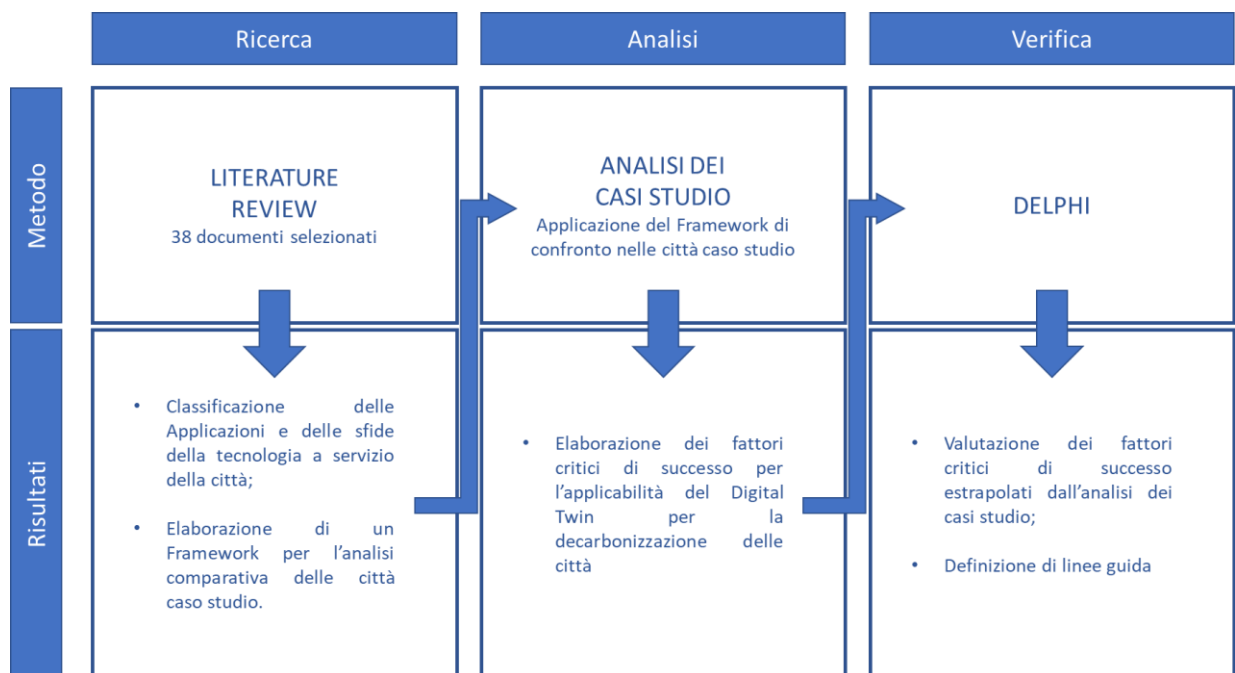


Figura 6 Diagramma Esplicativo della Metodologia

Nel primo capitolo, concentrando l'attenzione sul concetto fondamentale delle "Net Zero Cities", si esplora l'importanza cruciale della riduzione delle emissioni di carbonio nell'ambiente urbano, analizzando da vicino gli obiettivi e le sfide emergenti nel percorso verso città più sostenibili.

Nel secondo capitolo, viene introdotto il concetto e l'importanza della Smart City, analizzando le dimensioni in cui opera in particolare nell'ambito tecnologico, esplorando successivamente le tecnologie destinate a plasmare il futuro delle città, attraverso le definizioni e le implicazioni delle tecnologie coinvolte nel sistema urbano. Vengono approfonditi i fondamenti tecnologici del Digital Twin Urbano, esaminando come questa innovazione possa valutare l'efficienza energetica degli edifici, ottimizzare i sistemi di mobilità sostenibile e gestire in modo integrato le risorse urbane vitali come energia, acqua e rifiuti. Si sottolinea anche l'importanza di progetti come le Mission Cities nell'ambito dei Digital Twin europei.

Nel terzo capitolo, si sviluppa un framework di analisi mirato e si selezionano le città caso studio. Questo processo coinvolge un'approfondita analisi della letteratura, focalizzandosi su tematiche specifiche che guidano lo sviluppo di un framework di confronto dei Digital Twin nelle città considerate nella ricerca, con l'obiettivo di individuare gli aspetti chiave di successo e replicabilità della tecnologia.

Nel quarto capitolo, si sposta l'attenzione sull'applicazione del framework di analisi alle città selezionate, contestualizzandole nel contesto europeo delle sfide e degli obiettivi di decarbonizzazione. Si esaminano da vicino i casi studio attraverso le lenti delle tematiche precedentemente identificate.

Nel quinto capitolo, si introduce il Metodo Delphi, un approccio coinvolgente che include un panel di esperti. Si discute la selezione di questo panel e si analizzano i risultati emersi da questo metodo partecipativo di valutazione.

Nel sesto capitolo, si giunge alla definizione di Policy Briefs basate sui risultati ottenuti al fine di fornire indicazioni pratiche per coloro che si impegneranno nella futura implementazione dei Digital Twin nelle città.

Il settimo capitolo rappresenta la conclusione del percorso, sintetizzando le scoperte chiave e delineando possibili sviluppi futuri.

CAPITOLO 2: Digital Twin, definizione e applicazione in ambito urbano

Tecnologie della città del futuro

A causa dell'urbanizzazione crescente e dell'aumento demografico, le domande relative alla trasformazione urbana e allo sviluppo di comunità sostenibili stanno diventando sempre più cruciali. In risposta a questa sfida, è essenziale concentrarsi sull'analisi di politiche, strategie e strumenti basati sui sistemi che ci permettano di comprendere e gestire efficacemente la trasformazione urbana, con l'obiettivo di raggiungere risultati più sostenibili.

La trasformazione urbana non è più solo una questione di costruzione fisica delle città, ma coinvolge anche l'integrazione di vari elementi per migliorare la qualità della vita dei residenti. La complessità di questo processo richiede un approccio sistemico che vada oltre i singoli aspetti e consideri l'intero sistema urbano. Le Smart City, o città intelligenti, emergono come un approccio chiave per affrontare le sfide della trasformazione urbana.

Albino e Berardi (2015)¹² trattano le varie definizioni che sono state associate al concetto di Smart City, il cui termine viene spesso modificato con aggettivi alternativi come "intelligente" o "digitale". "Smart city" è un concetto sfumato e utilizzato in modi non sempre coerenti. Non esiste un modello unico per definire una città intelligente, né una definizione unica che possa essere applicata universalmente. Il termine è stato utilizzato per la prima volta negli anni '90¹³, inizialmente focalizzandosi sull'importanza delle nuove tecnologie dell'informazione e della comunicazione per le infrastrutture urbane moderne. Tuttavia, nel corso degli anni, il concetto si è diffuso come un fenomeno di *"etichettatura urbana"*, da cui sono emerse varie definizioni a seconda del contesto.

Ad esempio, alcuni autori definiscono una smart city come una città "strumentata, interconnessa e intelligente", dove la strumentazione si riferisce alla capacità di catturare dati in tempo reale attraverso sensori e dispositivi vari, l'interconnessione riguarda l'integrazione di questi dati in una piattaforma informatica, e l'intelligenza si riferisce all'uso di analisi complesse,

¹² Vito Albino, Umberto Berardi & Rosa Maria Dangelico (2015) Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives, *Journal of Urban Technology*, 22:1, 3-21, DOI: 10.1080/10630732.2014.942092

¹³ ABB - Ambrosetti (2012), *Smart Cities in Italia: un'opportunità nello spirito del Rinascimento per una nuova qualità della vita*.

modellazione, ottimizzazione e servizi di visualizzazione per prendere decisioni operative migliori.

Nel campo dell'urbanistica, il concetto di smart city è spesso trattato come una dimensione ideologica che implica direzioni strategiche per la città. Governi e agenzie pubbliche di tutti i livelli abbracciano l'idea di intelligenza per distinguere le proprie politiche e programmi mirati allo sviluppo sostenibile, alla crescita economica, a una migliore qualità della vita per i cittadini e alla creazione di felicità.

Le comunità scientifiche europee definiscono una Smart City come l'adozione di nuove tecnologie per risolvere e gestire le numerose sfide legate allo sviluppo efficiente della città e sebbene non esista una definizione universale, le dimensioni in cui lavora sono ampiamente riconosciuti:¹⁴.

1. Economia Intelligente: Si focalizza sulla creazione di una Smart Economy, in cui l'attenzione si sposta dalla limitazione delle risorse naturali, del lavoro e del capitale a una visione che valorizza la tecnologia e la creatività. Questo include un sistema educativo di alta qualità, ricerca scientifica finanziata pubblicamente, incentivi fiscali aziendali, infrastrutture di connessione di alta qualità e servizi pubblici eccellenti.

2. Smart Mobility: Supporta gli interventi sui cambiamenti climatici e la sicurezza energetica, gestione del traffico in tempo reale, gestione dei mezzi di trasporto, sistemi di pagamento elettronico, supporto per veicoli elettrici e applicazioni di localizzazione e logistica.

3. Ambiente Intelligente: l'ambiente intelligente come una regione del mondo ampiamente dotata di sensori, attuatori e componenti informatici. Include case intelligenti e sistemi domestici che supportano le attività quotidiane delle persone attraverso complesse strategie di controllo.

4. Smart People: Sottolinea l'importanza del capitale umano nello sviluppo delle città intelligenti. Include la necessità di inclusione di persone che perseguono e creano obiettivi intelligenti, con

¹⁴ The Smart City in 6 dimensions. (2021, July 1). https://www.smart-city.uliege.be/cms/c_6946640/en/the-smart-city-in-6-dimensions

attenzione all'affinità per l'apprendimento permanente, la pluralità sociale ed etnica, la flessibilità e la creatività.

5. Smart Living: Descrive case intelligenti che acquisiscono e applicano la conoscenza degli abitanti per adattarsi agli ambienti e raggiungere obiettivi di comfort ed efficienza. Le Smart Things rendono facile connettere gli oggetti fisici a Internet, migliorando la convenienza, la sicurezza e l'efficienza.

6. Smart Governance: Riguarda l'esercizio dell'autorità politica, economica e amministrativa per gestire gli affari di una nazione. La governance intelligente utilizza la tecnologia per facilitare e supportare una migliore pianificazione e processo decisionale nelle città, mirando a una maggiore efficienza, leadership della comunità e innovazione continua nei servizi pubblici.

<p>SMART ECONOMY (Competitiveness)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Innovative spirit ▪ Entrepreneurship ▪ Economic image & trademarks ▪ Productivity ▪ Flexibility of labour market ▪ International embeddedness ▪ <i>Ability to transform</i> 	<p>SMART PEOPLE (Social and Human Capital)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Level of qualification ▪ Affinity to life long learning ▪ Social and ethnic plurality ▪ Flexibility ▪ Creativity ▪ Cosmopolitanism/Open-mindedness ▪ Participation in public life
<p>SMART GOVERNANCE (Participation)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Participation in decision-making ▪ Public and social services ▪ Transparent governance ▪ <i>Political strategies & perspectives</i> 	<p>SMART MOBILITY (Transport and ICT)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Local accessibility ▪ (Inter-)national accessibility ▪ Availability of ICT-infrastructure ▪ Sustainable, innovative and safe transport systems
<p>SMART ENVIRONMENT (Natural resources)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Attractivity of natural conditions ▪ Pollution ▪ Environmental protection ▪ Sustainable resource management 	<p>SMART LIVING (Quality of life)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cultural facilities ▪ Health conditions ▪ Individual safety ▪ Housing quality ▪ Education facilities ▪ Touristic attractivity ▪ Social cohesion

Figura 7 Dimensioni Operative Smart Cities, Fonte: Ranking of European medium-sized cities, 2007

R. Giffinger, nel report del 2007 "Smart Cities- Ranking of European medium-sized cities"¹⁵, propone una struttura gerarchica (Figura 7) trasparente per razionalizzare il concetto di città intelligente, basata sulle sei caratteristiche principali elencate precedentemente. Ciascuna caratteristica è definita da un numero di fattori, e ogni fattore è descritto da un insieme di indicatori. Sono stati scelti 33 fattori per descrivere le 6 caratteristiche, con 31 di essi utilizzati per la classifica nella valutazione e nel posizionamento delle città medie europee in base al loro sviluppo urbano.

Secondo Nam e Pardo (2011)¹⁶, le principali componenti sono la tecnologia, le persone (creatività, diversità e educazione) e le istituzioni (governance e politiche). Una città è considerata veramente intelligente quando gli investimenti nel capitale umano e sociale, insieme alle infrastrutture ICT, alimentano la crescita sostenibile e migliorano la qualità della vita. Il ruolo delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) è essenziale, ma una città intelligente deve integrare tecnologie, sistemi, servizi e capacità in una rete organica abbastanza multisetoriale e flessibile per lo sviluppo futuro e aperta. L'approccio alla creazione di città intelligenti parte dal capitale umano piuttosto che credere ciecamente che le ICT possano automaticamente crearle.

Il focus è sulla consapevolezza, flessibilità, trasformabilità, sinergia, individualità e comportamento strategico come aspetti cruciali di uno sviluppo prospettico. Il concetto di "smart city" va oltre la semplice presenza densa di ICT, abbracciando la creatività, le istituzioni orientate all'innovazione, le reti a banda larga e gli spazi collaborativi virtuali. La governance intelligente coinvolge la partecipazione di varie parti interessate nella presa di decisioni e nei servizi pubblici, enfatizzando un approccio centrato sul cittadino.

Si evidenzia che le città intelligenti iniziano dal lato del capitale umano, offrendo ambienti imprenditoriali accessibili a tutti i cittadini, e sottolinea la necessità di superare le barriere legate a lingua, cultura, educazione e disabilità per una governance intelligente. Il fattore "smart people" comprende diversi aspetti, tra cui l'affinità per l'apprendimento continuo, la pluralità sociale

¹⁵ Giffinger, Rudolf & Fertner, Christian & Kramar, Hans & Kalasek, Robert & Milanović, Nataša & Meijers, Evert. (2007). Smart cities - Ranking of European medium-sized cities.

¹⁶ Nam T., Pardo T., Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. Proceedings of the 12th Annual International Digital Government Research Conference, 2011, p.282-291

ed etnica, la flessibilità, la creatività, il cosmopolitismo, l'apertura mentale e la partecipazione alla vita pubblica.

La "smartness" non riguarda soltanto l'aggiunta di interfacce digitali alle infrastrutture tradizionali o il miglioramento delle operazioni cittadine, ma si tratta di utilizzare la tecnologia e i dati in modo consapevole per prendere decisioni migliori e migliorare la qualità della vita dei cittadini. La qualità della vita ha diverse dimensioni, che spaziano dall'aria respirata dai residenti alla loro sicurezza mentre camminano per le strade, e le numerose applicazioni digitali si concentrano su queste problematiche pratiche e umane. Secondo l'ultimo Rapporto Nazionale sull'Attività della Polizia Locale pubblicato dall'ANCI, nelle città italiane sono presenti in media 122 telecamere, con punte di 3.222 telecamere nel caso di Roma, che consentono una gestione più efficace della sicurezza pubblica durante eventi con grande affluenza, come concerti, partite di calcio o manifestazioni di piazza. Queste tecnologie forniscono anche un prezioso supporto investigativo alle forze dell'ordine in caso di reati ed è solo uno degli aspetti di miglioramento della qualità della vita, oltre ad avere, tempi di spostamento più brevi, una riduzione del carico sanitario e minori emissioni di carbonio.

Si è constatato che anche le città più avanzate devono ancora fare molto per stabilire delle fondamenta solide, implementare tutte le applicazioni disponibili e ottenere una diffusa adozione. Sebbene una buona gestione sia essenziale, i governi municipali non possono occuparsene completamente da soli e anche le aziende e i cittadini hanno un ruolo attivo nello sviluppo delle prestazioni di una città.

Una città diventa "intelligente" quando è in grado di raccogliere e analizzare grandi quantità di dati provenienti da diverse fonti¹⁷.

Questo implica la creazione e il mantenimento di una rete sofisticata di sensori, dispositivi e software interconnessi, che creano un *ecosistema*¹⁸ della città intelligente basato su:

- Digitalizzazione;
- Ottimizzazione;
- Innovazione.

¹⁷ Cos'è una Smart City? (cbinsights.com)

¹⁸ N. Komninos, "Smart Cities and Connected Intelligence, Platforms, Ecosystem and Network Effect," Routledge 2020

Indipendentemente dall'applicazione specifica di uno strumento in particolare, le città intelligenti si basano su una data governance che comprende le seguenti fasi fondamentali¹⁹:

Raccolta dei dati: Sensori intelligenti sparsi in tutta la città raccolgono dati in tempo reale su diverse condizioni ambientali.

Analisi dei dati: Le informazioni raccolte dai sensori vengono archiviate e preparate per essere utilizzate dai sistemi di Business Intelligence e Business Analytics. Questi sistemi eseguono analisi descrittive e predittive, fornendo report e informazioni utili per il city management nella presa di decisioni.

Comunicazione dei dati: Questa fase è cruciale per mettere in relazione tutti gli stakeholder e consentire azioni consapevoli e coordinate. Le tecniche di visualizzazione dei dati aiutano a divulgare i fenomeni urbani ai cittadini, il cui coinvolgimento è fondamentale per il successo dei processi intelligenti della smart city.

Azione: La smart city può implementare contemporaneamente molti processi digitalizzati. Grazie ai risultati delle analisi, si completa il ciclo avviato con la raccolta dei dati. Questi dati trasformati in informazioni utili permettono di creare nuove soluzioni, ottimizzare operazioni, gestire risorse in modo consapevole e migliorare la qualità della vita dei cittadini. Questo rende la città un luogo più inclusivo e desiderabile dove le persone vogliono vivere.

I progetti smart coinvolgono un'ampia varietà di tecnologie emergenti che collaborano sinergicamente per raggiungere una vasta gamma di obiettivi. È fondamentale prevedere una solida governance per evitare la frammentazione dei servizi digitali, che altrimenti sarebbero difficili da gestire.

Alcune delle tecnologie che contribuiscono alla creazione e gestione delle Città del Futuro sono:

Internet of Things (IoT): “La rete di dispositivi interconnessi permette la raccolta di dati da sensori e dispositivi sparsi in tutta la città, fornendo informazioni in tempo reale sulle condizioni ambientali e le attività umane”.

Big Data e Analytics: “L'elaborazione e l'analisi dei grandi volumi di dati raccolti consentono di ottenere insight significativi, facilitando decisioni più informate per il city management e l'ottimizzazione dei servizi”.

¹⁹ Cosa sono le Smart City, come funzionano. Esempi e tecnologie abilitanti (bnova.it)

Intelligenza Artificiale (AI): “L'AI è utilizzata per analizzare dati complessi, rilevare modelli e tendenze, automatizzare processi decisionali e migliorare l'efficienza dei servizi”.

Cloud Computing: “Fornisce l'infrastruttura necessaria per archiviare, elaborare e condividere dati e applicazioni in modo scalabile ed efficiente”.

Reti di comunicazione ad alta velocità: “La connettività veloce e affidabile, come le reti 5G, è essenziale per la trasmissione rapida dei dati tra i dispositivi e i sistemi della smart city”.

Sistemi di Smart Mobility: Soluzioni per il trasporto intelligente, inclusi sistemi di trasporto pubblico migliorati, piattaforme di car sharing e bike sharing.

Digital Twin

Un Digital Twin, o gemello digitale, è una rappresentazione virtuale di un oggetto o di un sistema del mondo reale²⁰. Questa rappresentazione virtuale è costantemente aggiornata grazie ai dati provenienti da sensori e altre fonti di input esterni. Il processo di creazione e aggiornamento del gemello digitale copre l'intero ciclo di vita dell'oggetto o del sistema che sta rappresentando.

I sensori collegati all'oggetto reale catturano le caratteristiche, i movimenti e altri dati rilevanti e trasmettono queste informazioni al gemello digitale che utilizza quindi programmi di simulazione, apprendimento automatico e ragionamento per elaborare questi dati e fornire informazioni utili. Può anche sviluppare modelli predittivi delle prestazioni future dell'oggetto o del sistema e delle sue reazioni a determinate condizioni.

Non è altro che una copia virtuale e dinamica di un oggetto o un sistema nella realtà. Nasce nel settore manifatturiero, in particolare da Michael Grieves²¹, che descriveva il modello digitale come lo specchio equivalente del modello fisico, comprendendo tutte le fasi del ciclo di vita dell'oggetto dalla creazione, messa in funzione, fino allo smaltimento.

Il Digital Twin si avvale di tre condizioni necessarie al suo funzionamento:

- Un oggetto fisico nella realtà;
- Un oggetto virtuale nello spazio virtuale;
- Un flusso di dati e informazioni che permetta la comunicazione e il trasferimento delle informazioni da un modello all'altro²².

Utilizza quattro tecnologie per raccogliere e archiviare dati in tempo reale, ottenere informazioni per fornire informazioni preziose e creare una rappresentazione digitale di un oggetto fisico e includono: Internet of Things (IoT), Intelligenza Artificiale (AI), Realtà estesa (XR) e Cloud. Inoltre, Utilizza una particolare tecnologia, a seconda del tipo di applicazione.

L'IoT utilizza i sensori per raccogliere i dati che vengono utilizzati per creare la duplicazione digitale dell'oggetto fisico, tenendo i dati costantemente aggiornati.

²⁰ Crisantemi, M. (2023). Digital Twin: che cos'è, come funziona e quali sono i vantaggi del gemello digitale. Innovation Post. <https://www.innovationpost.it/tecnologie/digital-twin-che-cose-come-funziona-e-quali-sono-i-vantaggi-del-gemello-digitale/>

²¹ Chief Scientist for Advanced Manufacturing presso il Florida Institute of Technology, primo ad aver coniato il termine "Digital Twin" nel 2003 nell'ambito della produzione manifatturiera, M. Grieves, J. Vickers, Origins of the digital twin concept, Florida Institute of Technology 8, 3-20

²² Kaur, M., Mishra, V. P., & Maheshwari, P. (2019). The Convergence of Digital Twin, IoT, and Machine Learning: Transforming Data into Action. In Internet of things (pp. 3–17).

Il **Cloud Computing** memorizza e accede ai dati su Internet, fornendo al Digital Twin la tecnologia di elaborazione dati, accesso e archivio degli stessi in grandissime quantità.

L'Intelligenza artificiale invece, fornisce le basi per creare una macchina intelligente, in grado di rispondere e di avere un riconoscimento delle immagini, fornendo una tecnica analitica che simula, prevede e suggerisce risoluzioni per eventuali problemi.

La Realtà Aumentata permette di avere un'esperienza immersiva, creando rappresentazioni digitali che interagiscono con l'oggetto fisico in tempo reale, consentendo agli utenti di interagire²³.

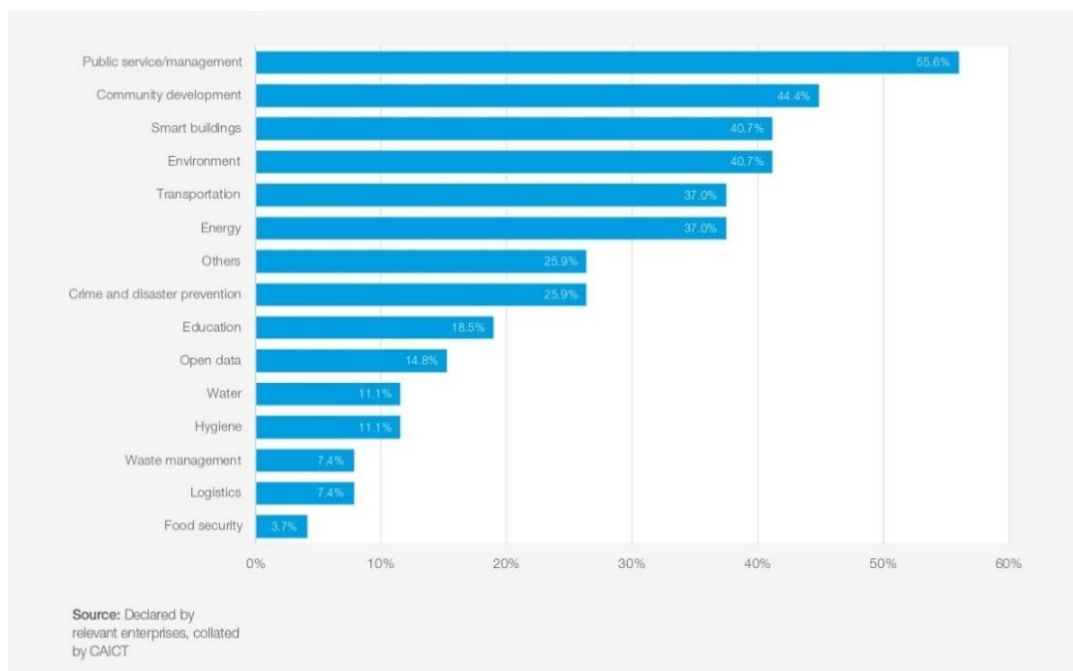


Figura 8 Incremento uso tecnologia Digital Twin per settore, Fonte: WEF 2022

Negli ultimi anni, i gemelli digitali hanno sfruttato applicazioni aziendali vitali e si prevede che la tecnologia si espanderà in diversi settori:

Produzione: l'uso del Digital Twin da parte dall'Industria manifatturiera ha consentito progressi tecnologici negli strumenti di rilevamento, monitoraggio e processo decisionale. Accompagna la produzione manifatturiera in tutte le fasi, a partire dalla progettazione alla gestione del prodotto in una logica non più reattiva ma predittiva.

Ottimizzazione della performance: permette di determinare il set ottimale di azioni che possono aiutare a massimizzare le prestazioni e a fornire programmi di miglioramento a lungo

²³ M. Attaran, S. Gokhan Celik, Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities, November 2022

termine. In particolare, nel campo dell'automotive e aerospazio, i vantaggi nell'utilizzo di questo modello sono confermati dall'azienda italiana Leonardo, la cui filosofia di progettazione rientra nella tipologia **"design by simulation"**. In questo caso, il gemello digitale permette, attraverso la simulazione dell'intero prodotto, dei singoli componenti a multi-scala, è in grado di creare un numero considerevole di prototipi virtuali e di simularne numerose configurazioni²⁴.

Agricoltura: Il settore agricolo comprende processi complessi e variabili che dipendono dalle condizioni meteorologiche, dalle condizioni del suolo e dal clima. Il Digital Twin può fornire una rappresentazione virtuale dell'azienda, per migliorare l'efficienza e la produttività, riducendo il consumo di energia e costi, tenendo conto non solo della sostenibilità a livello di impatto ambientale, ma anche attraverso la sicurezza alimentare, della produttività e della redditività. Essendo una tecnologia predittiva può aiutare nella previsione meteorologica, misurare e monitorare la gestione del suolo, analizzando la qualità dell'aria, la temperatura e l'effetto dei fenomeni naturali sul suolo produttivo o analizzare il consumo energetico²⁵. Thomas Machl, Andreas Donaubauer e Thomas H. Kolbe hanno progettato un processo di pianificazione per il monitoraggio del paesaggio agricolo all'interno di una specifica posizione geografica per l'agricoltura dell'ordine. Utilizzando i paradigmi Digital Twin, hanno definito l'implementazione di modelli spaziotemporali di paesaggi. Questi modelli consentono di trovare percorsi efficienti per il trasporto dei prodotti all'interno di una complessa rete stradale agricola²⁶.

Sanità: Il gemello digitale è stato adottato anche nel sistema sanitario, affrontando i problemi relativi all'infrastruttura creando soluzioni basate sulla tecnologia, eliminando le sperimentazioni sull'uomo e collaborando al miglioramento del servizio. In questo caso il soggetto reale è il paziente di cui viene prodotta la sua rappresentazione virtuale, al fine di valutarne lo stato fisico, uno per ogni soggetto. In particolare, per la cura del paziente, "imitare gli organi" effettuando test di screening completi, ai fini della manutenzione predittiva, simulazione dei processi operativi, raccogliendo le informazioni sui segni vitali del paziente, sulle sue

²⁴ Volonté, C. (2022, January 19). Digital Twin: l'uso che ne fa Leonardo, big manifatturiero - Industria Italiana. Industria Italiana

²⁵ C. Pylidianis, S. Osinga, I. N. Athanasiadis, Introducing digital twins to agriculture, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 184, 2021

²⁶ T. Machl, A. Donabubauer, T. H. Kolbe, Planning Agricultural Core Road Networks Based on a Digital Twin of the Cultivated Landscape, Technical University of Munich, Chair of Geoinformatics

condizioni fisiche e sulla risposta al trattamento²⁷. Un esempio è il progetto di Dell Technologies in collaborazione con i2b2 tranSMART Foundation²⁸ che ha portato avanti la ricerca per lo studio di trattamenti domiciliari per pazienti affetti da **long Covid**²⁹.

Urban Digital Twin

L'Urban Digital Twin rappresenta un'ampia applicazione del concetto di gemello digitale al sistema urbano, sulla base del concetto di smart city che si è gradualmente evoluto dal livello di modellazione 3D statico verso il livello di modellazione dinamica che combina tecnologia digitale, per la costruzione di città intelligenti. Mira ad organizzare un complesso sistema tra il mondo fisico e lo spazio virtuale in maniera che possano mapparsi a vicenda e interagire tra loro in entrambe le direzioni. Può abbinare la città fisica alla corrispondente "città gemella", formando un modello di coesistenza di entrambe e integrazione delle città fisiche nella dimensione reale e delle città digitali nella dimensione dell'informazione.³⁰

L'Urban Digital Twin non è solo l'obiettivo di una città digitale, ma è anche un elemento chiave di una città intelligente che richiede una robusta infrastruttura di dati e un supporto tecnologico. È anche una pietra miliare nella trasformazione dell'informatizzazione urbana dal cambiamento qualitativo al cambiamento quantitativo guidato dalla tecnologia, che fornisce alla costruzione di città intelligenti più spazio per l'innovazione, e una prospettiva più efficiente e interconnessa.

L'elemento centrale dell'Urban Digital Twin sono i dati. Una volta realizzato lo smart city model, ad esso vengono associati i gemelli digitali dei sistemi di gestione degli edifici intelligenti, delle infrastrutture dedicate alla mobilità di persone e beni, delle reti energetiche, delle telecomunicazioni e di distribuzione delle risorse idriche, dei sistemi per il controllo dell'inquinamento, ecc.³¹.

Aspetto altrettanto importante e che coinvolge il Digital Twin è la mobilità inteso come supporto non solo per i veicoli, ma anche nella pianificazione e gestione degli spostamenti.

²⁷ A. Haleem, M. Javaid, Exploring the revolution in healthcare systems through the applications of digital twin technology, Biomedical Technology, volume 4, December 2023, Pp 28-38

²⁸ 2021.05.05 | Dell Technologies and i2b2 tranSMART Foundation Create "Digital Twins" to Treat Long-Haul COVID-19. (n.d.).

²⁹ Leveraging the Power of Collective Data and AI-driven Research for Individual Impact (delltechnologies.com)

³⁰ Deren, L., Wenbo, Y. & Zhenfeng, Smart city basata sui gemelli digitali. Comput.Urban Sci. 1, 4 (2021)

³¹ Present. (2023, February 8). Digital twin smart city: come portare vera innovazione e sostenibilità nelle città

Le città gemelle digitali presentano quattro caratteristiche principali³²:

Mappatura precisa, implica che la città gemella digitale sviluppa una rappresentazione digitale completa delle strade urbane, ponti, coperture dei tombini, illuminazione pubblica, edifici e altre infrastrutture, integrando sensori nei livelli dell'aria, del suolo, del sottosuolo e dei corpi idrici all'interno della città fisica. Questo permette di percepire e monitorare in modo dinamico lo stato operativo della città, formando quindi un'accurata espressione delle informazioni e una mappatura della città virtuale alla città fisica nel contesto dell'informazione

Interazione virtuale-reale. L'interazione virtuale-reale significa che tutte le tipologie di "tracce", come i percorsi delle persone, la logistica e i veicoli che possono essere osservati nella città fisica, possono essere tracciati nella città virtuale una volta generati

Definizione del software. La definizione del software implica che le città gemelle stabiliscono un modello virtuale corrispondente basato sulla città fisica e simulano il comportamento delle persone, degli eventi e degli oggetti urbani nello spazio virtuale tramite piattaforme software.

Feedback intelligente. Il feedback intelligente si riferisce all'allarme precoce e intelligente di possibili effetti negativi, conflitti e potenziali pericoli nella città attraverso pianificazione, progettazione, simulazione, ecc., utilizzando la città gemella digitale per fornire contromisure ragionevoli e realizzabili.

Basandosi sulla città gemella digitale, l'integrazione di tecnologie di nuova generazione come IoT, cloud computing, big data e intelligenza artificiale può guidare e ottimizzare la pianificazione e la gestione delle città fisiche, migliorando l'offerta di servizi ai cittadini e contribuendo ulteriormente alla costruzione di città intelligenti.

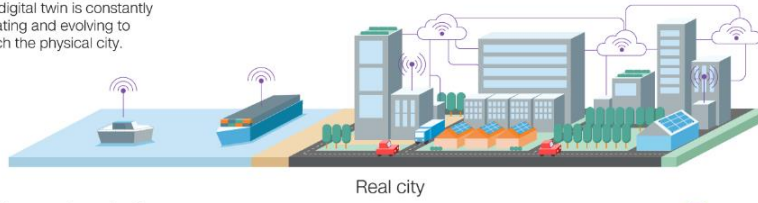
Tuttavia, si tratta di una fase di sperimentazione. Sono state sviluppate diverse città gemelle digitali che mancano però di accuratezza, completezza e qualità di rappresentazione grafica del modello.

³²J. Ferré-Bigorra, M. Casals, M. Gangoellés, The adoption of urban digital twins, *Cities*, Volume 131, Group of Construction Research and Innovation (GRIC), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain December 2022

Here's how digital twins are used for urban planning

1 Real-time data

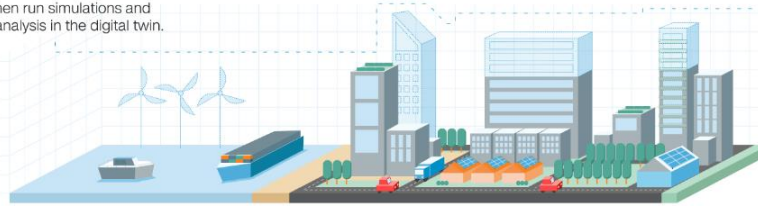
The digital twin is constantly updating and evolving to match the physical city.



Real city

2 Testing and analysis

Stakeholders such as city planners or construction teams can then run simulations and data analysis in the digital twin.



Digital twin city

3 Implementation

Source: Digital Twin Cities Centre
Graphic: Woojin Lee, CNN

CNN

Figura 9 Digital Twin per la Pianificazione Urbana, Fonte: CNN 2023

La crescente urbanizzazione e l'aumento della popolazione nelle megalopoli, insieme alla riduzione generale delle risorse disponibili e agli impatti dei cambiamenti climatici, indicano la necessità di politiche intelligenti di gestione dell'ecosistema urbano. Eventi climatici sempre più estremi nelle aree solitamente al sicuro stanno mettendo in evidenza la vulnerabilità delle città e dei loro territori. Anche le città italiane appaiono impreparate ad affrontare emergenze climatiche, con una gestione delle reti di servizi (come energia e trasporti) poco strutturata e poco efficiente.

Il gemello digitale e la tecnologia di simulazione sono strumenti cruciali per accelerare la resilienza climatica urbana attraverso la simulazione di scenari di cambiamento climatico la cui capacità di prevedere in tempo reale gli effetti di eventi disturbanti è fondamentale per sviluppare politiche di prevenzione e gestione sicura delle città.

Per ridurre le emissioni, è innanzitutto necessario individuare i punti critici. Ciò può essere realizzato attraverso una rete di sensori di qualità dell'aria distribuiti in tutta la città, che catturano continuamente dati. Il gemello digitale urbano può riprodurre questi dati e determinare quando l'inquinamento dell'aria aumenta durante il giorno, oppure includere altre informazioni come il traffico o i dati dei cantieri edili.

Il *Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)*³³ ha lanciato il progetto *Urban Intelligence*, il cui obiettivo è quello di orientare e supportare politiche urbane di gestione e partecipazione che garantiscano l'accesso alle infrastrutture e ai servizi sociali per tutti: l'alloggio, l'istruzione, l'assistenza sanitaria, le attività ricreative, un lavoro e un ambiente sicuro e che riducano il consumo di risorse naturali³⁴.

Si propone di creare un ambiente urbano resiliente, basato su:

Lo sviluppo di reti di servizi, che vanno dall'energia pulita alla mobilità, attraverso l'utilizzo di tecnologie digitali innovative e integrate per la pianificazione e la gestione.

Lo sviluppo di tecnologie dell'informazione e della comunicazione che sostengano strategie di governance incentrate sulla

³³ Redazione. (2022). Urban Intelligence, l'uso dei digital twin per l'innovazione e la sostenibilità urbana. Geosmart Magazine. <https://www.geosmartmagazine.it/2022/09/30/urban-intelligence-digital-twin-per-innovazione-e-sostenibilita/>

³⁴ Dipartimento di Ingegneria, ICT e Tecnologie per l'Energia e i Trasporti. (2018, December 18). Urban Intelligence - Dipartimento di Ingegneria, ICT e Tecnologie per l'Energia e i Trasporti. Dipartimento Di Ingegneria, ICT E Tecnologie per L'Energia E I Trasporti. <http://www.diiitet.cnr.it/urban-intelligence/>

partecipazione pubblica e strumenti digitali, inclusi sistemi informativi geospaziali, per favorire la pianificazione e la progettazione urbana integrata a lungo termine. L'utilizzo di modelli derivati dai sistemi complessi per il monitoraggio e l'analisi dei rischi, con l'obiettivo di migliorare la resilienza delle città di fronte a catastrofi e cambiamenti climatici (come alluvioni, siccità, ondate di calore, ecc.), per promuovere la sicurezza alimentare e la nutrizione, la salute fisica e mentale, l'identità culturale e la qualità dell'aria sia domestica che ambientale, riducendo l'inquinamento acustico. Ciò mira anche a promuovere insediamenti umani attraenti e abitabili, con una particolare attenzione alla conservazione delle specie endemiche e dei siti di rilevanza storico-culturale.

Sfruttando le sue competenze multidisciplinari, il CNR propone di ampliare il concetto di Città Intelligente attraverso l'implementazione di Gemelli Digitali che coprano l'intera comunità urbana. Questi sistemi digitali integrati e le tecniche di analisi predittiva consentono di creare una replica virtuale e completa di un sistema fisico in evoluzione nel tempo, consentendo di monitorarne lo sviluppo e l'operatività. Il risultato è l'apprendimento e la previsione dei comportamenti urbani che permetterà ai decisori urbani di valutare gli effetti del cambiamento climatico nelle città e scegliere la migliore direzione verso la resilienza, adattamento e superamento.

I settori in ambiente Urbano

Edilizia

Edilizia e Beni Immobili

Secondo gli ultimi rapporti dell'ONU, gli edifici da soli contribuiscono al 40% delle emissioni globali di anidride carbonica. Nel perseguire gli obiettivi di zero netto entro il 2050 a livello globale, gli sviluppatori, i gestori e gli operatori immobiliari devono adottare misure significative per *decarbonizzare* l'intero settore immobiliare. Questo potrebbe includere il miglioramento energetico degli edifici esistenti, la riprogettazione dei nuovi edifici e, soprattutto, l'ottenimento della necessaria trasparenza per guidare le decisioni con la partecipazione cittadina.

Inoltre, la pandemia da Covid-19 ha intensificato la pressione sul mercato immobiliare affinché massimizzi l'utilizzo delle proprietà e dia la massima priorità al benessere delle persone che vivono, lavorano e visitano questi spazi.

Per affrontare queste sfide in modo efficace, sfruttando le tecnologie avanzate che forniscono una visione chiara e dettagliata, quasi in tempo reale, i gemelli digitali per ambienti intelligenti come edifici, campus e distretti possono svolgere un ruolo cruciale nell'evoluzione del settore immobiliare verso il futuro. Questi strumenti distintivi offrono la possibilità di ottenere una comprensione più ampia dei dati e supportano un processo decisionale efficace, consentendo al settore immobiliare di distinguersi in un contesto in continua evoluzione.

I gemelli digitali, che agiscono come rappresentazioni virtuali di risorse fisiche, condividono alcune caratteristiche con il Building Information Modeling (BIM), un approccio ampiamente adottato dai professionisti dell'industria edile da diversi anni. Il Building Information Modeling (BIM) rappresenta in formato digitale le peculiarità sia fisiche che funzionali di un edificio o di un piano di costruzione. Tra queste informazioni vi rientrano descrizioni geometriche, interconnessioni spaziali, dettagli geografici, misurazioni e attributi dei componenti che costituiscono la struttura edilizia. La differenza è nella tipologia di dei dati: statici nel BIM e dinamici nel Digital Twin. Grazie alla dinamicità dei dati del gemello digitale, i team di lavoro possono ricevere l'andamento del progetto in tempo reale, monitorare il processo di costruzione dell'edificio e tenere traccia dei vari step e delle risorse collaboranti (materiali, manodopera, attrezzature).

Automatizzazione e controllo del Progetto

I gemelli digitali possono aiutare con il monitoraggio dei progressi della costruzione fornendo approfondimenti in tempo reale sullo stato e sulle prestazioni dei progetti di costruzione. Ciò può essere ottenuto integrando i dati in un modello virtuale da sensori, droni, scanner laser e altri sistemi di monitoraggio³⁵. Le soluzioni Digital Twin basate sull'intelligenza artificiale possono elaborare, analizzare e presentare i dati integrati come un modello as-built con confronti giornalieri o orari con il modello di base. Tale monitoraggio aiuta a risolvere i problemi di avanzamento della costruzione, rilevando eventuali deviazioni iniziali dal budget o dal programma, consentendo ai team di progetto di sviluppare e implementare i piani di recupero necessari.

³⁵ Le soluzioni BIM di Bentley adottate nel progetto del nuovo Ponte di Genova. (2020, October 26). Ingenio. <https://www.ingenio-web.it/articoli/progettare-un-infrastruttura-in-poco-tempo-grazie-al-digital-twin-il-caso-del-nuovo-ponte-di-genova/>

Controllo e valutazione della qualità

I gemelli digitali garantiscono il controllo e la valutazione della qualità della costruzione fornendo informazioni in tempo reale sulle prestazioni e sul comportamento dei diversi componenti e sistemi del progetto di costruzione. La tecnologia dei gemelli digitali può utilizzare algoritmi di elaborazione delle immagini per analizzare immagini video o fotografiche di un cantiere per valutare le condizioni di vari componenti e materiali. Ad esempio, il gemello digitale può essere utilizzato per controllare le condizioni del calcestruzzo o identificare crepe in colonne o altre strutture³⁶. Ciò può aiutare l'individuazione di potenziali problemi o difetti e garantire la qualità del processo di costruzione attraverso l'attuazione di azioni correttive.

Valutazione delle prestazioni degli edifici

Le soluzioni basate sui gemelli digitali offrono la possibilità di valutare le prestazioni di un edificio mediante la simulazione dei suoi comportamenti e delle sue performance in diverse condizioni e scenari. Questo risultato è ottenuto attraverso l'integrazione di dati provenienti da diverse fonti, tra cui sensori, simulazioni e modelli BIM. A titolo di esempio, i Gemelli Digitali possono essere impiegati per analizzare l'efficienza energetica di un edificio simulando il consumo e la generazione di energia, nonché valutando l'impatto di varie strategie di progettazione e gestione³⁷. Inoltre, essi sono in grado di valutare il comfort e la qualità dell'ambiente interno dell'edificio attraverso la simulazione del flusso di aria, calore e umidità, consentendo di esaminare gli effetti di diverse strategie di progettazione e controllo.

Gestione del costruito ³⁸

Un gemello digitale converte tutti gli aspetti quantificabili di un edificio fisico in una replica virtuale in evoluzione, consentendo a proprietari, facility manager e professionisti dell'ambiente costruito di ottenere informazioni in tempo reale per *strategizzare* e ottimizzare ogni aspetto delle operazioni di un edificio³⁹.

³⁶ Walters, A. (n.d.). Staffordshire Bridges - Long Term Performance Monitoring using Fibre-Optic Sensors. Centre for Digital Built Britain Completed Its Five-year Mission and Closed Its Doors at the End of September 2022. <https://www.cdbb.cam.ac.uk/research/digital-built-environment/staffordshire-bridges-long-term-performance-monitoring-usin>

³⁷ Dulaimi, A., Hamida, R., Naser, M. e Mawed, M., SOLUZIONE DIGITAL TWIN IMPLEMENTATA SULL'HUB ENERGETICO PER FAVORIRE LA SMART ENERGY CITY SOSTENIBILE, CASO DI STUDIO DEL SUSTAINABLE SMART ENERGY HUB, ISPRS, 2022.

³⁸ Y. Peng, M. Zhang, F. Yu, J. Xu, Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration, Shanghai Construction No. 4 (Group) Limited Company, Shanghai, November 2020

³⁹ Dyton, J. (2022, April 5). How the NFL's Largest Stadium Is Being Managed Using a Digital Twin. Propmodo. <https://propmodo.com/how-the-nfls-largest-stadium-is-being-managed-using-a-digital-twin/>

Mentre gli strumenti di gemelli digitali vengono utilizzati solo sporadicamente nel settore delle costruzioni, molti osservatori del settore prevedono che diventeranno presto un metodo inestimabile per appaltatori e ingegneri. L'adozione di questo strumento tecnologico modificherà la prassi nella gestione dell'ambiente costruito sfruttando il suo potenziale sia per il controllo che per la riduzione dei costi di gestione, sia per l'ottimizzazione degli interventi durante la vita dell'edificio, ma anche nella definizione di scenari di riqualificazione e sistemazione dell'ambiente costruito sulla base di informazioni che consentiranno di accrescere il livello di resilienza ambientale, ossia di agire con appropriatezza dove, come e quando serve⁴⁰.

Mobilità e Gestione delle Risorse

Il Digital Twin è uno strumento che supporta i pianificatori del traffico nel plasmare la **mobilità urbana** in modo sostenibile e gestirla in modo efficiente. Possono aiutare a simulare e analizzare realisticamente il traffico attuale e futuro di una città, per testare e convalidare diverse misure e quindi trovare le migliori soluzioni. È tuttavia, un aspetto urbano in fase di sperimentazione per la tecnologia del gemello digitale. Un finanziamento di 1,2 milioni di dollari è stato recentemente assegnato a un team composto da membri della Fu Foundation School of Engineering and Applied Science e del Data Science Institute presso la Columbia University. La sovvenzione è stata concessa dalla National Science Foundation con il parziale supporto della Federal Highway Administration, e l'obiettivo è lo sviluppo di un "gemello digitale" ibrido per New York City, con l'obiettivo di esplorare come l'utilizzo dei dati di rilevamento e dell'apprendimento automatico possa ottimizzare i flussi di traffico.

Il progetto, denominato "Hybrid Twins for Urban Transportation: From Intersections to Citywide Management", è coordinato da una squadra di accademici che includono la Professoressa di Ingegneria Civile e Meccanica Sharon Di, il Professore di Matematica Applicata Qiang Du e i Professori di Ingegneria Elettrica Zoran Kostic e Gil Zussman.

⁴⁰ Zaffagnini, Theo & Pracucci, Alessandro & Talamonti, Nicola. (2021). Digital Twin per la gestione efficiente del costruito in tempo reale. Il progetto sostenibile, tra Human Centered Design, iper-convergenza di simulazioni e connettività IoT. In the Scientific Review L'Ufficio Tecnico, Maggioli Editore, S. Arcangelo di Romagna, Italy in the Technological Column "EFFICIENZA ENERGETICA, TECNOLOGIE SOSTENIBILI E INNOVAZIONE", 6 - 15.

I gemelli digitali offrono la possibilità ai responsabili del traffico e agli urbanisti di simulare le condizioni di traffico e congestione, permettendo di testare strategie e soluzioni di mitigazione. Questo progetto integrerà modellazione del traffico e apprendimento automatico al fine di consentire sia la simulazione che la previsione.

La Professoressa Sharon Di afferma: "Stiamo andando oltre la semplice creazione di una replica virtuale della città. Stiamo anche incorporando la nostra conoscenza del settore riguardo a come la congestione del traffico si diffonde nelle aree urbane. Unendo competenze basate sui dati e competenze specifiche del settore, miriamo a ottenere previsioni più accurate"⁴¹

I ricercatori della Columbia University stanno sfruttando i dati dai sensori installati nelle infrastrutture stradali e sui veicoli per apprendere in modo continuo mentre l'ambiente di traffico evolve. Grazie all'utilizzo dei dati e alla valutazione tramite sensori, questo gemello digitale sarà in grado di suggerire strategie di gestione adattive in tempo reale, contribuendo così a ridurre la congestione del traffico, ottimizzare i flussi veicolari e diminuire i livelli di emissioni.

È stata inoltre sperimentata, la gestione del traffico aeroportuale, in particolare nel Terminal 1 dell'aeroporto di Hong Kong⁴² al fine di aumentare l'interazione delle persone con gli spazi, migliorare la gestione delle risorse, delle strutture, oltre a fornire un sistema utile allo sviluppo e all'espansione dello spazio stesso. Il modello prende dati provenienti da fonti come CAD-2D, BIM, As-Built e successivamente da rilievi laser-scanner.

Per quanto riguarda la **gestione delle risorse**, il gemello digitale fornisce un quadro completo dell'infrastruttura consentendo una migliore comprensione del comportamento della rete idrica, nonché la previsione, la pianificazione e la preparazione per eventi futuri. L'accesso a un set accurato e completo di informazioni in tempo reale consente la gestione degli asset, la riduzione dei costi del ciclo di vita, l'ottimizzazione delle prestazioni e della durata degli asset e il miglioramento dei livelli di servizio. Ulteriori benefici sono rappresentati da riduzioni permanenti dei costi di produzione, manutenzione, emergenza e funzionamento, come

⁴¹ Utilizing Digital Twin Technology to Optimize City Traffic - The Data Science Institute at Columbia University. (2022, November 10). The Data Science Institute at Columbia University. <https://datascience.columbia.edu/news/2021/utilizing-digital-twin-technology-to-optimize-city-traffic/>

⁴² E. Freedom, Artificial Intelligence

nel caso di Valencia⁴³ che ha ridotto del 33% il consumo di energia e questo grazie ad una panoramica completa della rete in tempo reale, con dashboard informativi utilizzabili h24 e 7 gg su 7.

Iniziative Europee⁴⁴

Le iniziative europee sui Digital Twin riflettono l'impegno dell'Unione Europea nel promuovere l'innovazione tecnologica e l'adozione di queste tecnologie per affrontare sfide economiche, ambientali e sociali il cui obiettivo è creare un ambiente in cui i gemelli digitali possano contribuire in modo significativo all'efficienza, alla sostenibilità e alla competitività dell'Europa nei settori chiave. Di seguito sono riportati alcuni dei progetti UE che promuovono lo sviluppo di Digital Twin Urbani.

Horizon 2020 projects⁴⁵

Digital Urban European Twins (DUET)⁴⁶

È un'iniziativa che sfrutta le avanzate capacità del cloud computing e del calcolo ad alte prestazioni (HPC), attraverso l'implementazione di gemelli digitali, al fine di arricchire il processo decisionale nel settore pubblico, rendendolo più democratico ed efficiente. Mediante la creazione di repliche digitali di intere città, ogni individuo, indipendentemente dal proprio background, può accedere alle interfacce bidimensionali e tridimensionali dei gemelli digitali, consentendo un'esplorazione agevole dell'impatto delle politiche e la sperimentazione su vasta scala in città e regioni complete.

L'utilizzo dei gemelli digitali da parte di DUET rivoluziona il panorama politico, rivolgendo l'attenzione alle Smart Cities e conducendo una transizione verso un nuovo paradigma delle *Responsive Cities*⁴⁷, le cui soluzioni non sono concepite unicamente per i cittadini, bensì sono plasmate in collaborazione con i cittadini stessi, che occupano una posizione centrale nell'azione. Rispetto alle Smart Cities, le quali si basano sulla tecnologia e generano dati attraverso sensori centralizzati o punti fissi, le Responsive Cities

⁴³ How Digital twin and analytics Improve operations, Minimize costs. (n.d.). Jacobs. <https://www.jacobs.com/newsroom/news/how-digital-twin-and-analytics-improve-operations-minimize-costs>

⁴⁴ Stefano NATIVI, Blagoj DELIPETREV, and Max CRAGLIA, JRC Technical Report, Destination Earth, Survey on "Digital Twins" technologies and activities, in the Green Deal area, 2020

⁴⁵ Strumento di finanziamento della ricerca scientifica e tecnologica in EU

⁴⁶ <https://cordis.europa.eu/project/id/870697>

⁴⁷ Città in grado di rispondere immediatamente alle sfide o alle problematiche in atto.

riconoscono che i cittadini rappresentano una componente fondamentale nella produzione di dati in grado di influenzare in tempo reale le decisioni cittadine⁴⁸. In particolare, sono stati scelti tre casi urbani, ciascuno impegnato nella trasformazione digitale: Atene, Pilsen, Regione delle Fiandre. Inoltre, Progetto vincitore del "Premio per le tecnologie abilitanti" del 2021, presentato dall'Expo sulle città intelligenti e dal Congresso mondiale⁴⁹.

LEAD (Digital Twins for low emission last mile logistics)⁵⁰

Il progetto LEAD sta progettando gemelli digitali della logistica urbana per sostenere la sperimentazione e il processo decisionale in contesti urbani pubblico-privato. In particolare, l'obiettivo a lungo termine del progetto è quello di sviluppare un quadro fisico aperto ispirato a Internet per la logistica delle città intelligenti. Guidato da un grande consorzio, il progetto testerà le sue soluzioni in sei città: Madrid, L'Aia, Budapest, Lione, Oslo e Porto.

Le soluzioni di logistica urbana sono rappresentate da una serie di scenari di casi di valore che affrontano le esigenze dell'economia on-demand e le pressioni causate dall'aumento delle consegne di pacchi, cercando al contempo di allineare interessi concorrenti e creare valore per tutti gli stakeholder coinvolti. Per valutare l'efficacia di queste soluzioni, il progetto LEAD condurrà esperimenti in sei "Living Labs" (Madrid, L'Aia, Budapest, Lione, Oslo, Porto) dove misurerà l'efficienza in termini di costi, impatto ambientale e operazioni. Le soluzioni di successo saranno quindi presentate sotto forma di "Gemelli Digitali" avanzati e riutilizzabili. Questi modelli possono essere adattati per essere utilizzati in contesti diversi e sono progettati per incentivare partnership tra enti pubblici e privati per l'implementazione di soluzioni logistiche sostenibili.

Programma Net Zero Cities

Il programma NetZeroCities, lanciato a partire da ottobre 2021, è un'iniziativa che mira a sostenere le città europee nel raggiungimento della neutralità climatica entro il 2030, riducendo

⁴⁸ <https://www.digitalurbantwins.com/digitaltwins>

⁴⁹ Il duet Local Digital Twin, intitolato Best Enabling Technology at World Smart City Awards | Plasmare il futuro digitale dell'Europa

⁵⁰ <https://www.leadproject.eu/>

drasticamente le emissioni di gas serra. Questo progetto quadriennale (2021-2025) è coordinato da EIT Climate-KIC ed è finanziato dal programma quadro Horizon 2020 dell'Unione Europea, che promuove l'innovazione e la ricerca per affrontare sfide globali come il cambiamento climatico.

L'obiettivo principale è affrontare l'emergenza climatica e contribuire agli obiettivi stabiliti dall'accordo di Parigi, tra cui la riduzione delle emissioni di gas serra dell'Unione Europea del 55% entro il 2030 e la neutralità climatica entro il 2050. Poiché le città continuano a crescere e rappresentano centri di attività economiche e di innovazione, il loro ruolo nella lotta al cambiamento climatico è cruciale.

Il progetto riunisce 33 partner (tra Associazioni, Enti di ricerca, Università e Aziende Private) provenienti da 13 paesi europei e si basa su diverse iniziative, tra cui:

- lo sviluppo di una piattaforma orientata ai servizi,
- La co-creazione di soluzioni per raggiungere obiettivi net-zero in modo inclusivo,
- Lo sviluppo delle capacità su cambiamenti sistematici e coinvolgimento dei cittadini,
- Strutturazione finanziaria e innovazione sociale.

La collaborazione impegno da parte dei governi, dell'industria, della società civile, dell'istruzione e della ricerca è essenziale per garantire il successo del progetto e contribuire a una transizione equa e sostenibile verso un futuro climaticamente neutro.

La sezione 8 del rapporto "100 Climate-Neutral Cities by 2030 – by and for the Citizen"⁵¹ evidenzia che il moderno processo di sviluppo urbano è complesso e coinvolge molteplici attori con aspirazioni e interessi diversi che spesso non sono allineati tra loro. Inoltre, vi sono ancora lacune nel consenso su come i sistemi urbani integrati dovrebbero essere progettati, costruiti e gestiti in tutte le città europee. Il compito descritto nella relazione può svolgere un ruolo chiave nell'accelerare i progressi in questa direzione. Un esempio concreto di questo impegno è la convergenza del trasporto urbano ecologico e sostenibile, degli edifici a consumo energetico quasi nullo o addirittura positivo, della produzione di energia verde e

⁵¹ European Commission, 100 Climate- Neutral Cities by 2030- by and for the Citizens, Interim report of the Mission Board for Climate- Neutral and Smart Cities, Directorate-General for Research, and Innovation, giugno 2020

dell'utilizzo di strumenti come le "città gemelle digitali". Questo punto è un punto di partenza significativo sulla strada verso il 2030. Inoltre, integrando le tecnologie intelligenti e digitali, insieme all'uso dei dati, hanno il potenziale per migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse e nel processo decisionale. Ad esempio, possono essere utilizzate per creare modelli dei sistemi urbani che aiutano a gestire la mobilità, a valutare il consumo energetico e a monitorare il ciclo delle risorse e le emissioni in vari settori. Per sfruttare appieno il potenziale delle tecnologie digitali e promuovere la neutralità climatica, la missione deve incoraggiare gli investimenti privati, sviluppare gemelli digitali delle città, garantire l'accesso a piattaforme aperte e assicurare che tutte le parti coinvolte rispettino completamente le principali normative europee sulla protezione dei dati. È importante anche sfruttare le nuove misure di sicurezza digitale a livello dell'Unione Europea per garantire la privacy dei dati.

I gemelli digitali delle città sono considerati il passo successivo nella gestione delle città intelligenti, consentendo ai decisori di visualizzare e simulare gli effetti delle loro decisioni in un ambiente di prova, facilitando al contempo la partecipazione dei cittadini alle decisioni di pianificazione urbana che influenzano le loro vite.

Inoltre, il progetto punta a sviluppare e promuovere strumenti, risorse e competenze per le città, rendendoli accessibili attraverso un portale online e condividerà l'apprendimento acquisito con altre città fino al traguardo finale delle 100 città europee⁵² climaticamente neutrali entro il 2030.

⁵² eu-missions-KI0122329ENN.pdf (netzerocities.eu)

EU CITIES



Figura 10 Elenco Mission Cities, Fonte NZC

CAPITOLO 3: Sviluppo del Framework di Valutazione

Metodologia di analisi della letteratura

L'analisi della letteratura adottata in questo studio è stata suddivisa in diverse fasi distinte, mirate a selezionare e comprendere in modo esaustivo i documenti di riferimento nel campo dell'Urban Digital Twin:

La prima fase ha comportato la ricerca di articoli rilevanti nel campo di studio selezionato attraverso ricerche nei database. Le ricerche sono state effettuate utilizzando specifici criteri legati al tipo di fonte, in particolare il database Scopus è stato utilizzato per scansionare la letteratura scientifica pubblicata fino ad agosto 2023. Sono stati impiegati termini chiave specifici come "Urban digital twin," "smart city," "urban digital twins," "udt," "smart cities," e "urban planning" per ottenere un corpus iniziale di 171 documenti.

La seconda fase ha permesso di circoscrivere la vasta letteratura individuata a un periodo di riferimento specifico. In questo caso, il periodo considerato è stato dal 2019 al 2023. Durante questa fase, sono stati identificati e selezionati con attenzione 74 riferimenti.

La terza fase ha coinvolto la valutazione degli abstract degli articoli al fine di determinarne la rilevanza potenziale per la ricerca in corso. Durante questa fase, i criteri di selezione hanno compreso la necessità di menzioni o applicazioni di Urban Digital Twin, garantendo la pertinenza della ricerca. Ciò ha portato all'identificazione di 58 riferimenti che sono stati successivamente analizzati in dettaglio attraverso la lettura completa dei documenti.

L'ultima fase dell'analisi della letteratura è stata dedicata alla revisione completa dei 38 documenti selezionati, al fine di rispondere in modo esaustivo alla domanda di ricerca sull'Urban Digital Twin. Durante questa fase, sono stati esaminati dettagliatamente i documenti per identificare i principali temi e sviluppi nel campo in crescita dell'Urban Digital Twin.

Le informazioni estratte da questa analisi della letteratura forniranno una visione chiara e completa dei contributi scientifici relativi all'Urban Digital Twin, consentendo una comprensione più approfondita di questo campo in evoluzione.

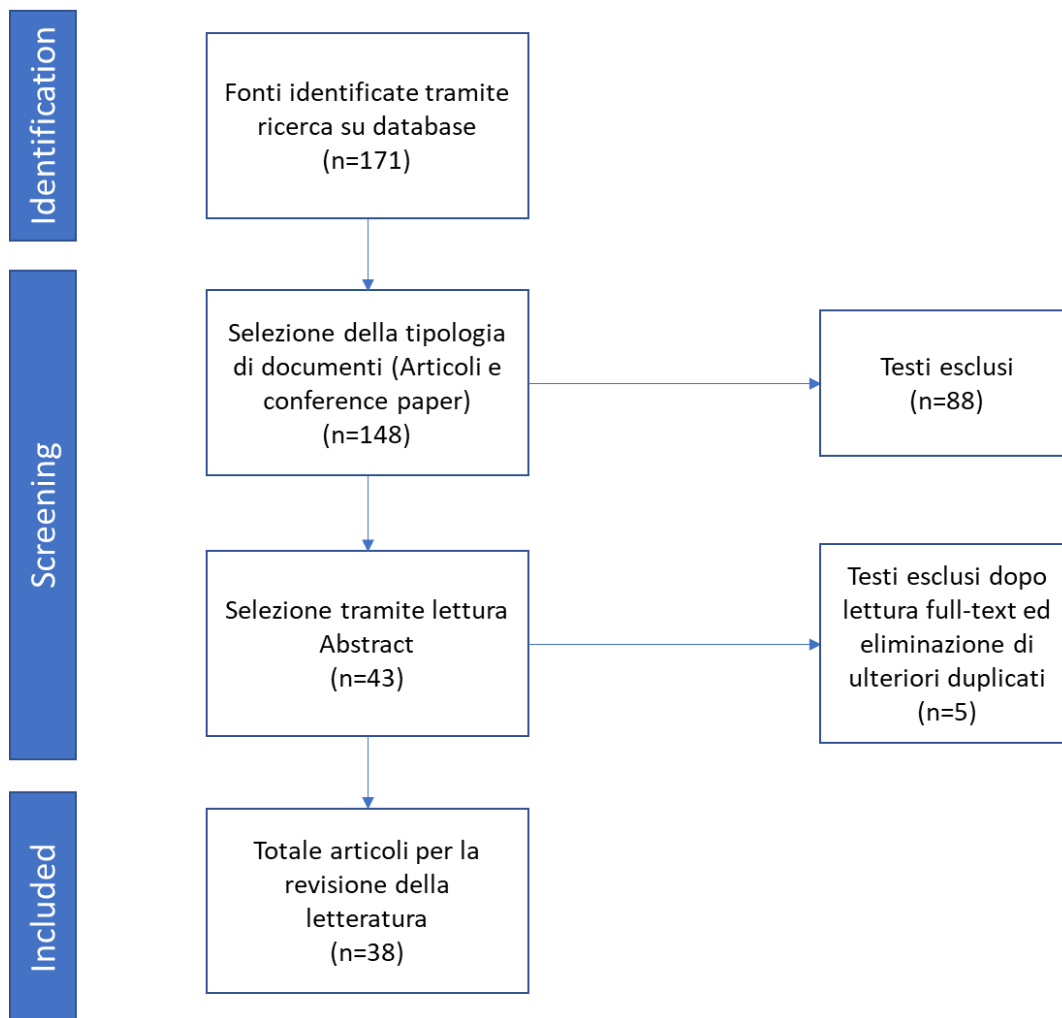


Figura 11 Prisma Flow Diagram

Identificazione Tematica

Successivamente alla selezione dei documenti è stata effettuata un'analisi tematica per esplorare la vasta gamma di questioni e ricerche in corso in questo campo in continua crescita. Questo processo si è concentrato su una serie di obiettivi chiave:

Innanzitutto, l'obiettivo principale è stato identificare e delineare le direzioni di ricerca attuali. Questo significa individuare le aree di studio più promettenti e attuali in cui i gemelli digitali urbani vengono applicati o sviluppati. Questo passaggio ha permesso di comprendere come la comunità scientifica stia contribuendo all'evoluzione di questo concetto.

In secondo luogo, è stata eseguita una categorizzazione dei vantaggi offerti dall'implementazione dei gemelli digitali urbani. Questo aspetto è cruciale per comprendere le motivazioni sottostanti alla crescente adozione di queste tecnologie nelle città intelligenti.

Inoltre, ha posto l'attenzione sulle sfide attuali e future legate all'impiego dei gemelli digitali nelle città. Queste sfide possono variare da questioni tecniche e di integrazione a questioni etiche e di privacy. Riconoscere queste sfide è fondamentale per sviluppare strategie e soluzioni efficaci per affrontarle.

Infine, ha offerto una panoramica delle prospettive di ricerca e delle applicazioni pratiche dei gemelli digitali urbani, che possono essere utilizzate per guidare la progettazione e la pianificazione di città del futuro.

Tabella 1 Individuazione Tematiche Digital Twin

Tema	Applicazione	Documento
Visualizzazione	<ul style="list-style-type: none"> - Scalabilità - Realtà Aumentata - Rappresentazione Real-Time 	1, 9, 25, 35, 36, 37
Data Management	<p>Acquisizione dati</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sensori - Tecnologie <p>Tipologia dati</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mappatura territoriale - Analisi ambientale - Pianificazione Urbana - Gestione risorse 	2, 4, 5, 7, 8, 11, 14, 15, 17, 18, 19, 21, 24, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 37
Previsione	<ul style="list-style-type: none"> - "what-if" scenario - Simulazione 	6, 10, 16, 27, 29, 30, 34, 35, 37, 38
Accessibilità	<ul style="list-style-type: none"> - Integrazione sociale - Sicurezza e Privacy 	3, 12, 13, 17, 25, 27
Partecipazione	<ul style="list-style-type: none"> - Sostenibilità - Decision Making - Urban Governance - Multi-stakeholder - Feedback 	20, 22, 23, 26, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 38

Le fonti selezionate sono state classificate secondo l'individuazione di 5 tematiche come nella review "City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda"⁵³ in: 1) **Visualizzazione**; 2) **Data Management**; 3) **Accessibilità**; 4) **Previsione**; 5) **Partecipazione**; e ad ognuno associata l'applicazione, al fine di identificare le sfide ad esse connesse e le potenzialità dello strumento in ambito urbano.

Visualizzazione: Aspetto essenziale ai fini della comprensione delle immagini restituite dal modello. Uno degli aspetti fondamentali per comprendere e implementare la modellazione dell'ambiente urbano è la scalabilità, sia dal punto di vista grafico che di implementazione del modello. Questo si riferisce alla capacità dell'algoritmo del Digital Twin di essere esteso e applicato in diversi contesti, nonché alla sua abilità di gestire una vasta quantità di informazioni sulla piattaforma.

Come illustrato nel modello DTUMOS [1], che permette l'implementazione di sistemi di mobilità su larga scala a livello metropolitano, è possibile adattarlo con facilità per diverse città e una varietà di servizi di mobilità in tutto il mondo. Questo è simile alla piattaforma geospaziale basata sul motore di gioco universale Unity3D [25], che gestisce dati di mobilità individuali su vasta scala per una piattaforma Urban Digital Twin focalizzata sulla circolazione dei veicoli e dei pedoni a livello urbano, mentre a livello nazionale e continentale, è possibile utilizzare dati relativi a singoli oggetti in movimento, come aerei, navi o satelliti artificiali. La navigazione all'interno delle piattaforme Digital Twin è stata inoltre implementata grazie all'utilizzo delle tecnologie come la *Virtual Reality* (VR) e *Realtà Aumentata* (AR), una combinazione di tecnologie che sembra essere uno strumento ottimale per migliorare la gestione dell'illuminazione stradale. Un Digital Twin si differenzia da modelli e simulazioni perché consente l'interazione reciproca tra il mondo fisico e digitale in tempo reale e l'introduzione della VR è particolarmente promettente poiché consente una riproduzione realistica, controllata e intuitiva di ambienti reali su larga scala. CEDINT-UPM [9], che attualmente sta lavorando a una soluzione Digital Twin per la comunicazione con i sistemi IoT e sulla rappresentazione degli effetti di illuminazione realistici, pone l'attenzione sulla fedeltà della modellazione dell'ambiente esterno. Rappresentazione accurata della disposizione geometrica, le proprietà di riflessione e assorbimento dei materiali utilizzati nell'ambiente, sono elementi che svolgono un ruolo centrale nella determinazione non solo dell'estetica, ma anche nei calcoli di simulazione.

⁵³ Shahat, E.; Hyun, C.T.; Yeom, C. City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. Sustainability 2021, 13, 3386.

Per evitare problemi di sovrapposizione indesiderata di oggetti durante la visualizzazione, come il "z-Fighting" (che si verifica quando due oggetti sembrano lottare per la stessa posizione), è importante rappresentare gli oggetti in modo non ridondante e accurato. Questo è particolarmente cruciale nelle rappresentazioni delle reti stradali, dove la precisione è essenziale per garantire visualizzazioni accurate. CityGML, uno standard per la modellazione di città tridimensionali, è utile in quanto consente di rappresentare dati senza ridondanze geometriche o semantiche utilizzando geometrie esplicite. Ciò significa che gli oggetti non vengono sovrapposti in modo indesiderato durante la visualizzazione [37].

Data Management: ovvero tutto ciò che concerne con l'acquisizione, gestione e la tipologia dei dati raccolti.

Essendo una tecnologia multilivello per acquisire i dati dall'ambiente urbano e gestirli all'interno del Digital Twin sono necessarie diverse tecnologie abilitanti. È possibile distinguere i seguenti tipi tipici di fonti di dati [36]: a) Telecamere di sorveglianza; b) Sensori di pressione; c) Sensori di umidità; d) Sensori di temperatura; e) Sensori di inquinamento atmosferico; f) Dati di geolocalizzazione dei veicoli; g) Informazioni dalle carte di viaggio dei passeggeri, ecc.

Una delle sfide principali è rappresentata dalla grande quantità di dati generati dalle operazioni cittadine, ma soprattutto l'eterogeneità delle informazioni, che può diventare difficilmente gestibile su larga scala. Il Gemello Digitale di Chattanooga, *CTwin*, raccoglie dati sulle condizioni del traffico da vari tipi di sensori, tra cui sensori di rilevazione radar (RDS) e telecamere CCTV. Questi sensori forniscono dati specifici sulle corsie, compresi il conteggio del traffico, la velocità media e l'occupazione delle corsie a intervalli di 30 secondi. Le fonti principali per i dati delle telecamere CCTV includono il sistema Grid Smart e il sistema SmartWay del Tennessee Department of Transportation (TDOT).

I dati meteorologici e sugli avvisi di pericolo provengono da servizi web forniti dall'U.S. Geological Survey (USGS) e dalla National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Inoltre, la piattaforma *CTwin* utilizza i risultati avanzati delle simulazioni del traffico, la valutazione delle prestazioni del sistema e le metriche sull'energia del traffico come app specifiche per le smart city per fornire dati basati su modelli e previsioni sulle condizioni del traffico e sul consumo di carburante legato al traffico attraverso molteplici scenari di simulazione.

Questi dati e le risorse presenti in *CTwin* sono utilizzati per migliorare la comprensione delle condizioni del traffico, l'ottimizzazione del sistema di trasporto e la riduzione del consumo energetico associato al traffico [7]. La piattaforma Snap4City, un sistema IoT open-source sviluppato

presso il DISIT Lab dell'Università di Firenze, è progettato per gestire una vasta gamma di fonti di dati eterogenee, compresi dispositivi IoT, dati aperti e servizi esterni. Questa piattaforma consente di raccogliere dati sia statici, che descrivono la città, le sue infrastrutture e gli aspetti socioeconomici, sia dati dinamici, che riflettono le persone, le attività socioeconomiche e i comportamenti che forniscono informazioni sul flusso del traffico, inclusa la velocità media dei veicoli e la densità del traffico. Algoritmi di ricostruzione del flusso del traffico vengono utilizzati per ottenere una rappresentazione più dettagliata del traffico in tempo reale.

La piattaforma Snap4City gestisce anche dati ambientali, come informazioni meteorologiche e dati sulla qualità dell'aria. Sebbene questi dati non siano direttamente correlati alla mobilità, possono contribuire a creare modelli più completi e realistici della città.

Per gestire l'ingestione dei dati, Snap4City offre la possibilità di creare applicazioni IoT (IoT Apps) utilizzando flussi Node-RED con librerie personalizzate per la trasformazione e l'inserimento dei dati nella base di conoscenza [4].

Sono stati creati i Digital Twin della città di Tashkent basati sulle soluzioni prodotte da Esri⁵⁴, attraverso le piattaforme ArcGIS City Engine, ArcGIS Pro, Image Analyst, 3D Analyst e ArcGIS Enterprise \ AGOL. Sono stati utilizzati anche file CAD, dati da OSM, Airbus (DEM 24m) e SketchUp per lavorare con modelli dettagliati e altri dati da diverse fonti. La piattaforma, con avanzata intelligenza artificiale e apprendimento automatico, fornirà acquisizione della realtà, integrazione di GIS e BIM e supporto in tempo reale per l'Internet delle cose (IoT), consentendo a clienti e organizzazioni di raccogliere, modellare, visualizzare, analizzare e prevedere informazioni su infrastrutture e processi [5].

I Sistemi Informativi Geografici (GIS) sono la tecnologia chiave utilizzata per creare e gestire questi Digital Twins complessi. Nel caso dei gemelli digitali, sono fondamentali per la raccolta e la gestione dei dati relativi all'ambiente urbano, (dettagli sugli edifici, i confini delle proprietà e le reti di infrastruttura) ai fini della mappatura territoriale e per l'analisi ambientale. In particolare, per studiare l'effetto degli edifici pianificati nelle aree di Zurigo, sulla base delle informazioni raccolte dal GIS è stato possibile determinare come i nuovi edifici pianificati influenzino i fattori climatici rilevanti per l'ecosistema urbano, come la temperatura e la circolazione dell'aria fresca. L'analisi ha dimostrato che le caratteristiche spaziali degli edifici, come la loro lunghezza, larghezza, altezza e posizione, hanno un impatto misurabile su questi fattori climatici.

Grazie ai dati affidabili ottenuti dal modello digitale tridimensionale, la pianificazione urbana tiene conto in modo più

⁵⁴ Digital Twin Technology & GIS | What Is a Digital Twin? <https://www.esri.com/en-us/digital-twin/overview>

efficace delle questioni legate al cambiamento climatico, integrando la gestione del clima nel processo di progettazione e pianificazione urbana [11].

I risultati di interviste di ricerca ed esempi tratti dal progetto Digital Twin nella città di Helsinki vengono utilizzati per illustrare che una solida infrastruttura dati è fondamentale per la creazione di Digital Twins urbani e lo sviluppo di future applicazioni e servizi per le città intelligenti. Per costruire una rappresentazione digitale dinamica di una città, è necessaria una base solida di dati provenienti da varie fonti, come sensori, telecamere, database... Inoltre, i Digital Twin arricchiti di dati accelerano notevolmente gli esperimenti nelle città intelligenti e rafforzano il processo di apprendimento e la presa di decisioni basate sulla conoscenza. Questo significa che, grazie alla disponibilità di dati dettagliati e in tempo reale sulla città, è possibile testare nuove soluzioni e servizi in modo più efficiente e con una comprensione più approfondita degli impatti potenziali.

Infine, i Digital Twin offrono un ambiente in cui i professionisti delle città intelligenti possono collegare squadre di progettazione urbane multi-stakeholder attraverso una piattaforma digitale comune. Ciò significa che diverse parti interessate coinvolte nella progettazione urbana possono collaborare più efficacemente e condividere dati e conoscenze attraverso un'unica piattaforma digitale [31].

Previsione: In sintesi, la previsione e la simulazione sono potenti strumenti nel mondo dei Digital Twin. Consentono di prendere decisioni più informate, testare scenari complessi e migliorare l'efficienza e l'efficacia dei sistemi reali. L'integrazione di dati in tempo reale e algoritmi avanzati rende i Digital Twin sempre più capaci di fornire previsioni accurate e simulazioni dettagliate.

I modelli basati su assegnazioni di traffico statiche o dinamiche possono fornire una panoramica utile dei flussi di traffico in un sistema e facilitare previsioni basate su grafi di rete stradale alternativi o diversi schemi di domanda. Questo copre una vasta gamma di scenari che potrebbero essere esplorati tramite il gemello digitale, dalla simulazione degli effetti dei nuovi sviluppi alla valutazione delle deviazioni indotte dai pedaggi dalle rotte su cui sono applicati, alla simulazione dell'impatto della chiusura delle corsie dovuta ai lavori di costruzione. Aggregando i dati di segnalazione, i dati di scansione WiFi, i dati di riconoscimento delle targhe, i dati di veicoli in transito e i dati di citizen science, tra gli altri, il modello CityFlows è in grado di stimare la densità del traffico per tipo di traffico (cioè, motorizzato, pedonale).

Sono tuttavia, strumenti ancora in fase di evoluzione. Anche se queste simulazioni sono abbastanza accurate, uno studio che simula la micro-mobilità a Barcellona, ha dimostrato che i dati tendono a sottostimare il traffico rispetto a quanto accade

davvero. Questo potrebbe essere perché le simulazioni distribuiscono il traffico in modo diverso sulle strade rispetto alla realtà, evitando le strade principali dove vengono conteggiati i veicoli. Quindi, anche se sono molto utili, queste simulazioni devono essere prese con cautela quando si prendono decisioni basate su di esse [29].

I modelli di qualità dell'aria utilizzano tecniche quantitative per simulare i processi fisici e chimici che influenzano i contaminanti atmosferici mentre si disperdono e reagiscono nell'atmosfera. All'interno dell'architettura di DUET, le emissioni del modello di qualità dell'aria verranno calcolate utilizzando dati sul volume del traffico e sulla rete stradale, considerando anche altre variabili come la velocità e la direzione del vento. I risultati verranno convertiti in immagini cartografiche [30].

Si possono simulare scenari di emergenza, come disastri naturali o incidenti industriali oppure inondazioni, per valutare la preparazione e le strategie di risposta. Possono essere estremamente utili per le autorità urbane nel processo di pianificazione delle inondazioni, aiutando a prendere decisioni come la posizione in cui posizionare sacchi di sabbia per contrastare l'inondazione e quali aree della città evacuare per prime [34].

Negli ultimi anni, il gemello digitale ha mostrato grande potenziale nell'ambito della previsione della mobilità umana. Le principali sfide affrontate includono la difficoltà di modellare e prevedere la variazione quotidiana nella mobilità umana: i complessi vincoli imposti dalla rete di trasporto sulla mobilità umana, la generazione di traiettorie umane dettagliate che rappresentino fedelmente il comportamento delle persone e il costo elevato necessario per effettuare previsioni dettagliate in tempo reale. Per superare queste difficoltà, in una ricerca sono stati utilizzati dati GPS reali di telefoni cellulari nell'area del Kanto in Giappone, riuscendo ad ottenere previsioni accurate della mobilità futura di un grande numero di utenti di telefoni cellulari in tempo reale [16]. Questo sistema potrebbe essere utilizzato per supportare analisi avanzate della mobilità in una città.

Partecipazione: La modellazione di città digitali, fornisce agli urbanisti uno strumento per affrontare le sfide dei cambiamenti climatici, in cui è cruciale adottare un approccio sostenibile che non si basa sul semplice utilizzo e inserimento delle tecnologie ma comprende anche pratiche sociali di coinvolgimento e partecipazione cittadina.

Per realizzare un mondo più sostenibile, è fondamentale coordinare gli sforzi per affrontare le crescenti preoccupazioni sociali, economiche e ambientali legate alla crescita delle città. Fornire agli urbanisti strumenti per affrontare queste sfide è essenziale, e la sostenibilità rappresenta uno degli obiettivi

principali. Questo può essere realizzato cercando di collegare gli obiettivi del gemello digitale con le politiche urbane e le richieste collettive, coinvolgendo sia interessi pubblici che privati nella pianificazione urbana efficiente [23].

La città di Herrenberg, con circa 30.000 abitanti vicino a Stoccarda, sta sperimentando un Digital Twin partecipativo che, sebbene tecnologico, si concentra sull'coinvolgimento di attori locali e sul potenziale ruolo della tecnologia nelle dinamiche di pianificazione cooperativa e co-progettazione. L'uso dei Digital Twin per la co-progettazione e i processi di apprendimento delle conoscenze locali è un tema emergente e limitato nella letteratura. In questo senso, questo caso di studio ha un valore interessante ed è un riferimento utile per avviare lo sviluppo di progetti di Digital Twin dal basso verso l'alto.

Certamente, le dimensioni del contesto urbano hanno facilitato lo sviluppo di metodi "misti". Infatti, il componente tecnologico è allo stesso livello di quello sociale, in linea con lo scopo democratico-inclusivo assegnato a questo Digital Twin. Come nei gemelli digitali europei, l'intero processo di sviluppo della piattaforma si basa sull'uso di software open source (ad esempio, Simulation of Urban Mobility - SUMO, COLlaborative Visualization and Simulation Environment - COVISE, OpenCOVER, OpenFOAM) e sull'accesso gratuito ai dati [37].

Nel settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni (AEC), il Digital Twin è considerato uno strumento che agevola la collaborazione tra diverse parti coinvolte. Fornisce un ambiente di simulazione virtuale e in tempo reale che consente a vari gruppi, come progettisti di prodotti, team di ricerca e sviluppo, utenti finali e clienti, di lavorare insieme su una piattaforma digitale condivisa [25]. Questa tecnologia può anche essere utilizzata per istruire e formare le parti coinvolte, offrendo un ampio supporto ai clienti.

I gemelli digitali, che combinano oggetti virtuali e fisici insieme ai dati, giocano un ruolo fondamentale nel processo decisionale delle organizzazioni. Servono come piattaforme che promuovono la condivisione di conoscenze e la collaborazione tra professionisti delle città intelligenti, tra cui urbanisti, ingegneri civili, autorità cittadine e cittadini stessi migliorando la comunicazione tra le parti coinvolte, aumentando la trasparenza e l'apertura nei processi di sviluppo e progettazione urbana [23].

Nonostante le promettenti caratteristiche dei gemelli digitali, alcune sfide organizzative e tecniche ne limitano la piena adozione in contesti urbani. È necessario considerare cambiamenti nella cultura organizzativa, nei processi e nelle strutture per sfruttare appieno il potenziale dei gemelli digitali dinamici nello sviluppo urbano. Inoltre, le attitudini, le competenze e le azioni dei dipendenti municipali influenzano l'adozione e l'implementazione della tecnologia dei gemelli digitali.

Per quanto riguarda le sfide tecniche, l'avanzamento delle tecnologie digitali ha reso più agevole, veloce ed economico la creazione di gemelli digitali per intere città [20]. Questi sofisticati sistemi cibernetico-fisici espandono l'applicazione dei gemelli digitali oltre la progettazione di edifici e infrastrutture, coinvolgendo anche settori come la sanità, l'istruzione e i servizi sociali.

I gemelli digitali hanno il potenziale per migliorare il dibattito pubblico, l'apprendimento e la presa di decisioni basate sulla conoscenza nella pianificazione urbana. Favoriscono l'esperimentazione agile della tecnologia e l'inclusione dei cittadini, aumentando al contempo la trasparenza e la fiducia tra le parti coinvolte nelle iniziative delle città intelligenti.

Tuttavia, vi sono ancora sfide da superare. La creazione di gemelli digitali di alta qualità può richiedere molto lavoro manuale per la pulizia e la preparazione dei dati. Inoltre, richiedono notevoli risorse di calcolo e capacità di elaborazione dati. Quindi, le città devono considerare cambiamenti nella cultura organizzativa, nei processi e nelle strutture, impegnandosi strategicamente nell'integrazione dei gemelli digitali nelle loro pratiche di progettazione urbana. Gli investimenti nelle competenze umane e tecnologiche sono essenziali per ottenere successo.

Nonostante le sfide nell'adozione e nella diffusione dei gemelli digitali nello sviluppo delle città intelligenti, essi offrono preziose opportunità per migliorare la collaborazione, la trasparenza e l'innovazione nella pianificazione e nella governance urbana.

Selezione delle città

Ai fini dell'analisi comparativa, la selezione dei casi studio è partita dalle città menzionate nell'analisi della letteratura, il cui elenco è rappresentato nella **Tabella 2** con i rispettivi riferimenti.

Tabella 2 Individuazione modelli Urban Digital Twin dall'Analisi della Letteratura

Città	No. Riferimento	Tipologia di riferimento
Amsterdam	[2]	Articolo
Antwerp	[35]	Articolo
Atene	[22] [30]	Articolo
Barcellona	[29]	Articolo
Cambridge	[23]	Articolo
Chattanooga	[7]	Articolo
Chicago	[1]	Report
Dublino	[22] [23] [34] [35]	Articolo
Firenze	[4]	Report
Hangzhou	[35]	Articolo
Helsinki	[22] [23] [31] [32]	Articolo, Research paper
Herrenberg	[23][37]	Articolo
Hong Kong	[35]	Articolo
Londra	[35]	Articolo
New York	[1]	Report
Orebro	[32]	Articolo
Rotterdam	[32]	Articolo
Sejong	[35]	Articolo
Singapore	[22] [23] [35]	Articolo
Soeul	[1]	Report
Tashkent	[5]	Articolo
Vienna	[32]	Articolo
Zurigo	[11] [23]	Saggio, Articolo

Tabella 2 Individuazione modelli Urban Digital Twin dall'Analisi della Letteratura

Tabella 2 Tabella 3 sono state successivamente selezionate le città che il programma Net Zero Cities mira a renderle climaticamente neutrali entro il 2030 evidenziando in quale ambito la tecnologia

del Digital Twin e le tecnologie a supporto per la modellazione della città stessa e per l'acquisizione dei dati.

Tabella 3 "Mission Cities" estrapolate dall'analisi della letteratura che utilizzano il Digital Twin

	Location	Status	Scala	Ambiti	Azioni	Tecnologie
1	Amsterdam (Olanda)	Prototipo	Città	Urban Planning, Urban Mobility, Pollution Reduction	Monitoraggio del traffico, monitoraggio e pianificazione delle aree verdi	IoT, Big Data, T-Cell Framework, API Modelling
2	Antwerp (Belgio)	Prototipo	Città	Urban Planning, Urban Mobility, Pollution Reduction	Monitoraggio del traffico, monitoraggio e pianificazione delle aree verdi	Internet of Things, Big Data, T-Cell Framework, API Modelling
3	Atene (Grecia)	In fase di sviluppo	Città	Urban Planning, Urban Mobility, Pollution Reduction	Monitoraggio del traffico, monitoraggio e pianificazione delle aree verdi	Internet of Things, Big Data, T-Cell Framework, API Modelling
4	Helsinki (Finlandia)	Operativo	Distretto	Urban Planning, Energy Efficiency	Monitoraggio del ciclo di vita dell'ambiente costruito e dello sviluppo urbano intelligente	BIM, CityGML City Information Model
5	Dublino (Irlanda)	Operativo	Distretto	Urban Planning, Urban Mobility	Risk scenario and simulation environment	UMI (Urban Modelling Interface)
6	Rotterdam (Olanda)	Operativo	Area portuale	Logistica	Monitoraggio della logistica infrastrutturale e monitoraggio dei flussi in e out, misurazione dei dati ambientali: qualità dell'acqua, aria, condizioni meteo	IoT, Container 42 (AI), Sensori, GIS
7	Barcellona (Spagna)	In fase di sviluppo	Città	Urban Mobility	15 min city, tracciamento gentrificazione	Marenostrum supercomputer, Open Street Map
8	Firenze (Italia)	Operativo	Città	Real-Time visualization, Urban Planning, Energy Efficiency	Visualizzazione di un ambiente 3D interattivo della città e dei dispositivi IoT, Punti di interesse (POI), mappe di calore, geometrie relativi a linee di autobus, piste ciclabili, flussi di traffico, ecc.	Snap4City, IoT, GIS, API

L'analisi comparativa verrà tuttavia effettuata solo su **Atene, Helsinki e Firenze** in quanto le uniche piattaforme open source, i cui dati sono disponibili e sufficienti ai fini di un confronto esaustivo. Ogni città verrà introdotta attraverso una panoramica dell'uso del Digital Twin nel sistema delle Smart City, in che modo le città hanno portato avanti i programmi di digitalizzazione e a che punto sono con gli obiettivi di decarbonizzazione nella *roadmap* 2030-2050.

Elaborazione del Framework per l'Analisi dei Casi studio

Successivamente, la ricerca focalizza l'attenzione sulla tecnologia del Digital Twin. Il framework derivato dall'analisi della letteratura (Tabella 1), è stato inoltre arricchito con il modello di categorizzazione proposto dall'Agenda Urbana del MIT⁵⁵. Il lavoro svolto dal Ministero, si basa sull'identificazione delle principali tecnologie a disposizione delle città, in cui per ognuna di esse è stata individuata la scala di applicazione (dispositivo, componente edilizio, organismo edilizio, strada, quartiere, scala urbana e scala territoriale) e gli obiettivi per ogni settore:

⁵⁵ MIT (Ministero delle Infrastrutture e del Trasporto), Metodi e Strumenti per un'agenda urbana dello sviluppo sostenibile, Tecnologie della Città del Futuro, Capitolo 4

Obiettivi	Settore
<ul style="list-style-type: none"> • Aumentare il livello di digitalizzazione di servizi e processi della pubblica amministrazione • Migliorare il livello di servizio/rispondenza ai bisogni dei cittadini da parte dei servizi pubblici, anche attraverso un maggior uso dei dati; • Incrementare l'interazione a distanza con la pubblica amministrazione e incrementare il sistema partecipativo attraverso strumenti digitali; 	Servizi pubblici/ Digitali Partecipazione Pubblica Inclusione
<ul style="list-style-type: none"> • Ridurre il traffico veicolare (e in particolare quello dei mezzi privati) sostenendo l'utilizzo dei mezzi pubblici/condivisi/ a basse emissioni anche attraverso l'utilizzo di strumenti innovativi come la Mobility-As-Service; • Ridurre il traffico dei veicoli privati nei centri storici, garantendo un elevato livello di servizio per il trasporto di persone e merci; • Ridurre le emissioni climalteranti 	Mobilità Trasporti Ambiente
<ul style="list-style-type: none"> • Efficientare i consumi e l'utilizzo delle risorse attraverso nuove tecnologie; • Aumentare l'efficienza energetica e ridurre le emissioni clima-alteranti collegate a sistemi di riscaldamento e raffrescamento di edifici in contesto urbano; • Introdurre sistemi innovativi di ricarica. 	Efficientamento energetico Ciclo dei rifiuti Gestione delle risorse Idriche Decarbonizzazione
<ul style="list-style-type: none"> • Migliorare la sicurezza e la resilienza dei servizi; • Garantire la sicurezza fisica e digitale delle infrastrutture critiche; • Aumentare il livello di sicurezza reale e percepita nei sistemi urbani. 	Sicurezza Fisica e Digitale dei Cittadini Resilienza nei confronti degli eventi climatici estremi e alla crisi di altra natura
Aumentare le competenze e le capacità di risposta ai bandi, al fine di consentire l'acquisizione di risorse economiche e di talenti per lo sviluppo e l'adozione di Innovazione nella città;	Trasversale

Figura 12 Elenco obiettivi e rispettivi settori di interesse individuati dall'Agenda Urbana del MIT, Fonte: AUMIT 2022

All'interno dell'Agenda viene definita come "una classificazione ragionata delle principali tecnologie che sono a disposizione dei decisori pubblici ma anche privati che con questi possono collaborare al fine di sviluppare città che siano più sostenibili, inclusive, resilienti e in generale migliorino la qualità della vita delle persone che le abitano o vi transitano anche per brevi periodi".

Integrando la schematizzazione del MIT e il framework elaborato nel Capitolo 3 si avrà un quadro generale utile nell'individuare i fattori di successo e di applicabilità del Digital Twin di Atene, Helsinki e Firenze, organizzato nel seguente modo:

- Elenco dei presupposti che hanno portato all'avviamento del progetto (Obiettivi Digital Twin e Obiettivi Politici);

- **Visualizzazione:**

Realtà Aumentata: Utilizzare la realtà aumentata per sovrapporre dati digitali alle viste reali della città, migliorando la comprensione e la pianificazione.

Rappresentazione Real-Time: Fornire una visualizzazione in tempo reale delle informazioni, consentendo di monitorare gli sviluppi in corso.

- **Data Management:**

Acquisizione dati: Raccogliere dati da una varietà di fonti, inclusi sensori e tecnologie, per alimentare il Digital Twin con dati aggiornati e accurati.

Tipologia dati: Categorizzare i dati in base alle loro tipologie, tra cui dati di analisi ambientale, mobilità, energia, e gestione delle risorse.

Energia

Mobilità

Edifici

Mobilità

Analisi Ambientale

- **Previsione:**

"What-If" Scenario: Permettere agli utenti di eseguire simulazioni basate su scenari ipotetici ("what-if") per valutare gli effetti di diverse decisioni o situazioni.

Simulazione: Simulare eventi o cambiamenti futuri per comprendere meglio le implicazioni delle decisioni attuali.

- **Accessibilità:**

Sicurezza e Privacy: Garantire che i dati siano gestiti in modo sicuro e che siano rispettate le leggi sulla privacy.

Integrazione Sociale: Creare strumenti per coinvolgere attivamente i cittadini e integrare il loro punto di vista nella pianificazione e nella gestione urbana.

- **Partecipazione:**

Governance: Migliorare la gestione delle città attraverso una maggiore trasparenza e partecipazione dei cittadini.

Stakeholder: Coinvolgere un'ampia gamma di attori urbani, tra cui governi, aziende private e la società civile.

Feedback: Consentire la raccolta di feedback da parte dei cittadini e delle parti interessate per adattare le decisioni e le politiche urbane in base alle esigenze e alle preferenze della comunità.

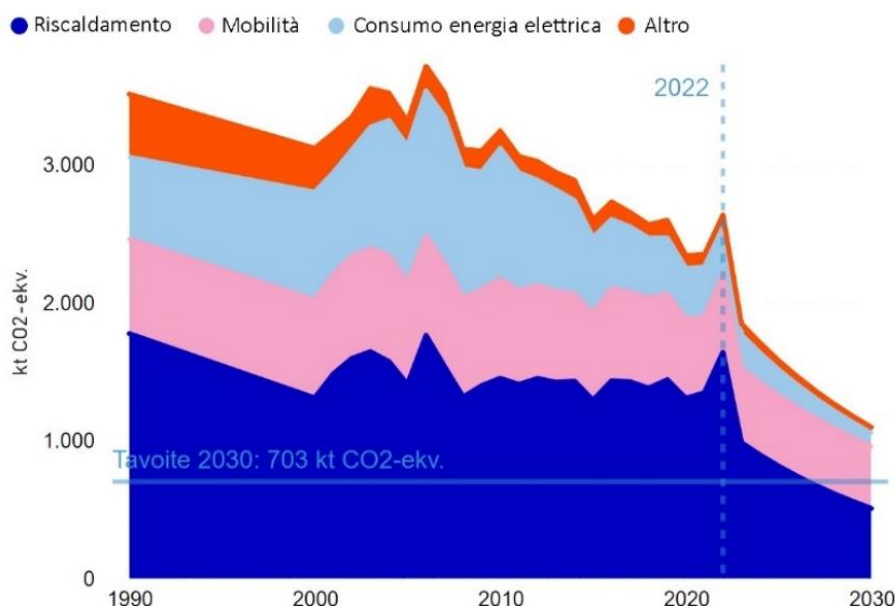
Una volta esaminati i fattori di replicabilità e di successo dei Digital Twin di Atene, Helsinki e Firenze, si procederà a identificare gli stakeholder dei vari progetti al fine di costituire dei focus group di utenti a cui sarà rivolto un sondaggio di tipo Delphi⁵⁶. Si tratta di una metodologia di ricerca sociale che coinvolge un panel di esperti del settore, a cui viene somministrato un questionario su una specifica tematica e sono invitati a esprimere le proprie opinioni, al fine di approfondire la tematica principale o convalidare i risultati ottenuti in seguito a una ricerca preliminare, come in questo caso. L'ultima fase della ricerca sarà sottoporre il questionario ai potenziali stakeholder per verificare i fattori di successo e le sfide individuate tramite l'analisi dei casi studio nell'applicazione del Digital Twin per la decarbonizzazione delle città.

⁵⁶ Qualita PA - tecnica Delphi. <http://qualitapa.gov.it/sitoarcheologico/relazioni-con-i-cittadini/utilizzare-gli-strumenti/tecnica-delphi/>

CAPITOLO 4: Applicazione del Framework alle città selezionate

A che punto sono le Città con le strategie di Decarbonizzazione

Helsinki ha stabilito obiettivi ambiziosi per affrontare il cambiamento climatico, con lo scopo di diventare carbon neutral (neutrali dal punto di vista delle emissioni di carbonio) entro il 2030, raggiungere zero emissioni entro il 2040 e diventare addirittura carbon negative dopo il 2040⁵⁷. Il programma di riduzione delle emissioni di Helsinki⁵⁸ rivela che le fonti di inquinamento più significative (in particolare del 2021), sono date dal riscaldamento (58%), dal consumo di energia elettrica (13%) e dal trasporto (24%). Nel 2021, le emissioni dirette totali di Helsinki sono state pari a 2.345 kt di CO₂ eq., ovvero sono diminuite del 33% rispetto all'anno di riferimento 1990 (Figura 13), grazie alla sostituzione del carbone con il gas naturale nella produzione di energia, un miglioramento dell'efficienza energetica del patrimonio edilizio e un aumento dell'energia rinnovabile, come riportato nella Figura 13 come esempio di monitoraggio dei progressi attuati nell'ambito della decarbonizzazione.



Lähde: HSY

Figura 13 Percentuale emissioni Helsinki (1990-2030), Fonte: Helsinki City

⁵⁷ the-city-in-a-changing-world-2023.pdf (hel.fi)

⁵⁸ Carbon Neutral Helsinki Action Plan (helsinginilmastoteot.fi)

La strategia della città di Helsinki è ben definita nel documento “Helsinki Action Plan”⁵⁹, e la sua efficacia è data dalla realizzazione di azioni che anziché essere progetti pilota a breve termine, contribuiranno al cambiamento continuo delle operazioni verso l'obiettivo di decarbonizzazione. Sono divise in tre categorie che sono annualmente monitorate:

1. **Azioni che riducono le emissioni:** Queste azioni hanno un impatto diretto sui settori rilevanti.
2. **Azioni richieste che facilitano la riduzione delle emissioni:** Queste azioni fungono da prerequisiti per l'attuazione delle azioni di categoria 1, anche se non hanno un impatto diretto sulla riduzione delle emissioni.
3. **Indagini per determinare nuove azioni di riduzione delle emissioni:** Queste azioni richiedono ulteriori preparazioni o studi per sviluppare azioni di categoria 1 e 2

Il progresso delle azioni è consultabile nella pagina ufficiale della città di Helsinki⁶⁰ sentati nella tabella sottostante in cui per ognuno viene specificato il settore di appartenenza e le relative informazioni aggiuntive.

CATEGORY	ACTION	SECTOR	PROGRESS	INFORMATION
CATEGORY 1: Actions that reduce emissions				
Category 1.	Adjusting the ventilation in City facilities to an appropriate level.	Heating	● Progressing moderately well	
Category 1.	Low-emission concrete in infrastructure projects.	Construction (Scope 3)	● Well underway	Updated to design guidelines
Category 1.	Lowering temperatures in City-controlled facilities.	Heating	● Well underway	
Category 1.	Reducing the emissions from the preconstruction at the former Malmi Airport area by 50%.	Construction (Scope 3)	● Well underway	
Category 1.	Replacing outdoor lights with LED lights.	Electricity	● Well underway	
CATEGORY 2: Required actions that facilitate emissions reduction				
Category 2.	Constructing charging stations for electric cars in line with the forecast on the number of electric cars.	Transport	● Well underway	Starts at Q2/2023
Category 2.	Establishing tendering processes for the energy solutions for City-owned facilities.	Heating, Electricity	● Well underway	Starts at Q1/2023
Category 2.	Principles for low-temperature regional heating entities.	Heating	● Well underway	Done
Category 2.	Reprogramming the implementation plan of the Baana cycling network and the target network up to 2030.	Transport	● Well underway	Done
CATEGORY 3: Surveys to determine new emissions reduction actions				
Category 3.	Accelerating the energy efficiency improvements on City-owned properties outside renovation projects (Definition of the implementation process for energy surveys).	Heating, Electricity	● Progressing moderately well	Starts at H2/2023
Category 3.	Promoting the definition of effective regional emissions reduction measures on mobility.	Transport	● Progressing moderately well	
Category 3.	Review of emissions reduction methods for transport.	Transport	● Progressing moderately well	
Category 3.	Review on steering construction through carbon footprint.	Heating, construction (Scope 3)	● Well underway	Done, decision on implementation (Urban Environment Committee 20.6.2023)

Figura 14 Azioni 2022 e il loro stato di avanzamento, Fonte: Helsinki City

⁵⁹ Carbon Neutral Helsinki Action Plan (helsinginilmastoteot.fi)

⁶⁰ Obiettivi climatici e monitoraggio – Carbon neutral Helsinki - Helsingin Ilmasto (helsinginilmastoteot.fi)

Le azioni della Categoria 1, che hanno un impatto diretto sulla riduzione delle emissioni, stanno progredendo bene e sono già ben avviate. Questo indica che ci sono sforzi significativi per attuare misure dirette per ridurre le emissioni nei settori dell'edilizia e dei trasporti.

Le azioni della Categoria 2, che facilitano la riduzione delle emissioni, sono anch'esse ben avviate e sono state completate in modo efficace nei settori del trasporto, del riscaldamento e dell'elettricità.

Gli sforzi per esaminare e definire approcci innovativi alla riduzione delle emissioni nei settori del riscaldamento, della costruzione e dei trasporti proseguono moderatamente bene.

Complessivamente, sembra che vi sia un impegno significativo per ridurre le emissioni di carbonio in diverse aree chiave. Il progresso varia tra le categorie, con un successo maggiore per le azioni delle Categorie 1 e 2 rispetto alle azioni della Categoria 3, che richiedono una maggiore elaborazione e studio. Tuttavia, è incoraggiante vedere che molte azioni sono già ben avviate e che ci sono decisioni concrete prese per l'attuazione di alcune di esse. Il monitoraggio e la trasparenza dei dati costante e l'ulteriore sviluppo di azioni, aiuta Helsinki a raggiungere i suoi obiettivi di riduzione delle emissioni di carbonio in modo efficace.

Per quanto riguarda Atene, la città più calda d'Europa⁶¹, si sta affrontando in modo deciso l'impatto dei cambiamenti climatici attraverso un approccio integrato che combina mitigazione e adattamento. La città è esposta ad un aumento delle ondate di calore legate ai cambiamenti climatici⁶², e questo ha portato a sfide significative.

Atene ha già subito un elevato livello di stress termico e sfide correlate, e queste sfide sono destinate ad aumentare con i cambiamenti climatici. Tra il 2000 e il 2012, la città ha registrato un aumento del 5,2% della mortalità per ogni aumento di 1°C delle temperature massime giornaliere superiori a 31,5°C.

La città ha adottato un approccio integrato che collega la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici. Nel 2014, è

⁶¹ La Grecia ha sperimentato un periodo di calura eccezionale e prolungata, dal 28 luglio al 5 agosto, durante l'insolitamente calda estate del 2021. A Atene, la capitale, la temperatura massima ha toccato i 43,9 °C nel centro della città, segnando la seconda temperatura più elevata registrata dal 1900, secondo i dati storici della stazione meteorologica dell'Osservatorio Nazionale di Atene a Thissio.

⁶² Greece Climate Resilience Policy Indicator – Analysis - IEA. (n.d.). IEA. <https://www.iea.org/articles/greece-climate-resilience-policy-indicator>

entrata a far parte della rete "100 Resilient Cities" promossa dalla Fondazione Rockefeller. Questo ha portato alla creazione, nel 2016, di un Dipartimento per la Resilienza e la Sostenibilità, guidato da un Chief Resilience Officer che ha elaborato la "Strategia di Resilienza 2030 di Atene"⁶³, che pianifica 65 azioni e 53 azioni di supporto con una "visione chiara di come la città possa affrontare al meglio l'incremento dell'interdipendenza tra shock e stress". Ciascuna azione è collegata agli obiettivi di sviluppo sostenibile correlati.

Nel 2016, è stato pubblicato anche un Piano di Azione Climatica integrato per la mitigazione e l'adattamento, sostenuto da C40. Questo piano si pone l'obiettivo di ridurre del 40% le emissioni di gas serra entro il 2030 rispetto al 1990, oltre a mantenere e aumentare gli spazi verdi o utilizzare materiali sostenibili per l'ambiente costruito.

Temperatura in Grecia, 2000-2020

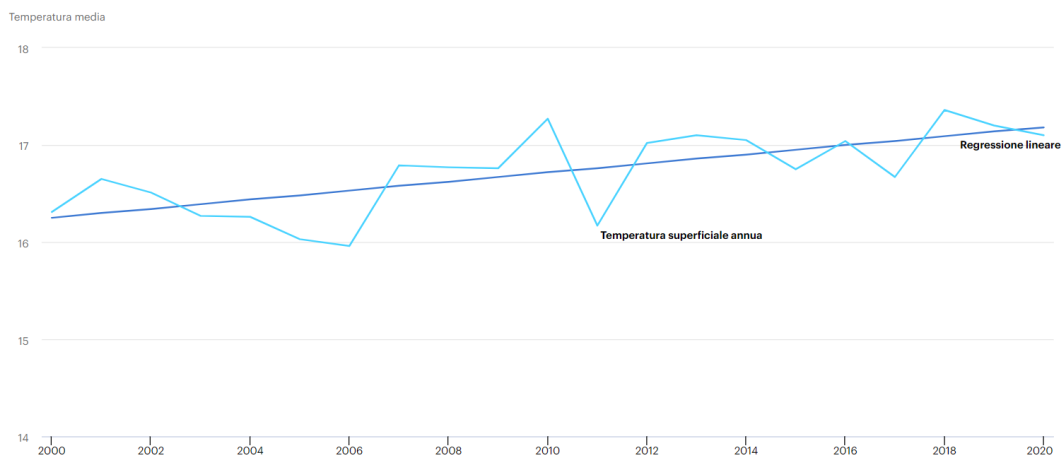


Figura 15 Temperatura in Grecia 2000-2020, Fonte: IEA 2020

Inoltre, come parte delle azioni di supporto al Piano di Azione Climatica e alla Strategia di Resilienza, il comune ha lanciato #CoolAthens, una campagna per la protezione della salute pubblica, l'informazione pubblica e la sensibilizzazione. Questa campagna include azioni come la promozione di informazioni personalizzate disponibili al pubblico che collegano le alte temperature ai rischi per la salute, la preparazione di guide e tag

⁶³ citiesoftomorrow.eu/sites/default/files/documents/Athens-Resilience-Strategy-English.pdf

NFC⁶⁴ per orientare le popolazioni a rischio verso una rete potenziata di "Centri di Raffreddamento" municipali che proteggono le persone durante le alte temperature, il collegamento di tutte le fonti di dati legate al calore, l'istituzione di campagne di informazione e sensibilizzazione e il coinvolgimento del settore privato in queste attività.

Per ridurre la vulnerabilità agli impatti del calore estremo, Atene sta concentrando gli sforzi sulla creazione e l'espansione di spazi verdi. La città già aveva uno dei tassi più alti di aree verdi tra le capitali europee nel 2018 (il 15%, secondo solo a Stoccolma al 19%). Negli anni recenti, il budget per le aree verdi è quadruplicato grazie al sostegno dello Stato greco, delle aziende e dei fondi europei. Sono stati realizzati tetti verdi, parchi, alberi e fontane d'acqua in tutta la città.

Nel 2019, Atene è stata la prima città a beneficiare del Natural Capital Financing Facility (NCF) della Banca Europea degli Investimenti, un nuovo strumento per aiutare le città a finanziare progetti di infrastrutture verdi o blu. Il prestito di cinque milioni di euro del NCF mira a finanziare e sostenere l'integrazione di componenti verdi nel restauro di piazze pubbliche e strade, la creazione di corridoi verdi tra diverse aree verdi e il contributo al ripristino naturale del colle Lycabettus, il secondo rilievo di Atene dopo l'Acropoli.

Nell'estate del 2021, la città ha firmato la Dichiarazione per la Natura Urbana, impegnandosi a rendere il 30-40% della superficie edificata totale della città verde o permeabile all'acqua e/o a garantire l'accesso di almeno il 70% della popolazione a uno spazio verde o blu entro un raggio di 15 minuti⁶⁵.

Secondo i dati annuali gestiti dall'Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione dell'Ambiente (Ispra), le emissioni da trasporto stradale sono aumentate complessivamente dal 21% delle emissioni totali nel 1990 al 34% nel 2019⁶⁶. Questa tendenza varia tra le 14 città metropolitane esaminate, con Bologna e Roma che hanno registrato i maggiori incrementi (+50%) sottolineando la necessità di adottare misure concrete per ridurre le emissioni del

⁶⁴ La comunicazione di prossimità, anche chiamata near-field communication (NFC), è una tecnologia di ricetrasmisione che fornisce connettività senza fili (RF) bidirezionale a distanza (contactless) a corto raggio (fino a un massimo di 10 cm), sviluppata congiuntamente da Philips, LG, Sony, Samsung e Nokia. (Wikipedia)

⁶⁵ bt2022_cas-detude_grece_athenes_eng.pdf (climate-chance.org)

⁶⁶ <https://emissioni.sina.isprambiente.it/inventario-nazionale/>

55% entro il 2030 o addirittura azzerarle, come previsto dalla campagna "NetZero2030" in cui sono coinvolte alcune di queste città⁶⁷.

Un importante strumento per affrontare queste sfide legate alla mobilità sostenibile sono i Piani Urbani della Mobilità Sostenibile⁶⁸, che sono stati analizzati dettagliatamente per ciascuna città metropolitana nel rapporto Mobilitaria.

L'origine dei Pums risale al 2013, quando la Commissione Europea ha introdotto il Pacchetto sulla mobilità urbana, che ha dato agli enti locali la responsabilità di adottare misure per una mobilità più sostenibile nelle città. In Italia, i Pums sono diventati obbligatori per i comuni con più di 100.000 abitanti.

Secondo i dati dell'Osservatorio Pums aggiornati a settembre 2023, il totale dei piani strategici ammonta a 211, di cui 76 sono stati approvati, 61 adottati, mentre 74 sono ancora in fase di elaborazione⁶⁹. Questi piani sono progettati principalmente per ridurre le emissioni di CO2, combattere la congestione stradale, promuovere la mobilità condivisa e sostenibile, eliminare i veicoli altamente inquinanti e ridurre il tasso di motorizzazione.

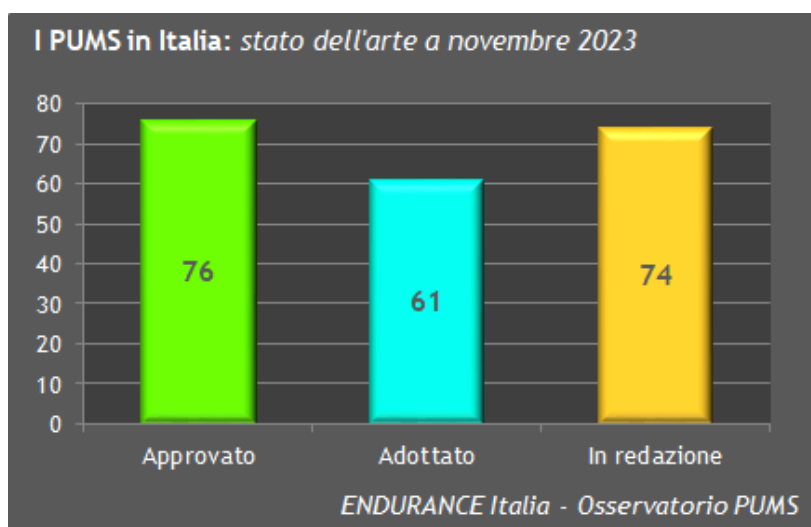


Figura 16 Numero Piani Strategici, Fonte: PUMS 2023

Nella città di Firenze, in particolare sono state registrate tendenze preoccupanti riguardo alla qualità dell'aria. I dati relativi al particolato atmosferico (PM2,5 e PM10) e al biossido di azoto (NO2) mostrano un aumento significativo.

⁶⁷ https://www.ansa.it/ansa2030/notizie/asvis/2023/06/09/obiettivo-decarbonizzazione-a-che-punto-sono-le-grandi-citta-italiane_11b0a2e0-0bfc-4e00-9ce5-dd318767f730.html

⁶⁸ rapporto_mobilitaria_2023.pdf (kyotoclub.org) Il Rapporto "MobilitAria 2023", redatto da Kyoto Club e l'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IIA), esamina i dati sulla mobilità e la qualità dell'aria nelle 14 città metropolitane italiane nel 2022

⁶⁹ <https://www.osservatoriopums.it/osservatorio/pums/>

Per quanto riguarda il PM2,5, che rappresenta le particelle sottili nell'aria, c'era stata una tendenza positiva di riduzione in passato. Tuttavia, nel 2022 si è verificato un aumento del 15% nei valori medi, passando da 12 a 13 microgrammi per metro cubo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Anche il PM10, che rappresenta particelle leggermente più grandi, ha subito un aumento del 15%, portando i valori medi da 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 23. In particolare, nella stazione di traffico di Mosse, il numero di superamenti del limite di PM10 è salito a 19 nel 2022 rispetto ai 13 del 2021.

Anche il NO2 ha visto un leggero aumento, tranne nelle stazioni di fondo come Bassi e Boboli, dove è stato registrato un calo del 5%. I dati indicano che i superamenti del limite giornaliero di NO2 sono stati 19 nel 2022, con una concentrazione media di 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figura 17 Stazioni di Rilevamento Firenze Fonte: Mobilitaria 2023

Le tabelle mostrano chiaramente le variazioni nelle concentrazioni di questi inquinanti, con aumenti significativi nei valori medi e nei superamenti del limite giornaliero.

Va notato che, nonostante le concentrazioni di NO2 rispettino attualmente i limiti normativi, queste non sono in linea con le

nuove direttive più rigorose proposte e con le linee guida dell'OMS del 2021.

Per quanto riguarda il PM10, le concentrazioni non hanno mai superato il limite attuale ed è probabile che rispettino anche il limite proposto dalla nuova direttiva europea che dovrebbe essere raggiunto entro il 2030. I superamenti di PM10, sebbene siano stati elevati fino al 2014, sono stati prossimi al limite di 20 µg/m³ negli ultimi anni.

Questi dati indicano una situazione preoccupante per la qualità dell'aria a Firenze, con aumenti nelle concentrazioni di particolato atmosferico e biossido di azoto, che richiedono azioni e politiche per migliorare la situazione e proteggere la salute pubblica.

Applicazione del Framework di Analisi

Atene

Atene, ospita una popolazione di tre milioni di abitanti sia nella città stessa che nell'area metropolitana, classificandosi come una delle città più densamente popolate d'Europa. Ha riconosciuto un crescente bisogno di adottare una trasformazione digitale al fine di favorire la crescita economica e la convergenza sociale, cercando di migliorare i servizi per i cittadini. Non dispone di un pool consolidato di dati cittadini ben gestiti, da qui la necessità di un gemello digitale con la capacità di unire tutte le fonti digitali del sistema urbano per renderle facilmente accessibili e utili per l'esplorazione e la sperimentazione. La città sta attuando un piano di trasformazione sociale e digitale focalizzato sul miglioramento dei servizi offerti ai cittadini. Tuttavia, l'assenza di una gestione consolidata dei dati urbani rende fondamentale l'implementazione di un Digital Twin in grado di aggregare e rendere facilmente accessibili tutte le fonti di dati della città, favorendo esplorazione e sperimentazione.

L'obiettivo è prendere le politiche esistenti e aggiornarli sfruttando gli output decisionali del Digital Twin e le caratteristiche predittive. Vale a dire che, utilizzando condizioni "what-if" sarà analizzato l'impatto delle potenziali politiche e sarà valutata la loro utilità ed efficacia. Il Digital Twin fornirà alla città uno strumento per visualizzare fonti di inquinamento attuali, punti di interesse e percorsi verdi e per testare l'impatto ambientale di diversi piani strategici.

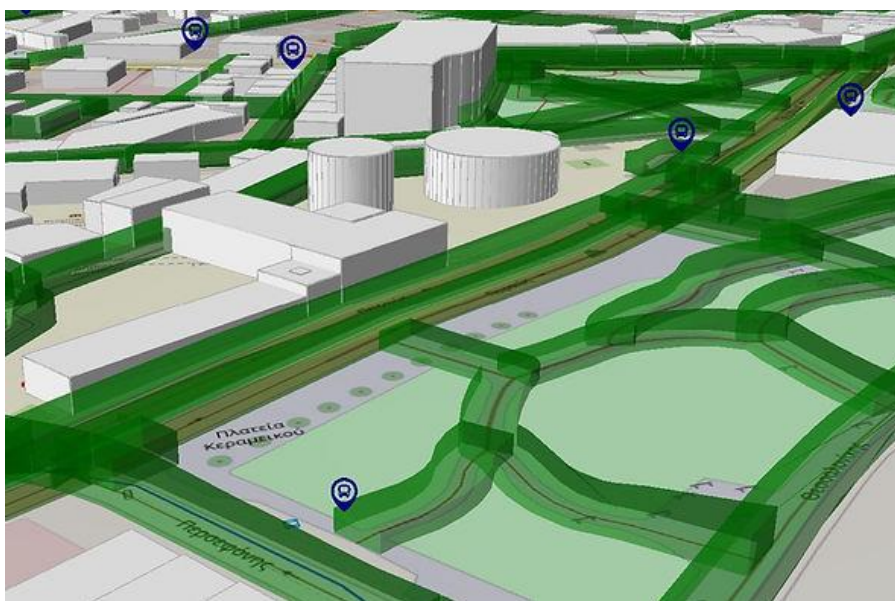


Figura 18 Interfaccia Digital Twin Atene, Fonte: DUET

Link Web al caso studio	https://www.digitalurbantwins.com/athens-twin	
Ambiti	Urban Planning, Urban Mobility, Rilevamento Inquinamento	
Scala di Applicazione	Città	
Obiettivi Politici	<ul style="list-style-type: none"> • Adottare misure per affrontare l'inquinamento urbano combinando dati ambientali e di traffico, promuovendo una mobilità sostenibile e coinvolgendo attivamente i cittadini. • Incoraggiare uno stile di vita ecologico e considerando la voce dei cittadini come un valore aggiunto nella formulazione delle politiche. • Realizzare un cambiamento ambientale come obiettivo collettivo della comunità, prendendo in considerazione sia l'interesse individuale che di gruppo, evidenziando il crescente riconoscimento di tale importanza. • Potenziare l'efficacia della progettazione e attuazione delle politiche 	
Obiettivi Digital Twin	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizzare condizioni di simulazione "what-if" per analizzare l'impatto delle politiche potenziali e valutarne utilità ed efficacia. • Combinare fonti di dati al fine di prevedere misure affidabili da adottare dalla città, oltre a testare e replicare politiche ecologiche adottate da altre città dell'UE • Utilizzare il Digital Twin per fornire alla città uno strumento di visualizzazione delle fonti di inquinamento, dei punti di interesse ecologici e delle rotte, al fine di testare l'impatto ambientale di diversi piani strategici. 	
Visualizzazione		
Realtà Aumentata	ND	
Rappresentazione Real - Time	<ul style="list-style-type: none"> • Visualizzazione del modello 3D dell'area di interesse, • Consultazione della rete stradale 2D sovrapposta al modello 3D • Visualizzazione delle informazioni in tempo reale inviate dai sensori • Osservazione delle previsioni dei flussi di traffico 	
Data Management		
Acquisizione Dati	Sensori	Sensori di Temperatura e Umidità, Barometro, Anemometri, Sensore di inquinamento atmosferico, Microfoni, Telecamere sorveglianza, Sensori smartphone cittadini
	Tecnologie di Mappatura	3D scanner terrestre e aereo, videosorveglianza, Database meteorologia, Database Trasporto Pubblico, Geodata Database, GIS
Mobilità	Sistema di Parcheggio controllato	posizione dei posti auto, durata della copertura, dati di prenotazione anticipata,

		dati economici, posti riservati ai residenti, posti riservati ai cittadini con disabilità.
	Dati di Trasporto Pubblico con Autobus	percorsi, numero di passeggeri che utilizzano il trasporto pubblico, posizione delle stazioni del trasporto urbano e timetable
	In fase di sviluppo	Dati sul Traffico, dati sugli incidenti, dati dei semafori, percorsi ciclabili.
Analisi Ambientale	Monitoraggio Atmosferico	Rilevamento qualità dell'aria, inquinamento atmosferico, real-time report inquinamento e misurazione del particolato
Previsione		
Simulazione	Gli scenari previsti dal progetto DUET permettono di utilizzare questo modello per simulare e prevedere l'impatto delle decisioni politiche sulla qualità dell'aria. Ad esempio, è possibile valutare come determinati scenari di traffico influenzeranno la qualità dell'aria senza dover apportare modifiche costose all'infrastruttura stradale o all'ambiente urbano. Questo tipo di previsione può fornire supporto ai decisori politici e agli sviluppatori urbani nel prendere decisioni più informate sulla qualità della vita in città.	
What-if Scenario	In scenari di tipo "what-if", le modifiche apportate dagli utenti nel mondo virtuale (ad esempio, la chiusura di una strada) vengono riflesse in un database di contesto tramite un sistema chiamato Interaction Service. Questo Interaction Service espone un'API ⁷⁰ che consente ai client di visualizzazione di diventare interattivi e di notificare agli altri componenti del digital twin eventuali modifiche apportate nel client. In questo modo, dopo la modifica degli attributi della strada, può essere avviata una simulazione - manualmente o automaticamente - che tiene conto del nuovo stato e può mostrare l'impatto del cambiamento. Nel caso della strada chiusa, ad esempio, potrebbe deviare il traffico e causare congestione altrove. In breve, questa descrizione si riferisce a un sistema in cui le modifiche apportate dagli utenti in un mondo virtuale vengono registrate e influenzano la simulazione del mondo virtuale, consentendo di valutare l'effetto delle modifiche sulla situazione complessiva.	
Accessibilità		
Privacy e Sicurezza ⁷¹	Il meccanismo di sicurezza di DUET si organizza a più livelli e includerà tutte le misure necessarie per affrontare i requisiti di sicurezza. Le misure di sicurezza implementate copriranno ogni asset sottostante nell'ecosistema di DUET. Questi asset includono: <ul style="list-style-type: none"> • Dispositivi IoT: • I sensori sono hardware a scopo speciale e firmware correlati che raccolgono informazioni sulle condizioni ambientali, la dinamica del traffico, ecc., e generano dati quantitativi associati, che possono essere elaborati (ad esempio, trasmessi in tempo reale) o archiviati per un 	

⁷⁰ Un "API model Digital Twin" (o Digital Twin basato su API) fa riferimento a un tipo di Digital Twin che è progettato per essere accessibile e interagire attraverso un'interfaccia di programmazione delle applicazioni (API). Un Digital Twin è una rappresentazione virtuale di un oggetto fisico, di un sistema o di un processo del mondo reale. Questa rappresentazione virtuale può essere utilizzata per scopi di monitoraggio, analisi, simulazione e controllo.

⁷¹ 725ca8_36fc0fed743546e78c613dd4e77f8350.pdf (digitalurbantwins.com)

	<p>utilizzo successivo. Esempi di sensori includono sensori acustici, sensori di inquinamento, sensori di umidità, accelerometri, tra gli altri.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gli attuatori prendono un input elettrico e lo trasformano in azione fisica, ad esempio, controllando un sistema o un meccanismo. • I sistemi embedded, oltre ai sensori e agli attuatori, sono dotati di un microcomputer che può eseguire software. Un esempio di dispositivi che contengono sistemi embedded sono le luci intelligenti. • Sistemi esterni contenenti dati storici di contesto. • Elementi di rete (dispositivi fisici o funzioni virtualizzate), come router, gateway, bilanciatori di carico, ipervisor, macchine virtuali, ecc. • Infrastruttura di calcolo (hardware o software), come bare metal, ipervisor, macchine virtuali, orchestratori, ecc. • Informazioni • Componenti del livello aziendale (seguendo il paradigma dei micro-servizi o meno), come data mining, elaborazione dati e calcolo, con particolare enfasi sulle API. • Componenti di presentazione (seguendo il paradigma dei micro-servizi o meno), come analisi dei dati e visualizzazione, con particolare enfasi sulle API.
Integrazione Sociale	<p>Availability: il sistema DUET deve essere sempre accessibile agli utenti, 24 ore al giorno, 7 giorni su 7, con una affidabilità del 99,9%. Gli utenti dovrebbero poter accedere al sistema in qualsiasi momento, e il sistema stesso deve essere in grado di funzionare in modo stabile anche in presenza di guasti localizzati o problemi tecnici.</p> <p>Usability: L'interfaccia utente del sistema deve essere attraente e intuitiva. Deve essere progettata in modo da essere facilmente comprensibile e utilizzabile da diverse categorie di utenti. Deve fornire accesso a tutte le funzionalità del sistema e consentire una navigazione agevole tra tutte le caratteristiche.</p> <p>Interoperability: Il sistema dovrebbe utilizzare protocolli di comunicazione che consentono l'interoperabilità con sistemi e dispositivi diversi. Il sistema DUET dovrebbe essere in grado di scambiare dati e informazioni con altri sistemi senza problemi o conflitti significativi. Questa interoperabilità è importante quando il sistema deve funzionare in un ambiente in cui sono presenti altri sistemi o dispositivi che devono cooperare o scambiare dati con il sistema</p>
Partecipazione	
Governance	<p>L'obiettivo è che i cittadini siano attivamente coinvolti nelle iniziative della città, esprimano il loro interesse per uno stile di vita migliore e più ecologico e che la voce dei cittadini sia un valore aggiunto nella formulazione delle politiche. In un contesto più ampio, il cambiamento ambientale può essere raggiunto solo come obiettivo comune dell'intera comunità e l'interesse individuale e di gruppo è di recente maggiormente considerato. Il Digital Twin fornirà alla città uno strumento per visualizzare le fonti di inquinamento attuali, i punti di interesse ecologici e le rotte, e per testare l'impatto ambientale di diversi piani strategici.</p>
Stakeholders	Municipality of Athens

	City of Athens - Municipal Police,
	City of Athens - Department of Resilience and Sustainability
	City of Athens - Urban Planning Agency
	Athens Digital Lab
	Bike Associations, Shared vehicles associations
	Public Transport Means Associations
	(OASA, STASY, Athens Metro)
	Citizens groups (Atenistas ecc)
Feedback	L'etica del modello di Atene prevede la possibilità, da parte dei cittadini e di chi usa la piattaforma, di poter inviare dei feedback: "As a citizen, I want to understand the predicted impact of scenarios related to new city developments, calculated using functionality used for what-if analysis, so I can give feedback about scenarios" ⁷²

⁷² 725ca8_10bdb0ac12fe42279a7b677afc9ef450.pdf (digitalurbantwins.com)

Helsinki

Helsinki rappresenta il cuore pulsante del paese per quanto riguarda la politica, l'istruzione, le finanze, la cultura e la ricerca della Finlandia. Inoltre, può vantare uno degli standard di vita urbana più elevati al mondo. Ha proattivamente investito in progetti pilota per le smart city e ha sviluppato una cultura che favorisce pratiche di sperimentazione tecnologica flessibili e accessibili. Attraverso questi strumenti, la città cerca di stimolare e coinvolgere i professionisti delle smart city nello sviluppo di soluzioni concrete che possono poi essere integrate in progetti strategici a livello cittadino. La creazione del modello digitale di Helsinki parte dagli anni '80, da un concorso di architettura cittadina, prosegue nel 2000 con le prime simulazioni in tempo reale, fino ai progetti attuali attraverso l'utilizzo dello strumento City Geographic Markup Language (City GML). Nel 2014, la città di Helsinki ha scelto il distretto di Kalasatama come prototipo di sperimentazione per la modellazione 3D e lo sviluppo di un Urban Digital Twin e creare un piano urbanistico che raccolga e coordini le informazioni digitali, e i dati inviati dai sensori. Il gemello digitale fa parte del progetto Smart Kalasatama ed è sviluppato da diversi progetti europei, tra cui il progetto Horizon 2020, che si concentra sulla sostenibilità ambientale attraverso le tecnologie dell'informazione e della comunicazione, nonché un progetto governativo per digitalizzare l'ambiente costruito e industria delle costruzioni (progetto KIRA digi). Lo scopo principale è creare promuovere strategie edilizie più efficienti dal punto di vista energetico per il controllo del clima urbano.

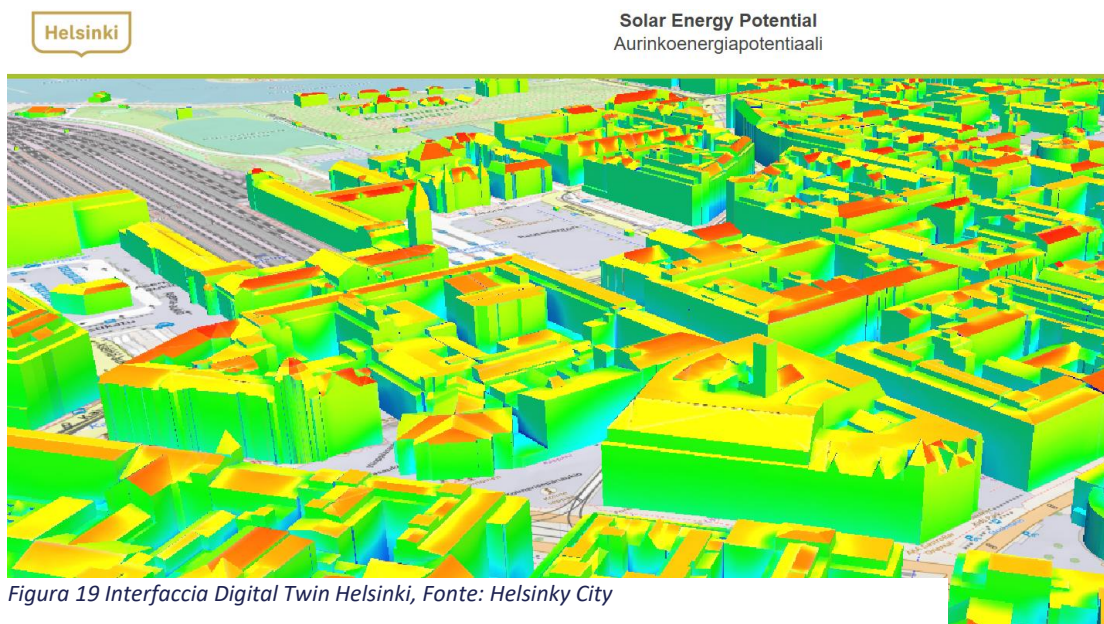


Figura 19 Interfaccia Digital Twin Helsinki, Fonte: Helsinki City

Link Web al caso studio	https://www.myhelsinki.fi/en/see-and-do/sights/virtual-helsinki	
Ambiti	Urban Planning, Built Environment, Energy Efficiency	
Scala di Applicazione	Distretto Katalasama	
Obiettivi Politici	<ul style="list-style-type: none"> • Inclusione digitale: Apertura dei dati relativi alla città per promuovere l'inclusione digitale ai cittadini, non solo in ambito cittadino ma anche rurale. Mira a migliorare i servizi e comprende l'uso di dati vari, come modelli tridimensionali di edifici, app per il turismo, intrattenimento • Mobilità intelligente: Modelli digitali per la simulazione del traffico, startup e aziende possono testare le loro soluzioni di mobilità intelligente presso il Mobility Lab, per misurare il rumore e l'efficienza della pulizia, contribuendo a soddisfare le esigenze della città • Promozione dell'IA: L'IA è promossa per l'innovazione medica e per il monitoraggio ambientale. • Neutralità climatica: Investimenti in tecnologie pulite per raggiungere la neutralità del carbonio entro il 2030, includendo la modellazione in 3D per spazi verdi e innovazioni alimentari sostenibili. • Collaborazione: La regione mira a diventare una città digitale, resiliente al clima e innovativa, in cui è fondamentale la collaborazione con università, istituti di ricerca e aziende per guidare l'innovazione 	
Obiettivi Digital Twin	<ul style="list-style-type: none"> • Produzione di modelli digitali di alta qualità dell'area Kalasatama di Helsinki, e renderli Open Data Sharing. • Rendere i modelli da piattaforma per progettare, testare, applicare e servire il ciclo di vita dell'ambiente costruito: "testare e costruire prima digitalmente" • Creare cooperazione con i principali partner • Promuovere lo sfruttamento del Digital Twin per i processi cittadini e nella produzione dei servizi, come una risorsa per la pianificazione urbanistica 	
Visualizzazione		
Realtà Aumentata	ND	
Rappresentazione Real - Time		
Data Management		
Acquisizione Dati	Sensori	Sensori di Temperatura e Umidità, Barometro, Anemometri, Sensore di inquinamento atmosferico, Microfoni, Telecamere sorveglianza, Sensori smartphone cittadini

	Tecnologie di Mappatura	3D scanner terrestre e aereo, videosorveglianza, Database meteorologia, Database Trasporto Pubblico, Geodata Database, GIS
Mobilità	Infrastrutture e condizioni stradali	Informazioni amministrative stradali, segnali e percorsi, modifiche al traffico, accessibilità, informazioni funzionali dell'area
	Traffico	Informazioni quantitative sul movimento dei veicoli e delle persone, percorsi trasporto pubblico, timetable
	Condizioni e informazioni sul contesto	Monitoraggio dell'inquinamento acustico, qualità dell'aria, condizioni ambientali
Edifici	Rilevamento	Helsinki ha sviluppato un servizio che utilizza i dati CityGML per analizzare la radiazione solare e il potenziale impatto della ristrutturazione di pareti, porte e finestre sull'impronta di carbonio. I proprietari di case che vivono a Helsinki possono confrontare il costo di nuovi isolamenti, finestre e pompe di calore, con i risparmi energetici previsti e la riduzione di CO2
	Visualizzazione	Grazie all'inserimento della modellazione del terreno e le altimetrie, è possibile visualizzare non solo gli edifici e i loro dettagli ma anche la loro altezza corretta. Gli edifici possono essere ricercati sia per indirizzo che per caratteristiche come l'anno di costruzione e il numero di piani con o senza la visualizzazione delle facciate. Si sceglie di poter visualizzare il modello del terreno nella vista OpenStreetMap o nella vista aerea.
Energia ⁷³	Potenziale energetico solare	Rileva la quantità di radiazione negli edifici su base annuale
	Previsione della domanda di riscaldamento	Previsione della domanda di energia per il riscaldamento e stime di ristrutturazione degli edifici per quasi l'intero patrimonio edilizio di Helsinki dal 2020 al 2050
	Potenziale geoenergetico	Potenziali di pozzi profondi 150 m / 300 m / 1000 m, aree delle acque sotterranee, substrato roccioso (tipi di roccia e conduttività termica, capacità termica specifica, parametri di densità per i calcoli geoenergetici) e dati del suolo per supportare il lavoro di progettazione dei pozzi geoenergetici
	Dati energetici degli edifici	<ul style="list-style-type: none"> • Informazioni anagrafiche comunali (ad es. metodo di riscaldamento degli edifici, utilizzo, volume, materiale da costruzione) • Riparazioni e modifiche • Edifici protetti (segnali di protezione)

⁷³ L'Atlante Energetico e Climatico di Helsinki costituisce uno strumento basato su modelli di dati che già comprende una vasta gamma di informazioni legate all'energia. Queste informazioni sono liberamente accessibili a vari attori, tra cui proprietari di immobili, urbanisti e aziende specializzate in servizi di efficienza energetica. L'obiettivo è ulteriormente espandere l'Atlante per sostenere l'ottimizzazione dell'efficienza energetica degli edifici, promuovere l'utilizzo di fonti rinnovabili e, in prospettiva, affrontare i cambiamenti climatici attraverso un'interfaccia visuale e informativa

		<ul style="list-style-type: none"> • Consumo energetico calcolato degli edifici per fascia di età (consumo di calore, energia elettrica degli utenti, energia elettrica dell'edificio) • Potenzialità e costi per migliorare l'efficienza energetica di un tipico edificio degli anni '70-'80 nel quartiere di Merihaka • Attestati di prestazione energetica e proposte di interventi migliorativi <p>Dati di consumo misurati degli edifici HEKA per il 2015 e il 2016 (teleriscaldamento, elettricità degli edifici, consumo di acqua)</p>
Analisi Ambientale	Monitoraggio Atmosferico	Rilevamento qualità dell'aria, inquinamento atmosferico, real-time report inquinamento e misurazione del particolato, Irradiazione solare sui tetti, dispersioni termiche
Previsione		
Simulazione	ND	
What-if Scenario	Risk scenario inondazioni	
Accessibilità		
Privacy e Sicurezza	Definizione policy sicurezza, Risk assessment, selezione e controllo dei dati	
Integrazione Sociale	Inserimento manuale dei dati da parte dei cittadini: immagini e foto	
Partecipazione		
Governance	La soluzione digitale aperta implementata dalla città di Helsinki ottimizza il processo decisionale mediante il collegamento delle informazioni rilevanti alle parti coinvolte. Grazie all'accesso aperto ai dati cittadini, il pubblico può accedere alle medesime informazioni degli stakeholder del progetto, contribuendo a una maggiore trasparenza e a una migliore gestione delle relazioni con il pubblico. I dati sono già sfruttati da università e istituti di ricerca, con i modelli di città che rappresentano uno dei set di dati più scaricati. In sintesi, Helsinki sta creando un'affidabile infrastruttura di dati digitali per sostenere iniziative di città intelligenti sostenibili, migliorando la qualità della vita per i residenti e i visitatori. In futuro, l'impegno nella digitalizzazione continuerà con l'espansione del gemello digitale su tutta l'estensione urbana.	
Stakeholders ⁷⁴	City of Helsinki	
	HRI (Helsinki Region Infoshare)	
	STARA (Helsinki City Construction Service)	
	HSL (Helsinki Region Transport)	

⁷⁴ M. Papagna, Helsinki città aperta: il futuro open data e low carbon della capitale finlandese, Forbes, gennaio 2021

	Fintraffic - Digitraffic
	HSY (Helsinki Region Environmental Service)
	FMI (Finnish Meteorological Institute)
	NLS (National Land Survey)
Feedback	Helsinki ha previsto una piattaforma di feedback, integrata al modello digitale della città attraverso il progetto DVECE ⁷⁵ (Dynamic Visualizations to Enhance Citizens' Engagement). Gli obiettivi principali del progetto sono determinare come il canale di feedback, chiamato Decidim possa integrarsi efficacemente nel gemello digitale e semplificare il processo di fornitura di feedback. Ciò favorirà la comprensione delle esigenze dei cittadini da parte dei decisori attraverso strumenti di visualizzazione avanzati. Questo coinvolgimento diretto dei residenti consentirà lo sviluppo di soluzioni per una mobilità più efficiente, in particolare per quanto riguarda il traffico nei quartieri, e favorirà una maggiore attenzione ai gruppi vulnerabili.

⁷⁵ Forum Virium Helsinki. (2023, May 4). DVECE: residents to provide feedback on mobility through the Helsinki 3D model - Forum Virium Helsinki. <https://forumvirium.fi/en/projects/dvece/>

Firenze

Il sistema Digital Twin di Firenze è supportato da Snap4City, un'applicazione open source che consente la creazione di un "Global Digital Twin" di una città insieme a "Digital Twin Locali" integrati.

La rappresentazione 3D del "Digital Twin" in Snap4City consente di visualizzare diverse informazioni sovrapposte sulla mappa, ognuna con il proprio livello di opacità. Inoltre, è possibile aggiungere mappe termiche (heatmaps) alla visualizzazione 3D, che vengono mostrate in modo integrato nel "Digital Twin". Questo sistema gestisce anche dati topografici, mappe ortogonali e dati relativi al terreno.

I punti di interesse (POI) sono integrati nella vista 3D del "Digital Twin" e è possibile ottenere informazioni dettagliate facendo clic sui marcatori corrispondenti sulla mappa.

Questo framework consente una visione completa e dettagliata di una città, facilitando la gestione e la pianificazione urbana, andando oltre la semplice rappresentazione 3D, includendo una vasta gamma di dati, come l'elevazione del terreno, dati stradali, mappe di edifici, mappe termiche, dati di flusso del traffico, dati da sensori e attuatori IoT, punti di interesse (POI), indicatori chiave di performance (KPI), percorsi degli autobus e piste ciclabili.

La piattaforma consente di memorizzare e utilizzare due tipi di dati: dati statici, che descrivono la città, le sue infrastrutture e dati dinamici che descrivono le persone, le attività socioeconomiche e i loro comportamenti.

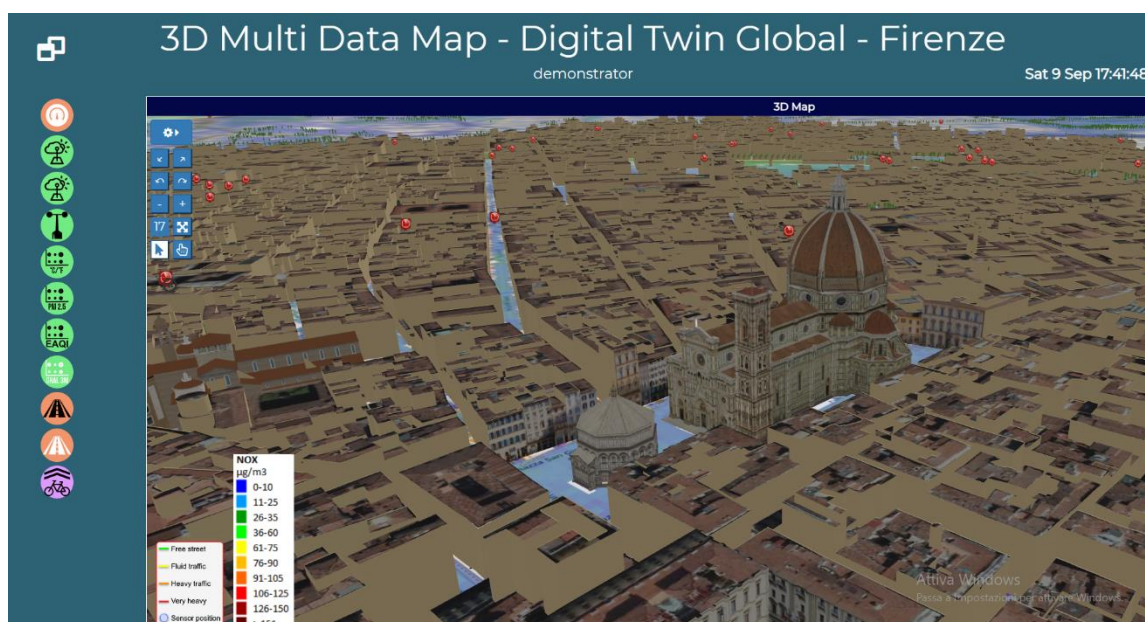


Figura 20 Interfaccia Digital Twin Firenze, Fonte: Snap4City Firenze

Link Web al caso studio	Dashboard Management System (snap4city.org)	
Ambiti	Pianificazione Urbana, Decision Making, Analisi Ambientale, Efficienza Energetica	
Scala di Applicazione	Città	
Obiettivi Politici	<ul style="list-style-type: none"> • Integration: integrazione di tutti i possibili settori e aspetti che sono nelle competenze comunali; • Innovation: avanguardia nell'adottare sistemi sempre più innovativi, tecnologici e di sviluppo; • Involvement: coinvolgimento delle parti interessate nel fissare gli obiettivi sostenibili; • Information in termini di ICT, come strumento per i rapporti con i cittadini e per il monitoraggio e controllo delle strategie. 	
Obiettivi Digital Twin	<p>Mobilità e trasporti: riduzione della congestione delle persone, del traffico, monitoraggio e controllo del flusso del traffico, simulazione e analisi della mobilità e dei trasporti, riduzione del tempo necessario per il parcheggio di auto e biciclette, riduzione dell'inquinamento, parcheggio intelligente, ecc., invio di allarmi, fornire suggerimenti;</p> <p>Energia: monitoraggio delle stazioni di ricarica, controllo intelligente delle luci, monitoraggio della produzione e del consumo di energia in tempo reale, calcolo degli indicatori, invio di allarmi;</p> <p>Ambiente: previsione di NOX e NO2 a lungo termine, monitoraggio di inquinanti di ogni tipo e segnalazione, informazione agli utenti della città, gestione dei rifiuti, previsioni di frane, calcolo del CO2;</p> <p>Pianificazione strategica: esecuzione di analisi "what-if" in relazione a condizioni critiche, pianificazione della produzione, pensiero sistematico sui sistemi di supporto decisionale intelligenti, 15MinCityIndex, SDG, ecc.;</p> <p>Gestione: previsione delle operazioni di manutenzione, allarmi multicanale, rilevamento di anomalie come avviso anticipato, reputazione del servizio, ecc., per la resilienza e la sala di controllo;</p> <p>Flusso delle persone: classificazione del turismo, conteggio delle persone, monitoraggio, misurazione delle traiettorie, fornitura di suggerimenti e segnalazione dei casi critici.</p>	
Visualizzazione		
Realtà Aumentata	ND	
Rappresentazione Real - Time	Monitoraggio	<p>Flusso del traffico, condizioni meteo, allarmi e avvertenze, Qualità dell'aria, inquinanti (PM10, PM2,5, NO2, SO2, Acustica, NO, O3 , AQI,...)</p> <p>Informazioni rese disponibili sulla piattaforma e attraverso App disponibili ai cittadini</p>
Data Management		
Acquisizione Dati	Sensori	Sensori di Temperatura e Umidità, Barometro, Anemometri, Sensore di inquinamento atmosferico, Microfoni, Telecamere sorveglianza, Sensori smartphone cittadini

	Tecnologie di Mappatura	3D scanner terrestre e aereo, videosorveglianza, Database meteorologia, Database Trasporto Pubblico, Geodata Database, GIS
Mobilità	Trasporto Pubblico	<ul style="list-style-type: none"> - Analisi Domanda di trasporto - Analisi qualità trasporto pubblico - Time-table, percorsi e orari in tempo reale - Visualizzazione di Percorsi multimodali
	Traffico	<ul style="list-style-type: none"> - Ricostruzione dei flussi di traffico tramite polilinee - Tracciamento dei flussi tramite devices e App - Calcolo Slow/fast Mobility (città dei 15 minuti)
	Condizioni e informazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Rilevamento e visualizzazione incidenti - Mappe di Calore
Energia	Infrastrutture	Segnalazione stazioni di ricarica elettriche
	Previsione della domanda di riscaldamento	Smart info contatori di consumo
	Control Room	Lampioni spazi pubblici
Analisi Ambientale	Rilevamento Inquinamento	<ul style="list-style-type: none"> - Mappe di calore, - Impollinazione, - Particolato - Computazione di rilevamento CO2 in base ai flussi di traffico
	Previsioni	<ul style="list-style-type: none"> - Meteo - Frane - Inquinamento
Previsione		
Simulazione	Flussi stradali, smart parking, smart bike sharing, flussi pedonali	
What-if Scenario	Percorsi, flussi di traffico, domanda vs offerta	
Accessibilità		
Privacy e Sicurezza	La piattaforma Snap4City è stata progettata per essere conforme al GDPR come piattaforma IoT/IoE. In Snap4City, tutti i dispositivi iniziano come dispositivi IoT personali privati, come dati provenienti da app mobili, dispositivi personali, letti intelligenti, dati delle automobili, monitoraggio cardiaco, glicosimetri, ecc. Questi dati possono diventare pubblici o accessibili a uno o più utenti, gruppi o organizzazioni, a seconda delle autorizzazioni concesse, che sono definite dai proprietari dei dati stessi. Snap4City consente di raccogliere e gestire dati nel rispetto dei diritti dei proprietari dei dati e di controllare l'utilizzo dei dati quando vengono condivisi o distribuiti.	

Integrazione Sociale ⁷⁶	<p>La soluzione Snap4City sfrutta il concetto di Living Lab Smart City. Gestisce una vasta quantità di dati, inclusi dati sensibili, e affronta in modo adeguato i problemi legati alla privacy dei dati, in linea con il Regolamento generale sulla protezione dei dati (GDPR⁷⁷).</p> <p>Nel contesto delle Smart City, i Living Lab devono offrire funzionalità chiave per gestire la complessità. Un'infrastruttura Smart City Living Lab deve:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Attivare la produzione di conoscenza basata sulla pratica: Deve essere in grado di generare conoscenza in ambienti collettivi e privati, considerando sia i dati privati che gli Open Data. 2. Apprendere internamente ed esternamente: Deve essere in grado di apprendere da esperienze di altre città che affrontano le stesse sfide. 3. Essere consapevole dei nuovi modelli di impegno civico: Deve tenere conto delle nuove forme di coinvolgimento civico sperimentate in tutto il mondo. 4. Sostenere nuovi modelli di cittadinanza: Deve essere in grado di promuovere nuovi modelli di cittadinanza attiva. 5. Orientare gli investimenti verso opportunità: Deve concentrarsi su esperimenti e opportunità piuttosto che su soluzioni preconfezionate. 6. Stimolare la partecipazione di tutti gli stakeholder: Tutti gli attori devono essere coinvolti nella raccolta dati e nella produzione di soluzioni.
Partecipazione	
Governance	<p>La soluzione Snap4City fornisce un set di strumenti e un metodo flessibile per creare rapidamente una vasta gamma di applicazioni per le smart city sfruttando dati eterogenei e servizi degli stakeholder abilitati oltre alle tecnologie IoT / IoE e analisi dei Big Data. Una delle prime attività per la creazione di un "Living Lab" in una città è la creazione dell'infrastruttura tecnica, che a sua volta si basa su molti strumenti abilitanti preziosi. Devono supportare la città:</p> <ul style="list-style-type: none"> • nella modellazione dei dati; • nell'upload di dati contestuali e aperti; • nella connessione di fonti IoT / IoE e servizi esterni; • nella creazione di app IoT / processi di integrazione ed algoritmi di analisi dei dati, per arrivare a produrre cruscotti per le smart city e iniziare la produzione di app IoT basate su micro-servizi. <p>Tutte queste fasi devono essere accompagnate e supportate dalla disponibilità di un set di strumenti di sviluppo, facili da usare, accessibili e aperti via web. A questo scopo, la piattaforma Snap4City fornisce un ambiente collaborativo in cui diversi tipi di stakeholder possono collaborare reciprocamente. Contestualmente alla creazione dell'infrastruttura, la collaborazione tra gli stakeholder può iniziare creando accordi, collaborazioni, networking, produzione di tutorial, workshop, hackathon, ecc., per coinvolgere gli stakeholder in scenari d'uso e, infine, firmare contratti di partenariato, licenze, ecc. Questo processo deve essere guidato dal comune stesso e, d'altra parte, il comune ha bisogno di supporto per gli aspetti</p>

⁷⁶ TC8.6 - Snap4City Living Lab Life Cycle | Snap4City

⁷⁷ Documento relativo alla protezione delle persone fisiche con riguardo al trattamento dei dati personali, nonché alla libera circolazione di tali dati. Il presente testo comprende la rettifica pubblicata nella GU del 23 maggio 2018 EUR-Lex - 02016R0679-20160504 - EN - EUR-Lex (europa.eu)

	tecniche nel caso in cui non sia molto grande e orientato alla tecnologia. Tipicamente, le singole aziende, anche se partecipate dalla città o dagli operatori cittadini, non hanno la visione e la missione di condividere un quadro multisettoriale e multiservizio così ampio e un ambiente tecnologico così vasto.
Stakeholders	Comune di Firenze
	Università degli Studi di Firenze
	DINFO (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione)
	DISIT (Distributed System and Internet Technologies Lab)
	Sturt Up
	Associazioni cittadine
	Sii-Mobility
	TRAFAIR
	MOSAIC
Feedback	La piattaforma prevede la possibilità di inserimento di commenti, opinioni e feedback da parte degli utenti registrati sulla piattaforma ai fini di acquisizione di dati in tempo reale e implementazione e sviluppo della piattaforma stessa.

I fattori di successo per l'applicazione del Digital Twin nelle città

L'analisi dei casi studio ha permesso di identificare una serie di fattori critici di successo che giocano un ruolo fondamentale nell'efficace applicazione del Digital Twin nella sfida per la decarbonizzazione delle città. Questi fattori, riportati nella Tabella 4, abbracciano degli aspetti chiave che influenzano direttamente l'efficacia di tali iniziative.

Tabella 4 Fattori di successo per la decarbonizzazione delle città tramite l'uso del Digital Twin

ELABORAZIONE DELLA PIATTAFORMA DI INTERAZIONE	
Realizzazione di una piattaforma intuitiva	La creazione di una piattaforma semplice ed intuitiva, non solo per gli addetti ai lavori ma anche per i cittadini, permette di avere la piena comprensione e organizzazione dei dati e delle informazioni del sistema urbano.
Interoperabilità della piattaforma con i sistemi esterni	L'interoperabilità garantisce l'operatività bidirezionale della tecnologia in cui l'aggiornamento istantaneo dei dati che vengono acquisiti e visualizzati è fondamentale ai fini del monitoraggio del sistema urbano
Archiviazione Dati	La piattaforma necessita di un sistema dedicato alla gestione di una grande quantità di dati eterogenei. La soluzione è quella di adottare un archivio digitale per la memorizzazione, l'interrogazione e il recupero dei dati prodotti dai Digital Twin tematici, dai sensori e dagli altri componenti del sistema.
Gestione Legale ed Etica della piattaforma	La grande quantità di dati e di informazioni di diversa natura devono essere gestite dal punto di vista legale ed etico e devono essere raccolte, elaborate e memorizzate in modo conforme alla legge e garantire che i cittadini abbiano pieno controllo sulle informazioni che li riguardano.
Rappresentazione dei Dati	A partire dal Modello 3D alla simulazione e creazione degli scenari "What-if", la visualizzazione dei dati aumenta il livello di comprensione delle problematiche della città nonché la base di supporto alle decisioni degli enti amministrativi.
RILIEVO E MODELLAZIONE 3D E ANALISI DELLA CITTA'	
Trattamento efficiente dei dati Geospaziali	Il trattamento efficiente dei dati geospaziali è cruciale per garantire che il Digital Twin rifletta accuratamente il territorio. Questo coinvolge la raccolta, l'elaborazione e la gestione efficiente di dati topografici,

	<p>cartografici e geografici. L'utilizzo di sistemi informatizzati avanzati per la gestione dei dati geospaziali può contribuire a garantire una rappresentazione precisa del contesto urbano.</p>
Digitalizzazione dei documenti catastali	<p>La digitalizzazione dei documenti catastali è fondamentale per integrare i dati di proprietà e utilizzo del suolo all'interno del Digital Twin. Questo processo semplifica l'accesso ai dati sui terreni e sulle proprietà, consentendo una gestione più efficace delle risorse urbane. Inoltre, favorisce la pianificazione e la gestione sostenibile del territorio.</p>
Uso e integrazione delle tecnologie di rilievo (Droni, Laser scanner, Nuvola di punti...)	<p>Consentono di acquisire dati dettagliati sulle condizioni fisiche dell'ambiente urbano e rilevano geometricamente i dettagli del sistema del costruito.</p>
Monitoraggio del sistema edilizio	<p>Gli edifici rappresentano una parte significativa dei consumi energetici e delle emissioni di carbonio in una città, per cui, il monitoraggio dettagliato è essenziale per identificare opportunità di riduzione delle emissioni.</p> <p>I dati raccolti includono informazioni sulle prestazioni energetiche degli edifici, come il consumo di energia e l'efficienza degli impianti di riscaldamento, raffreddamento e illuminazione.</p> <p>Ciò consente ai decisori di visualizzare il consumo energetico e identificare le aree con potenziale per miglioramenti nell'efficienza energetica.</p>
Arricchimento del modello tridimensionale	<p>Per migliorare la rappresentazione del territorio, è importante arricchire il modello tridimensionale del Digital Twin con dati dettagliati, ad esempio sulle infrastrutture, sugli edifici, sugli alberi e sugli altri elementi urbani. Questo rende possibile una visualizzazione accurata e dettagliata dell'ambiente, consentendo di identificare opportunità di decarbonizzazione.</p>
Progettazione del posizionamento dei sensori e delle tecnologie di Acquisizione Dati	<p>I sensori dovrebbero essere posizionati strategicamente per raccogliere dati pertinenti per la decarbonizzazione. Un piano di acquisizione dati ben progettato assicura una copertura completa e un monitoraggio efficace.</p>
Monitoraggio del sistema di reti e tecnologie di servizio	<p>Il monitoraggio delle reti e delle tecnologie di servizio, come reti elettriche, idriche e di trasporto, è fondamentale per valutare il consumo di risorse e identificare aree di</p>

	ottimizzazione per la decarbonizzazione. Inoltre, l'efficienza dei servizi collegati al modello 3D garantisce un'acquisizione accurata e completa dei dati della città
Localizzazione delle Infrastrutture di Servizio della città	Questo processo si concentra sulla mappatura e la gestione delle infrastrutture essenziali che supportano la vita urbana, come le reti di trasporto pubblico, i punti di ricarica per veicoli elettrici, gli impianti di trattamento dei rifiuti e altre strutture di servizio. La rappresentazione digitale precisa e georeferenziata di queste infrastrutture consente di identificare posizioni strategiche per ottimizzare la distribuzione di servizi e facilitare l'adozione di soluzioni più ecologiche.
INTERAZIONE SOCIALE	
Coinvolgimento Comunitario	Il coinvolgimento comunitario rappresenta un approccio chiave per garantire il successo dei progetti di decarbonizzazione delle città. Questo significa coinvolgere attivamente i residenti, le organizzazioni locali e altre parti interessate nella progettazione, nell'implementazione e nella valutazione delle iniziative di decarbonizzazione. Il coinvolgimento comunitario può avvenire attraverso incontri pubblici, consultazioni online, tavole rotonde, gruppi di lavoro o altre forme di partecipazione. L'obiettivo è raccogliere opinioni, esigenze e conoscenze della comunità, assicurando che i progetti rispondano alle reali esigenze dei cittadini.
Partenariato Pubblico-Privato	La sinergia tra enti pubblici e aziende private permette di combinare risorse finanziarie, competenze tecniche e capacità di gestione dei settori pubblico e privato. I PPP possono essere utilizzati per finanziare, progettare e gestire infrastrutture sostenibili. L'obiettivo è sfruttare le competenze e le risorse del settore privato per accelerare l'attuazione dei progetti di digitalizzazione.
Feedback continuo	La creazione di canali di comunicazione aperti e la raccolta regolare di opinioni e feedback da parte dei cittadini e delle parti coinvolte nella piattaforma del Gemello Digitale, sono utilizzati per migliorare i piani e le iniziative di decarbonizzazione in corso, consentendo adattamenti in tempo reale in base alle esigenze e ai suggerimenti ricevuti da parte dei cittadini. L'obiettivo è assicurare che le iniziative rimangano allineate con le esigenze della comunità e che i risultati siano

	valutati e adeguati di conseguenza per la risoluzione dei problemi e le criticità legate alla piattaforma e alla visualizzazione dei dati.
--	--

CAPITOLO 5: Valutazione dei fattori di successo tramite metodo Delphi

Che cos'è il metodo Delphi?

“La tecnica Delphi è una metodologia tipica della ricerca sociale, che permette di intervistare un gruppo selezionato (detto anche panel) di esperti, chiamati ad esprimere, in forma anonima, i propri pareri ed opinioni su una determinata tematica, allo scopo di validarne alcuni tramite il confronto reciproco e la condivisione progressiva”.⁷⁸

Il metodo Delphi si basa sulla somministrazione di uno o più questionari standardizzati a un gruppo di esperti noto come "panel". Dopo la raccolta delle risposte, i moderatori dell'indagine le analizzano e forniscono un feedback ai membri del panel. Il processo si ripete iterativamente in round successivi, in cui gli esperti possono rivedere le risposte aggregate dal round precedente e decidere se modificarle o mantenerle. L'iterazione continua fino a quando il panel raggiunge un consenso o dopo un numero predefinito di round. Sono impiegati strumenti statistici per valutare se le risposte degli esperti convergono nel corso delle iterazioni. Infine, il metodo Delphi si conclude con un'analisi dettagliata dei risultati e una discussione approfondita di tali risultati nei paragrafi successivi.

La Tecnica Delphi risulta utile per:

Previsioni a Lungo Termine o in Situazioni Nuove: È utile quando si devono fare previsioni a lungo termine o quando ci si trova di fronte a una situazione nuova in cui l'opinione degli esperti rappresenta l'unico punto di riferimento disponibile.

Decisioni Partecipative o in Contesti Complessi: Si rivela vantaggiosa quando è necessario prendere decisioni in modo collaborativo, specialmente in situazioni complesse in cui i problemi non possono essere ridotti a una formulazione semplice e chiara.

Scenari ed Opzioni: È efficace nel processo di individuazione e valutazione di scenari futuri e opzioni, consentendo una visione più ampia delle possibilità.

⁷⁸ <http://qualitapa.gov.it/sitoarcheologico/relazioni-con-i-cittadini/utilizzare-gli-strumenti/tecnica-delphi/>

Parere Indipendente o Esterno: Viene impiegata quando è richiesto un punto di vista indipendente o esterno per supportare le decisioni aziendali.

Analisi Stakeholder

L'identificazione degli esperti è una parte fondamentale dell'indagine, ai fini di ottenere una conoscenza approfondita dell'argomento trattato. Infatti, il risultato dell'indagine Delphi può ampliare la conoscenza trasformando le opinioni individuali in consenso di gruppo, che può poi collegarsi all'analisi degli scenari e fornire nuove prospettive⁷⁹.

Ai fini di canalizzare la ricerca verso gli utenti che possono fornire un contributo significativo nella valutazione dei fattori critici di successo individuati, è stata svolta un'analisi degli stakeholder, partendo dal confronto tramite il framework applicato su Atene, Helsinki e Firenze. Grimble e Wellard hanno sottolineato l'importanza dell'analisi degli stakeholder per comprendere i problemi di complessità e compatibilità tra obiettivi e stakeholder (Grimble e Wellard, 1997)⁸⁰. Prima di condurre qualsiasi analisi degli stakeholder, è necessario rispondere a due domande fondamentali: "Chi è uno stakeholder?" e "Perché è necessario il loro ruolo?".

"Any group or individual who can affect or is affected by the achievement of the firm's objectives" (Freeman, 1984: 25).

"Groups or individuals who are affected by the organization as well as those who can affect it among the number of an organization's stakeholders." (Bryson et al., 2002, Freeman and McVea, 2001).

Gli stakeholder vengono identificati in base a diversi fattori, tra cui il loro interesse e l'influenza sul sistema, la loro conoscenza del sistema e le loro reti interne ed esterne. Per quanto riguarda la seconda domanda, è importante notare che i ruoli degli stakeholder sono dinamici nel tempo e possono variare a seconda delle circostanze. Le stesse persone o gruppi possono assumere

⁷⁹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522005866>

⁸⁰ Grimble, R., & Wellard, K. (1997). Stakeholder methodologies in natural resource management: a review of principles, contexts, experiences, and opportunities. *Agricultural Systems*, 55(2), 173–193. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(97\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(97)00006-1)

ruoli diversi in momenti diversi, e i ruoli degli stakeholder possono anche sovrapporsi.

Secondo Ackermann e Eden in "Strategic Management of Stakeholders: Theory and Practice"⁸¹, l'analisi degli stakeholder serve ai fini di:

- Identificare chi sono realmente gli stakeholder nella situazione specifica;
- Esplorare l'impatto delle dinamiche degli stakeholder;
- Sviluppare strategie di gestione delle parti interessate; determinare come e quando è appropriato intervenire per alterare o sviluppare la base del significato di un singolo stakeholder, che a sua volta è determinato attraverso un'approfondita considerazione del potere e dell'interesse dello stakeholder a influenzare la direzione dell'organizzazione.

Sebbene non ci siano studi esistenti che si occupino del coinvolgimento degli stakeholder nello sviluppo dei gemelli digitali a livello cittadino, se ne è discussa l'importanza.

Caprari et al. (2022) [23] evidenzia come la città di Cambridge integra i processi di sviluppo della piattaforma tecnologica con le diverse istituzioni politico-amministrative, le entità private e alcuni rappresentanti dei cittadini. In questo senso, il progetto mira a interconnettere gli obiettivi del Digital Twin con le politiche urbane e le richieste collettive. Questo approccio trasversale alla governance multilivello è un valido esempio di coinvolgimento sia degli interessi pubblici che privati in una pianificazione urbana efficiente.

D'Hauwers et al. (2021) [32] analizza 4 scenari di business di Digital Twin, attraverso parametri che definiscono come i "digital twin" urbani vengono utilizzati e chi controlla le risorse dei dati. I "digital twin" possono essere utilizzati principalmente dal governo per formulare politiche in un modello chiuso o aperti a diversi attori nell'ecosistema dei dati, come cittadini, aziende o altre organizzazioni. Il controllo dei dati può essere centralizzato, con il governo che detiene il controllo principale delle risorse dati, o decentralizzato, con diversi attori nell'ecosistema dei dati che controllano e condividono le risorse dati.

⁸¹ Ackermann, F. and Eden, C. 2011. Strategic Management of Stakeholders: Theory and Practice. Long Range Planning. 44 (3): pp. 179-196 <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S0024630110000452>

Questo porta a quattro scenari principali di "digital twin" urbani:

1. "Inside-In Urban Digital Twin" - Utilizzato principalmente dal governo per scopi decisionali interni, in un modello chiuso con il governo che controlla le risorse dati.
2. "Inside-Out Urban Digital Twin" - Ancora utilizzato principalmente dal governo ma aperto all'ecosistema dei dati, con il governo che controlla le risorse dati ma permette la condivisione con altri attori.
3. "Outside-Out Urban Digital Twin" - Utilizzato da diversi attori nell'ecosistema dei dati, come cittadini e aziende, in un modello aperto con il controllo decentralizzato delle risorse dati.
4. "Outside-In Urban Digital Twin" - Ancora utilizzato da diversi attori nell'ecosistema dei dati, ma con una maggiore direzione e controllo da parte del governo.

Questi scenari offrono un quadro utile per comprendere le diverse strutture e dinamiche dei Digital Twin urbani, consentendo una scelta mirata in base alle esigenze specifiche di ciascun contesto.

Per l'analisi degli stakeholder, la presente ricerca utilizza la matrice di Ackermann e Eden⁸² con riferimento alla selezione effettuata in seno a organizzazioni, aziende ed enti dai framework applicati alle città (si veda Appendice A1).

La realizzazione della matrice parte da un processo iniziato con i membri di un'azienda del Top Management Team (TMT) a cui viene chiesto di elencare gruppi, organizzazioni e individui che ritenevano avessero il potere di influenzare o un interesse significativo nella strategia dell'organizzazione dell'azienda. Una volta raccolti i contributi iniziali, i membri del TMT hanno cominciato a posizionare gli stakeholder in una griglia, senza ancora considerare con precisione il loro posizionamento, per stimolare ulteriori discussioni, poiché l'obiettivo era individuare stakeholder unici al di là di quelli ovvi.

Dopo la fase di generazione dei contributi, i partecipanti hanno iniziato a posizionare con precisione gli stakeholder rispetto alle due dimensioni di potere e interesse. Per gestire la complessità, i membri del TMT sono stati invitati a valutare una dimensione alla volta. Hanno inizialmente focalizzato quelli con il maggiore potere, seguiti da quelli con il minore potere, stabilendo così dei punti di

⁸² Ackermann, F. and Eden, C. 2011. Strategic Management of Stakeholders: Theory and Practice. Long Range Planning. 44 (3): pp. 179-196
<https://www.sciencedirect-com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S0024630110000452>

riferimento iniziali che hanno guidato il posizionamento degli altri stakeholder in base al loro potere relativo.

Lo stesso processo di posizionamento è stato applicato alla dimensione degli interessi. Questo ha generato discussioni tra i manager, portando alla condivisione di conoscenze precedentemente non esplicite.

Alla fine, è stata creata una griglia di potere/interesse con quattro quadranti, definendo quattro categorie principali di stakeholder:

Giocatori: Questi sono stakeholder con un alto interesse nell'organizzazione e un elevato potere nell'influenzare le strategie aziendali. Sono in grado di sostenere o sabotare le strategie aziendali.

Soggetti: Anch'essi hanno un alto interesse, ma hanno meno influenza rispetto ai "Giocatori."

Contestualisti: Questi stakeholder hanno un alto potere nel determinare il contesto futuro in cui l'organizzazione dovrà operare, ma potrebbero non mostrare ancora molto interesse.

Folla: Questa categoria include stakeholder che attualmente non mostrano né interesse né potere significativo nell'influenzare le strategie aziendali.

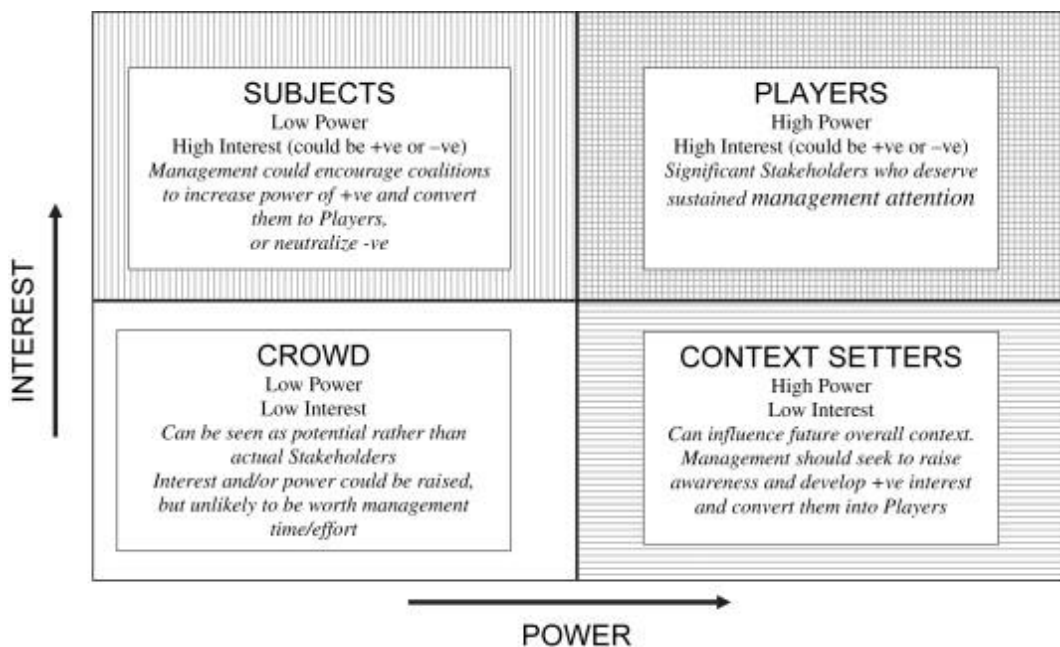


Figura 21 Griglia Potere-Interesse Stakeholder, Fonte: Science Direct

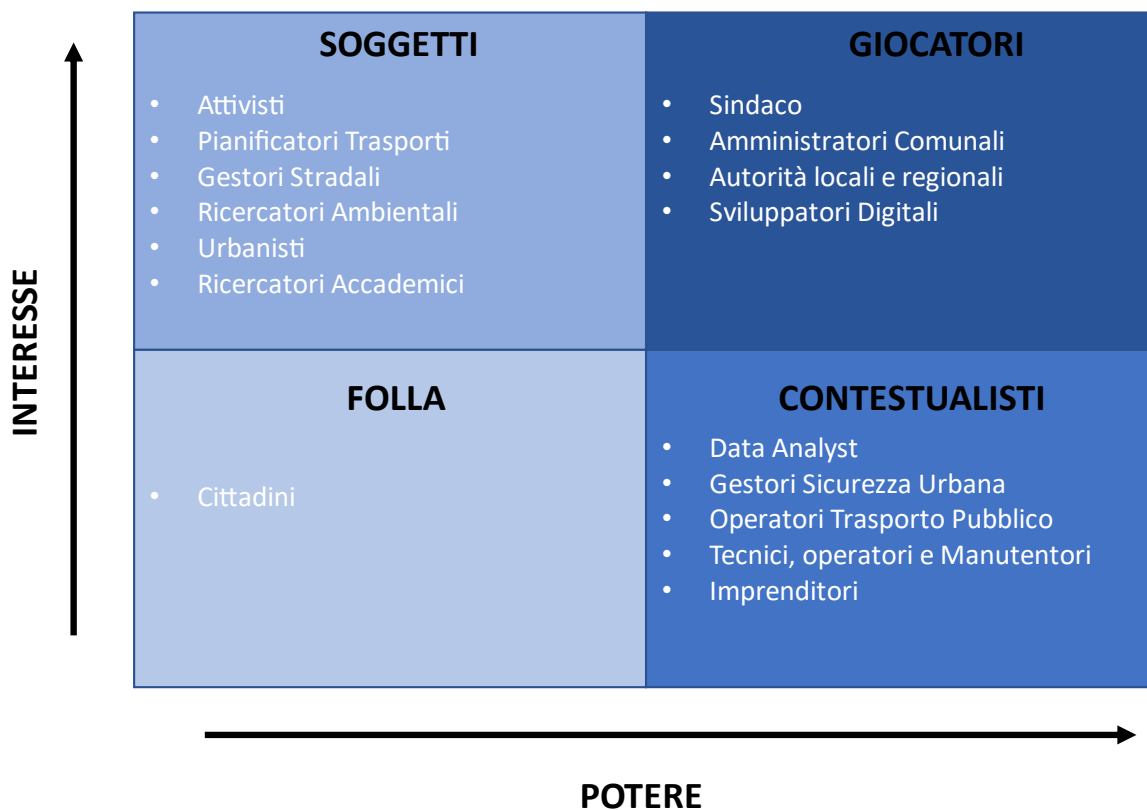


Figura 22 Matrice Potere-Interesse Stakeholder Digital Twin casi studio

Identificazione Panel di esperti

Gli esperti che hanno dato il loro consenso per la partecipazione al sondaggio appartengono tutti al contesto italiano e ognuno di essi rappresenta una categoria di utenti identificati nell'analisi stakeholder effettuata precedentemente. Nella **Tabella 5** sottostante, sono riportate le caratteristiche legate al ruolo e al settore di appartenenza.

Tabella 5 Partecipanti Sondaggio

	Ruolo	Settore
Esperto 1	Architetto BIM	Edile
Esperto 2	CEO	Trasformazione Digitale, Smart Cities
Esperto 3	Dottorando	Ricerca
Esperto 4	Presidente Fondazione	Digitale
Esperto 5	CTO	Smart Cities, Trasporti, Energia,
Esperto 6	Senior Researcher	Trasporti e Mobility Planning
Esperto 7	Ingegnere	Geomatica per il Digital Twin
Esperto 8	Dirigente Comunale	Direzione generale Digital Twin
Esperto 9	Direttore del Centro di Ricerca	Digital Society / Digital Twin Urbano
Esperto 10	Giornalista	Energia, Tecnologia, Edilizia, Ambiente
Esperto 11	Innovation Manager	Infrastrutture
Esperto 12	Managing Director di società di consulenza	Mobilità e Trasporti
Esperto 13	Architetto BIM	Edilizia
Esperto 14	App developer	Intelligenza Artificiale

Discussione dei Risultati

È stato chiesto ai partecipanti di attribuire un punteggio ai fattori di successo identificati in base alla loro importanza. Per ogni sfida è stata utilizzata una scala Likert a cinque punti. Un totale di 14 partecipanti al panel completa il sondaggio. La Figura 23 illustra i risultati dell'importanza dei fattori di successo dell'applicazione del Digital Twin per la decarbonizzazione delle città.

In questo lavoro, è stato utilizzato un grafico a barre in pila, in cui ciascuna categoria ammonta al 100%, composta dalla quota totale di persone che valutano le sfide in base al grado di importanza. Sono stati identificati cinque colori per ogni livello di valutazione in modo da avere una chiara distinzione sulle risposte che sono state indicate.

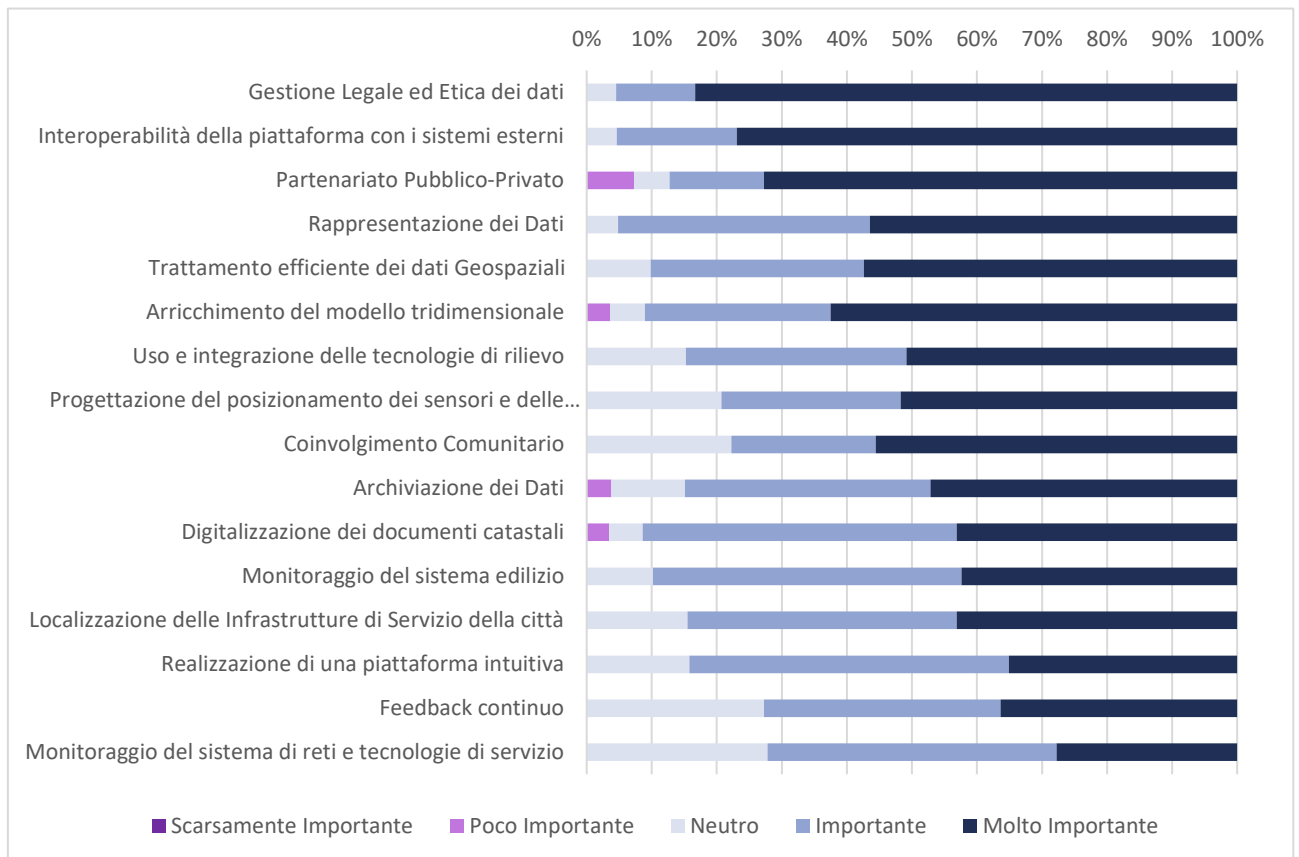


Figura 23 Risultati Sondaggio

I dati raccolti attraverso il sondaggio ci offrono una panoramica in cui emerge chiaramente che il successo di tali progetti non può prescindere da un insieme di elementi chiave, che vanno ben oltre le considerazioni tecniche.

Uno dei principali punti emersi dal sondaggio è l'importanza attribuita alla realizzazione di una piattaforma intuitiva. I partecipanti al sondaggio hanno sottolineato la necessità di rendere l'accesso ai dati del Digital Twin semplice ed intuitivo, non solo per gli addetti ai lavori ma anche per i cittadini stessi. Questo dimostra la crescente attenzione verso l'inclusione e l'engagement della comunità nel processo di decarbonizzazione.

Un altro aspetto rilevante è l'interoperabilità della piattaforma con i sistemi esterni. Gli esperti hanno enfatizzato quanto sia essenziale che i dati e i dispositivi IoT provenienti da fonti diverse possano integrarsi senza intoppi. Questa interoperabilità è un elemento chiave per garantire l'aggiunta di nuovi servizi e funzionalità al digital twin, un chiaro segnale della necessità di un approccio aperto e flessibile.

La gestione legale ed etica dei dati è emersa come un altro punto di grande importanza. La crescente quantità di dati di diversa natura richiede un'attenzione particolare alla conformità legale e all'etica nell'uso di tali dati. Questo riflette una crescente consapevolezza delle questioni legate alla privacy e alla sicurezza dei dati, con un'enfasi sulla necessità di coinvolgere i cittadini nella gestione delle proprie informazioni.

Oltre agli aspetti tecnici, è emersa una chiara importanza attribuita alla rappresentazione dei dati e alla visualizzazione. La capacità di creare modelli 3D e simulazioni dettagliate è fondamentale per comprendere le sfide delle città e per prendere decisioni basate su dati accurati. Inoltre, la progettazione del posizionamento dei sensori e delle tecnologie di acquisizione dei dati è stata valutata positivamente. Questo dimostra che la raccolta di dati pertinenti ed accurati è cruciale per il successo dei progetti di decarbonizzazione.

Tuttavia, non bisogna trascurare gli aspetti sociali e la partecipazione della comunità. Il coinvolgimento comunitario è stato considerato un approccio chiave per garantire il successo dei progetti. Coinvolgere attivamente i residenti e le organizzazioni locali è essenziale per assicurare che le iniziative soddisfino le effettive esigenze della comunità.

Inoltre, l'importanza del partenariato pubblico-privato è emersa chiaramente. La collaborazione tra enti pubblici e aziende private può accelerare l'attuazione di progetti di digitalizzazione, sottolineando la necessità di una sinergia tra risorse finanziarie, competenze tecniche e capacità di gestione di entrambi i settori.

Infine, il feedback continuo è stato ritenuto importante per adattare i progetti alle esigenze in evoluzione della comunità. Questo sottolinea l'importanza della flessibilità e della capacità di adattamento nei progetti di decarbonizzazione.

CAPITOLO 6: Elaborazione di Policy Briefs

Il presente capitolo mira a formulare policy briefs con l'obiettivo di esplorare le potenzialità dei gemelli digitali a livello locale, nell'assistere la presa di decisioni informate dai dati. Il contesto in cui le città si trovano è caratterizzato da una evidente pressione nella implementazione di politiche orientate alla sostenibilità, per ottimizzare le performance dei servizi e favorire la crescita delle economie locali, il tutto nel rispetto della sicurezza della popolazione e affrontando una serie di sfide socioeconomiche.

Attraverso le piattaforme di interazione e le interfacce 3D, decisori politici, cittadini e stakeholder possono modellare, simulare ed esplorare l'impatto che possono avere determinate azioni e politiche sulla città e sull'ambiente.

I fattori critici individuati nelle sezioni precedenti potrebbero fornire gli strumenti necessari ai decisori pubblici per prevedere gli impatti delle politiche da attuare, ovvero facilitare i processi di consultazione attraverso immagini, scenari e statistiche al fine di dimostrare l'efficacia della strategia scelta.

Tra i fattori ritenuti più importanti è emersa la **Gestione Legale ed Etica** della piattaforma. Dal momento che i Digital Twin raccolgono una grande quantità di dati in tempo reale, particolare attenzione deve essere posta sulla privacy e riservatezza delle informazioni captate che possono includere dati personali e sensibili. In una città sempre più digitalizzata, infatti il tema della cybersecurity deve evolversi parallelamente all'inserimento delle nuove tecnologie urbane. Ciò significa che è importante introdurre politiche e governance sulla salvaguardia dei dati,

come l'applicazione del General Data Protection Regulation (GDPR), in vigore dal 25 maggio 2018, che diversamente dal Data Protection Directive⁸³, le misure devono essere rispettate da tutti gli Stati membri europei, includendo le aziende non europee ma attive nel territorio europeo.

Nell'articolo "A Digital Twin-based Privacy Enhancement Mechanism for the Automotive Industry"⁸⁴, Damjanovic-Behrendt individua potenziali violazioni e rischi connessi alle applicazioni e ai servizi del Digital Twin in ambito automobilistico. Dopo una prima

⁸³ DIRETTIVA 95/46/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 24 ottobre 1995 relativa alla tutela delle persone fisiche con riguardo al trattamento dei dati personali, nonché alla libera circolazione di tali dati <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:31995L0046>

⁸⁴ V. Damjanovic-Behrendt, "A Digital Twin-based Privacy Enhancement Mechanism for the Automotive Industry," 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS), Funchal, Portugal, 2018, pp. 272-279, doi: 10.1109/IS.2018.8710526.

analisi e identificazione degli stakeholder, delineando la loro esposizione e vulnerabilità ai rischi relativi alla privacy, si individuano le risorse che producono e consumano dati sensibili sulla privacy all'interno delle auto intelligenti. Il risultato finale del lavoro è l'elaborazione di una metodologia di attuazione in 5 fasi, dei meccanismi di conformità GDPR per i Digital Twin:

Fase 1: Identificazione e Raccolta dei Dati

In questa fase, si individuano le persone e le risorse coinvolte nel mondo delle auto intelligenti, compresi servizi esterni e basi di conoscenza. Successivamente, vengono raccolti dati da diverse fonti, organizzati e preparati per l'analisi utilizzando vari metodi. Si identificano anche metriche sulla privacy, associandole ai diversi tipi di dati sensibili.

Fase 2: Rilevamento delle Vulnerabilità

Nella fase 2 si utilizzano algoritmi di intelligenza artificiale per individuare eventuali anomalie nei dati, come ad esempio quelle provenienti dai sensori delle auto intelligenti. Si analizzano le colonne di dati alla ricerca di valori unici che potrebbero rappresentare vulnerabilità. Si esamina inoltre l'interazione con servizi esterni per identificare possibili rischi per la privacy.

Fase 3: Conformità al GDPR

Questa fase si occupa della de-identificazione dei dati personali, sostituendo le informazioni sulla privacy con valori fittizi. L'obiettivo è garantire che tutto sia in linea con i requisiti del GDPR, compresi i diritti degli individui. Si implementano metodi basati sull'analisi comportamentale, guidati dalle normative sulla privacy.

Fase 4: Interpretazione dei Dati

Qui, si agisce in base ai risultati ottenuti, ad esempio inviando richieste di consenso informato agli interessati. Si analizzano e interpretano i dati risultanti dalla fase precedente, prendendo azioni coerenti con le esigenze di sicurezza e privacy.

Fase 5: Anonimizzazione dei Dati

In questa fase finale, si utilizzano approcci sintattici per anonimizzare i dati. L'obiettivo è ridurre i rischi per la privacy proteggendo i soggetti coinvolti da possibili violazioni, attraverso l'eliminazione di dettagli che potrebbero identificarli.

Complessivamente, queste fasi sono finalizzate allo sviluppo di un dimostratore Digital Twin, simulando varie situazioni nel contesto delle auto intelligenti. In questo esempio l'obiettivo è migliorare la privacy, rispettare le normative e proteggere i dati da potenziali vulnerabilità e rischi associati in questo caso nel mondo delle auto connesse. Processi regolari di convalida e verifica sono necessari per individuare e affrontare eventuali anomalie o discrepanze. L'implementazione di tecniche robuste di crittografia, controlli di accesso e anonimizzazione dei dati contribuisce a salvaguardare la privacy e la riservatezza dei dati dei Digital Twin.

I rischi legati alla catena di fornitura devono essere affrontati attraverso valutazioni approfondite dei fornitori e l'inclusione di clausole di cybersecurity nei contratti.

Le minacce interne rappresentano un rischio significativo, quindi è cruciale gestire l'accesso non autorizzato da parte di insider malintenzionati.

La consapevolezza e la formazione sulla sicurezza informatica sono fondamentali per prevenire errori involontari e vulnerabilità. Programmi di formazione completi per i vari attori nell'ecosistema dei Gemelli Digitali promuovono una cultura di consapevolezza sulla sicurezza informatica.

1. Gestione Legale ed Etica: Priorità e Governance

La raccolta di dati in tempo reale richiede una particolare attenzione alla privacy e alla sicurezza delle informazioni. I decisori pubblici devono sviluppare politiche e governance robuste, seguendo standard come il GDPR, per garantire la protezione dei dati sensibili. La collaborazione con esperti legali ed etici è fondamentale per l'elaborazione di linee guida adatte alla specifica realtà locale.

2. Sicurezza Informatica e Catena di Fornitura

La cybersecurity deve evolversi parallelamente all'introduzione dei Digital Twin. Valutazioni approfondite dei fornitori e l'inclusione di clausole di cybersecurity nei contratti sono essenziali per affrontare i rischi legati alla catena di fornitura. La gestione dell'accesso non autorizzato e la consapevolezza sulla sicurezza informatica devono essere centrali nelle politiche urbane.

Tuttavia, se da un lato è essenziale prevenire e proteggere le informazioni dagli attacchi informatici, è importante riconoscere che la base del funzionamento del Digital Twin sono proprio i dati.

L'accesso ai consumi energetici annuali, flussi di mobilità, inquinamento acustico e atmosferico, ecc... a livello locale e nazionale è fondamentale per l'analisi predittiva e l'elaborazione di scenari. Questi dati costituiscono lo strumento che rende efficace la tecnologia del Digital Twin in ambito politico.

La natura e la provenienza eterogenea dei dati focalizzano l'attenzione su un altro punto molto importante emerso dal sondaggio, ovvero **l'interoperabilità della piattaforma con i sistemi esterni.**

L'interfacciarsi con il problema della capacità di elaborazione al nodo per le reti dei sensori (Edge Computing), in modo da distribuire e immagazzinare principalmente informazioni elaborate e non dati "grezzi" e meno utilizzabili (riduzione costi di trasmissione e storage, maggiore velocità nelle azioni di analisi e decisione al centro), la resa dei dati disponibili provenienti da App, Sensori e droni distribuiti all'interno della città nonché la connessione fra gli stessi, sono criticità che ostacolano i casi d'uso della tecnologia. La mancanza di standardizzazione dei dati risulta infatti una sfida ancora aperta e un punto che si ricollega alla cybersecurity in quanto mette in difficoltà la protezione della sicurezza dei dati e la protezione della privacy personale. Il progetto DUET sta adottando standard aperti e collaborando con i Meccanismi di Interoperabilità Minimi dell'OASC⁸⁵. Questo assicura che i dati possano essere integrati in modo trasparente e che il Digital Twin di DUET possa essere impiegato nelle varie città. Dal sondaggio emerge come questo fattore sia ritenuto molto importante, ma risulta tuttavia un punto ancora aperto ma con uno sviluppo in crescita.

3. Standardizzazione dei Dati e Interoperabilità

La mancanza di standardizzazione dei dati è una sfida aperta. I decisori pubblici dovrebbero promuovere l'adozione di standard aperti e collaborare con iniziative come gli "Meccanismi di Interoperabilità Minimi" per garantire l'integrazione trasparente dei dati provenienti da diverse fonti. Questo è fondamentale per il successo e l'efficacia dei Digital Twin a livello locale.

⁸⁵ OASC (Open and Agile Smart Cities) è un'organizzazione che promuove l'adozione di standard aperti e pratiche agili nelle città intelligenti (smart cities). L'obiettivo principale di OASC è favorire l'interoperabilità e la collaborazione tra le città, consentendo loro di condividere dati e soluzioni in modo più efficace. L'organizzazione sviluppa Minimal Interoperability Mechanisms (Meccanismi di Interoperabilità Minimi) per consentire lo scambio di dati tra le città in modo standardizzato e aperto.

Per comprendere accuratamente e completamente la città gemella digitale, per mettere in pratica il potenziale di sviluppo, è urgente integrare esperti e team provenienti da molteplici specializzazioni, come enti pubblici, gestione urbana, economisti, tecnici e manutentori e le aziende private. Questi esperti devono lavorare su questioni scientifiche e teoriche ed esplorare congiuntamente i modelli di interazione virtuale-reale gemella. Pertanto, **il coinvolgimento comunitario** per la decarbonizzazione è rilevante dal punto di vista educativo, ma risulta meno determinante nel conseguire il risultato desiderato. Ciò perché assume maggiore importanza l'implicazione delle grandi aziende, le quali detengono una responsabilità decisamente più significativa per i danni ambientali.

4. Coinvolgimento delle Grandi Aziende e Interdisciplinarietà

Il coinvolgimento delle grandi aziende è cruciale, considerando la loro responsabilità significativa nei danni ambientali. È essenziale promuovere la collaborazione tra enti pubblici, esperti in gestione urbana, economisti, tecnici, e aziende private. L'interdisciplinarietà è necessaria per affrontare le sfide scientifiche e teoriche, esplorando modelli di interazione virtuale-reale gemella.

Sebbene il coinvolgimento della comunità possa svolgere una funzione educativa di rilievo, i suoi effetti si manifestano su periodi più lunghi, mentre i problemi attuali richiedono soluzioni tempestive.

Il focus principale della condivisione dei dati dovrebbe essere sulla disponibilità di tali informazioni per i tecnici del settore. Questi ultimi sono in grado di condurre un'analisi autonoma e, sperabilmente, più accurata rispetto a un cittadino comune, anche se supportato da eventuali previsioni di un'intelligenza artificiale. La condivisione di dati è da considerare significativa soprattutto per promuovere la trasparenza, più che come uno strumento effettivamente in mano al cittadino.

5. Coinvolgimento Comunitario e Condivisione dei Dati

Il coinvolgimento comunitario, sebbene importante per motivi educativi, può avere effetti a lungo termine, mentre le sfide attuali richiedono soluzioni tempestive. La condivisione dei dati dovrebbe concentrarsi sulla fornitura di informazioni per i tecnici del settore, garantendo un'analisi autonoma e precisa.

CAPITOLO 7: Conclusioni

Il percorso di ricerca intrapreso per lo studio dell'applicazione dei Digital Twin per la decarbonizzazione delle città si è rivelato un viaggio di scoperta e approfondimento attraverso cinque fasi chiaramente definite. Attraverso l'analisi della letteratura e delle politiche europee per le Mission Cities, sono state gettate le basi teoriche necessarie, ottenendo una comprensione approfondita dei concetti chiave e delle sfide legate all'utilizzo dei Digital Twin nelle città.

Il successivo sviluppo di un quadro di analisi, seguito dalla selezione di un campione di città Mission, ha permesso di valutare l'applicabilità e il potenziale successo di questa tecnologia in contesti urbani diversificati. Applicando questo quadro alle città campione, identificando i fattori chiave di successo, si è ottenuta una visione completa delle sfide e delle opportunità, considerando aspetti tecnici, organizzativi, economici e sociali.

La fase di verifica dell'applicabilità dei fattori identificati attraverso il Metodo Delphi ha contribuito a fornire chiarezza sulla replicabilità di tali fattori nelle diverse realtà urbane, determinando se necessitino di adattamenti specifici. Infine, la definizione di policy briefs basate sui risultati ottenuti rappresenta un contributo di orientamento per coloro che intendono implementare Digital Twin nelle città Mission, in quanto forniscono indicazioni pratiche per una pianificazione urbana più sostenibile. La ricerca condotta offre uno sguardo approfondito sull'applicazione dei digital twin per la decarbonizzazione urbana, ma è cruciale riflettere sulle sfide emerse durante l'analisi, poiché queste possono influenzare l'efficacia della tecnologia nei contesti reali.

Filtraggio dei dati

L'elaborazione di enormi quantità di dati costituisce un problema per le piattaforme che li supportano. Tutti i dati grezzi devono essere filtrati per quantità e qualità ai fini di rendere più fruibili le piattaforme e garantire l'attendibilità delle analisi predittive.

Acquisizione dei dati

Fondamentale è la necessità di superare le lacune presenti nell'acquisizione dei dati a livello locale, regionale e nazionale che risultino aggiornati il più possibile e attraverso un accesso controllato per gli addetti ai lavori.

Standardizzazione

Protocolli e normative che possano dare una standardizzazione dei dati IN e OUT data la complessità della progettazione e implementazione del Digital Twin.

Autosostentamento del progetto

L'aspetto economico è cruciale per la realizzazione di un progetto a lungo termine e garantire la sua efficacia.

Gli investimenti iniziali possono provenire da fondi pubblici e sovvenzioni, mentre i flussi di reddito successivi possono derivare da partnership con il settore privato, che potrebbe trarre beneficio dalla riduzione delle emissioni di carbonio.

La tesi ha enfatizzato l'importanza della qualità dei dati nella rappresentazione urbana, evidenziando che la mancanza di dati non compromette necessariamente i modelli. Quando disponibili, la loro descrizione accurata diventa fondamentale.

La città digitale mostra una crescente sovrapposizione con la realtà urbana, ed è stata esplorata nei modelli di città che accentuano la riduzione della distanza tra la rappresentazione digitale e la realtà fisica, spingendo verso l'ideale di una copia esatta.

La tesi si focalizza sull'esame dei modelli digitali urbani come strumenti chiave per comprendere lo spazio urbano e prendere decisioni operative. Inoltre, riconosce la natura schematica ed evolutiva di questa conoscenza, fondamentale per interpretare e adattare la complessità urbana. Affronta la sfida delle definizioni contestuali e flessibili in un contesto di crescita urbana, sottolineando l'aumento della disponibilità di dati con l'avanzamento tecnologico e la necessità di gestirli consapevolmente.

La complessità intrinseca delle città, con la loro diversità strutturale, infrastrutturale e sociale, rappresenta una sfida notevole. I Digital Twin potrebbero incontrare difficoltà nel catturare appieno questa diversità, mettendo a rischio la precisione delle simulazioni e delle previsioni.

In conclusione, nonostante il notevole potenziale dei Digital Twin per la decarbonizzazione urbana, è essenziale affrontare e superare queste sfide per garantirne il successo. Le ricerche future dovrebbero concentrarsi su soluzioni innovative e approcci integrati, promuovendo una transizione sostenibile verso città a

basse emissioni di carbonio. L'aumento della consapevolezza ambientale può tradursi in un maggiore sostegno pubblico e interesse da parte di investitori orientati verso progetti sostenibili.

Bibliografia

Riferimenti Bibliografici

1. Yeon, H., Eom, T., Jang, K., Yeo, J., DTUMOS, digital twin for large-scale urban mobility operating system, 2023, 13(1), 5154
2. Lohman, W., Cornelissen, H., Borst, J., ...Araghi, Y., Walraven, E., Building digital twins of cities using the Inter Model Broker framework, *Future Generation Computer Systems*, 2023, 148, pp. 501–513
3. Yossef Ravid, B., Aharon-Gutman, M., The Social Digital Twin: The Social Turn in the Field of Smart Cities, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2023, 50(6), pp. 1455–1470
4. Alberti, F., Alessandrini, A., Bubboloni, D., ...Nesi, P., Paliotto, A., MOBILE MAPPING TO SUPPORT AN INTEGRATED TRANSPORT-TERRITORY MODELLING APPROACH, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2023, 48(1/W1-2023), pp. 1–7
5. Avezbaev, S., Avezbaev, O., Tashpulatov, S., Sharipov, S., Implementation of GIS-based Smart Community Information System and concepts of Digital Twin in the field of urban planning in Uzbekistan, *E3S Web of Conferences*, 2023, 386, 05006
6. Nica, E., Popescu, G.H., Poliak, M., Kliestik, T., Sabie, O.-M., Digital Twin Simulation Tools, *Spatial Cognition Algorithms, and Multi-Sensor Fusion Technology in Sustainable Urban Governance Networks*, *Mathematics*, 2023, 11(9), 1981
7. Xu, H., Berres, A., Yoginath, S.B., Jones, W., Sanyal, J., Smart Mobility in the Cloud: Enabling Real-Time Situational Awareness and Cyber-Physical Control Through a Digital Twin for Traffic, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(3), pp. 3145–3156
8. Quek, H.Y., Sielker, F., Akroyd, J., ...Mosbach, S., Kraft, M., The conundrum in smart city governance: Interoperability and compatibility in an ever-growing ecosystem of digital twins, *Data and Policy*, 2023, 5, e6
9. Campo, G.D., Piovano, L., Oostrom, F.P.L., ...Zissis, G., Santamaria, A., Digital Twins for Street Lighting: Challenges for a Virtual Reality solution based on Internet-of-Things Devices and Photometry Rendering, *IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference and Expo, LS18 2023*, 2023
10. Testasecca, T., Lazzaro, M., Sirchia, A., Towards Digital Twins of buildings and smart energy networks: Current and future trends, 2023 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment, *MetroLivEnv 2023 - Proceedings*, 2023, pp. 96–101
11. Barresi, A., Urban Digital Twin and urban planning for sustainable cities, *Urban Digital Twin e pianificazione urbana per la città sostenibile*, *TECHNE*, 2023, (25), pp. 78–83
12. Hao, H., Wang, Y., Smart Curb Digital Twin: Inventorying Curb Environments Using Computer Vision and Street Imagery, *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2023, 7, pp. 168–172.
13. Michalik, D., Kohl, P., Kummert, A., Smart cities and innovations: Addressing user acceptance with virtual reality and Digital Twin City, *IET Smart Cities*, 2022, 4(4), pp. 292–307
14. Huang, W., Zhang, Y., Zeng, W., Development and application of digital twin technology for integrated regional energy systems in smart cities, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2022, 36, 100781
15. Ferré-Bigorra, J., Casals, M., Gangoles, M., The adoption of urban digital twins, *Cities*, 2022, 131, 103905
16. Fan, Z., Yang, X., Yuan, W., ...Song, X., Shibasaki, R., Online trajectory prediction for metropolitan scale mobility digital twin, *GIS: Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, 2022, 103
17. Diakite, A.A., Ng, L., Barton, J., ...Barr, S., Zlatanova, S., Liveable City Digital Twin: A Pilot Project for the City of Liverpool (NSW, AUSTRALIA), *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, 10(4/W2-2022), pp. 45–52
18. Alva, P., Biljecki, F., Stouffs, R., USE CASES FOR DISTRICT-SCALE URBAN DIGITAL TWINS, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2022, 48(4/W4-2022), pp. 5–12
19. Knezevic, M., Donaubauer, A., Moshrefzadeh, M., Kolbe, T.H., MANAGING URBAN DIGITAL TWINS WITH AN EXTENDED CATALOG SERVICE, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, 10(4/W3-2022), pp. 119–126
20. Corrado, C.R., DeLong, S.M., Holt, E.G., Hua, E.Y., Tolk, A., Combining Green Metrics and Digital Twins for Sustainability Planning and Governance of Smart Buildings and Cities, *Sustainability (Switzerland)*, 2022, 14(20), 12988
21. Xia, H., Liu, Z., Efremochkina, M., Liu, X., Lin, C., Study on city digital twin technologies for sustainable smart city design: A review and bibliometric analysis of geographic information system and building information modeling integration, *Sustainable Cities and Society*, 2022, 84, 104009
22. Charitonidou, M., Urban scale digital twins in data-driven society: Challenging digital universalism in urban planning decision-making, *International Journal of Architectural Computing*, 2022, 20(2), pp. 238–253
23. Caprari, G., Castelli, G., Montuori, M., Camardelli, M., Malvezzi, R., Digital Twin for Urban Planning in the Green Deal Era: A State of the Art and Future Perspectives, *Sustainability (Switzerland)*, 2022, 14(10), 6263
24. Salem, T., Dragomir, M., Options for and Challenges of Employing Digital Twins in Construction Management, *Applied Sciences (Switzerland)*, 2022, 12(6), 2928

25. Lee, A., Lee, K.-W., Kim, K.-H., Shin, S.-W., A Geospatial Platform to Manage Large-Scale Individual Mobility for an Urban Digital Twin Platform, *Remote Sensing*, 2022, 14(3), 723
26. Allam, Z., Bibri, S.E., Jones, D.S., Chabaud, D., Moreno, C., Unpacking the '15-Minute City' via 6G, IoT, and Digital Twins: Towards a New Narrative for Increasing Urban Efficiency, Resilience, and Sustainability, *Sensors*, 2022, 22(4), 1369
27. Pan, X., Mohammadi, N., Taylor, J.E., Smart City Digital Twins for Public Safety: A Deep Learning and Simulation Based Method for Dynamic Sensing and Decision-Making, *Proceedings - Winter Simulation Conference*, 2022, 2022-December, pp. 808–818
28. Yue, A., Mao, C., Zhao, S., Smart Governance of Urban Ecological Environment Driven by Digital Twin Technology: A Case Study on the Ecological Restoration and Management in S island of Chongqing, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 1101(7), 072003
29. Sánchez-Vaquero, J.A., Getting Real: The Challenge of Building and Validating a Large-Scale Digital Twin of Barcelona's Traffic with Empirical Data, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(1), 24
30. Raes, L., Michiels, P., Adolphi, T., ...McAleer, S., Kogut, P., DUET: A Framework for Building Interoperable and Trusted Digital Twins of Smart Cities, *IEEE Internet Computing*, 2022, 26(3), pp. 43–50
31. Hämäläinen, M., Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city, *IET Smart Cities*, 2021, 3(4), pp. 201–210
32. D'hauwers, R., Walravens, N., Ballon, P., FROM AN INSIDE-IN towards AN OUTSIDE-OUT URBAN DIGITAL TWIN: BUSINESS MODELS and IMPLEMENTATION CHALLENGES, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2021, 8(4/W1-2021), pp. 25–32
33. Deng, T., Zhang, K., Shen, Z.-J.M., A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities, *Journal of Management Science and Engineering*, 2021, 6(2), pp. 125–134
34. White, G., Zink, A., Codecá, L., Clarke, S., A digital twin smart city for citizen feedback, *Cities*, 2021
35. Yang, S., Kim, H., Urban digital twin applications as a virtual platform of smart city, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2021, 12(4), pp. 363–379
36. Ivanov, S., Nikolskaya, K., Radchenko, G., Sokolinsky, L., Zymbler, M., Digital twin of city: Concept overview, *Proceedings - 2020 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2020*, 2020, pp. 178–186, 9267879
37. Beil, C., Ruhdorfer, R., Coduro, T., Kolbe, T.H., Detailed Streetspace Modelling for Multiple Applications: Discussions on the Proposed CityGML 3.0 Transportation Model, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(10), 603
38. Dembski, F., Wössner, U., Letzgus, M., Ruddat, M., Yamu, C., Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of Herrenberg, germany, *Sustainability (Switzerland)*, 2020, 12(6), 2307

Bibliografia generale

1. European Commission, Joint Research Center (JRC), "Future of the Cities – Opportunities, Challenges and the way forward" report, April 2019
2. Carlon, O. (2022). Net zero (emissioni). IPCC - Focal Point Italia. <https://ipccitalia.cmcc.it/net-zero-emissioni>
3. Università Bocconi, Linee guida per l'implementazione di un percorso di agenda urbana e territoriale orientata agli SDG – Progetto: Linee guida nazionali per l'Agenda Urbana, settembre 2022
4. https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2023-01/AGENDA_URBANA_MIMS.pdf
5. International Energy Agency IEA, World Energy Outlook 2022 Report, November 2022
6. European Commission, Proposed Mission: 100 Climate-neutral Cities by 2030 – by and for the Citizens, Report of the Mission Board for climate-neutral and smart cities, Independent Expert Report, Brussels, Settembre 2020
7. Vito Albino, Umberto Berardi & Rosa Maria Dangelico (2015) Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives, *Journal of Urban Technology*, 22:1, 3-21, DOI: 10.1080/10630732.2014.942092
8. ABB - Ambrosetti, Smart Cities in Italia: un'opportunità nello spirito del Rinascimento per una nuova qualità della vita, 2012
9. Giffinger, Rudolf & Fertner, Christian & Kramar, Hans & Kalasek, Robert & Milanović, Nataša & Meijers, Evert. (2007). Smart cities - Ranking of European medium-sized cities.
10. Nam T., Pardo T., Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. Proceedings of the 12th Annual International Digital Government Research Conference, 2011, p.282-291
11. N. Komninos, "Smart Cities and Connected Intelligence, Platforms, Ecosystem and Network Effect," Routledge 2020
12. M. Grieves, J. Vickers, Origins of the digital twin concept, *Florida Institute of Technology* 8, 3-20
13. Kaur, M., Mishra, V. P., & Maheshwari, P. (2019). The Convergence of Digital Twin, IoT, and Machine Learning: Transforming Data into Action. In *Internet of things* (pp. 3–17).
14. M. Attaran, S. Gokhan Celik, Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities, November 2022
15. Volonté, C. (2022, January 19). Digital Twin: l'uso che ne fa Leonardo, big manifatturiero - *Industria Italiana*. *Industria Italiana*
16. C. Pylaniadis, S. Osinga, I. N. Athanasiadis, Introducing digital twins to agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 184, 2021
17. T. Machl, A. Donabubauer, T. H. Kolbe, Planning Agricultural Core Road Networks Based on a Digital Twin of the Cultivated Landscape, Technical University of Munich, Chair of Geoinformatics
18. Deren, L., Wenbo, Y. & Zhenfeng, Smart city basata sui gemelli digitali. *Comput.Urban Sci.* 1, 4 (2021)
19. Present. (2023, February 8). Digital twin smart city: come portare vera innovazione e sostenibilità nelle città
20. J. Ferré-Bigorra, M. Casals, M. Gangoellets, The adoption of urban digital twins, *Cities*, Volume 131, Group of Construction Research and Innovation (GRIC), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain December 2022
21. Dulaimi, A., Hamida, R., Naser, M. e Mawed, M., SOLUZIONE DIGITAL TWIN IMPLEMENTATA SULL'HUB ENERGETICO PER FAVORIRE LA SMART ENERGY CITY SOSTENIBILE, CASO DI STUDIO DEL SUSTAINABLE SMART ENERGY HUB, ISPRS, 2022.
22. Y. Peng, M. Zhang, F. Yu, J. Xu, Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration, *Shanghai Construction* No. 4 (Group) Limited Company, Shanghai, November 2020
23. Zaffagnini, Theo & Pracucci, Alessandro & Talamonti, Nicola. (2021). Digital Twin per la gestione efficiente del costruito in tempo reale. Il progetto sostenibile, tra Human Centered Design, iper-convergenza di simulazioni e connettività IoT. In the *Scientific Review L'Ufficio Tecnico*, Maggioli Editore, S. Arcangelo di Romagna, Italy in the *Technological Column "EFFICIENZA ENERGETICA, TECNOLOGIE SOSTENIBILI E INNOVAZIONE"*, 6 - 15.
24. E. Freedom, Artificial Intelligence
25. Stefano NATIVI, Blagoj DELIPETREV, and Max CRAGLIA, JRC Technical Report, Destination Earth, Survey on "Digital Twins" technologies and activities, in the Green Deal area, 2020
26. European Commission, 100 Climate- Neutral Cities by 2030- by and for the Citizens, Interim report of the Mission Board for Climate- Neutral and Smart Cities, Directorate-General for Research, and Innovation, giugno 2020
27. eu-missions-KI0122329ENN.pdf (netzerocities.eu)
28. Shahat, E.; Hyun, C.T.; Yeom, C. City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. *Sustainability* 2021, 13, 3386.
29. MIT (Ministero delle Infrastrutture e del Trasporto), *Metodi e Strumenti per un'agenda urbana dello sviluppo sostenibile, Tecnologie della Città del Futuro*, Capitolo 4
30. Qualita PA - tecnica Delphi. <http://qualitapa.gov.it/sitoarcheologico/relazioni-con-i-cittadini/utilizzare-gli-strumenti/tecnica-delphi/>
31. the-city-in-a-changing-world-2023.pdf (hel.fi)
32. citiesoftomorrow.eu/sites/default/files/documents/Athens-Resilience-Strategy-English.pdf
33. bt2022_cas-detude_grece_athenes_eng.pdf (climate-chance.org)
34. Un "API model Digital Twin" (o Digital Twin basato su API) fa riferimento a un tipo di Digital Twin che è progettato per essere accessibile e interagire attraverso un'interfaccia di programmazione delle applicazioni (API). Un Digital Twin è una rappresentazione virtuale di un oggetto fisico, di un sistema o di un processo del mondo reale. Questa rappresentazione virtuale può essere utilizzata per scopi di monitoraggio, analisi, simulazione e controllo.
35. 725ca8_10bdb0ac12fe42279a7b677afc9ef450.pdf (digitalurbantwins.com)
36. L'Atlante Energetico e Climatico di Helsinki costituisce uno strumento basato su modelli di dati che già comprende una vasta gamma di informazioni legate all'energia. Queste informazioni sono liberamente accessibili a vari attori, tra cui

- proprietari di immobili, urbanisti e aziende specializzate in servizi di efficienza energetica. L'obiettivo è ulteriormente espandere l'Atlante per sostenere l'ottimizzazione dell'efficienza energetica degli edifici, promuovere l'utilizzo di fonti rinnovabili e, in prospettiva, affrontare i cambiamenti climatici attraverso un'interfaccia visuale e informativa
37. M. Papagna, Helsinki città aperta: il futuro open data e low carbon della capitale finlandese, Forbes, gennaio 2021
 38. Documento relativo alla protezione delle persone fisiche con riguardo al trattamento dei dati personali, nonché alla libera circolazione di tali dati. Il presente testo comprende la rettifica pubblicata nella GU del 23 maggio 2018 EUR-Lex - 02016R0679-20160504 - EN - EUR-Lex (europa.eu)
 39. <http://qualitapa.gov.it/sitoarcheologico/relazioni-con-i-cittadini/utilizzare-gli-strumenti/tecnica-delphi/>
 40. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522005866>
 41. Grimble, R., & Wellard, K. (1997). Stakeholder methodologies in natural resource management: a review of principles, contexts, experiences, and opportunities. *Agricultural Systems*, 55(2), 173–193. [https://doi.org/10.1016/s0308-521x\(97\)00006-1](https://doi.org/10.1016/s0308-521x(97)00006-1)
 42. Ackermann, F. and Eden, C. 2011. Strategic Management of Stakeholders: Theory and Practice. *Long Range Planning*. 44 (3): pp. 179-196

Sitografia

1. <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20180301STO98928/emissioni-di-gas-serra-per-paese-e-settore-infografica>
2. <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1KuerR3oXo1spkHb1upQLo3brgrVd08Y1/edit#gid=559896346>
3. The Smart City in 6 dimensions. (2021, July 1). https://www.smart-city.uliege.be/cms/c_6946640/en/the-smart-city-in-6-dimensions
4. Cos'è una Smart City? (cbinsights.com)
5. Cosa sono le Smart City, come funzionano. Esempi e tecnologie abilitanti (bnova.it)
6. Crisantemi, M. (2023). Digital Twin: che cos'è, come funziona e quali sono i vantaggi del gemello digitale. *Innovation Post*. <https://www.innovationpost.it/tecnologie/digital-twin-che-cose-come-funziona-e-quali-sono-i-vantaggi-del-gemello-digitale/>
7. A. Haleem, M. Javaid, Exploring the revolution in healthcare systems through the applications of digital twin technology, *Biomedical Technology*, volume 4, December 2023, Pp 28-381 https://www.ansa.it/ansa2030/notizie/asvis/2023/06/09/obiettivo-decarbonizzazione-a-che-punto-sono-le-grandi-citta-italiane_11b0a2e0-0bfc-4e00-9ce5-dd318767f730.html
8. rapporto_mobilitaria_2023.pdf (kyotoclub.org)
9. 2021.05.05 | Dell Technologies and i2b2 tranSMART Foundation Create “Digital Twins” to Treat Long-Haul COVID-19. (n.d.).
10. Leveraging the Power of Collective Data and AI-driven Research for Individual Impact (delltechnologies.com)
11. Redazione. (2022). Urban Intelligence, l'uso dei digital twin per l'innovazione e la sostenibilità urbana. *Geosmart Magazine*. <https://www.geosmartmagazine.it/2022/09/30/urban-intelligence-digital-twin-per-innovazione-e-sostenibilita/>
12. Dipartimento di Ingegneria, ICT e Tecnologie per l'Energia e i Trasporti. (2018, December 18). Urban Intelligence - Dipartimento di Ingegneria, ICT e Tecnologie per l'Energia e i Trasporti. Dipartimento Di Ingegneria, ICT E Tecnologie per l'Energia E I Trasporti. <http://www.diitet.cnr.it/urban-intelligence/>
13. Dyton, J. (2022, April 5). How the NFL's Largest Stadium Is Being Managed Using a Digital Twin. Propmodo. <https://propmodo.com/how-the-nfls-largest-stadium-is-being-managed-using-a-digital-twin/>
14. Utilizing Digital Twin Technology to Optimize City Traffic - The Data Science Institute at Columbia University. (2022, November 10). The Data Science Institute at Columbia University. <https://datascience.columbia.edu/news/2021/utilizing-digital-twin-technology-to-optimize-city-traffic/>
15. Le soluzioni BIM di Bentley adottate nel progetto del nuovo Ponte di Genova. (2020, October 26). *Ingenio*. <https://www.ingenio-web.it/articoli/progettare-un-infrastruttura-in-poco-tempo-grazie-al-digital-twin-il-caso-del-nuovo-ponte-di-genova/>
16. Walters, A. (n.d.). Staffordshire Bridges - Long Term Performance Monitoring using Fibre-Optic Sensors. Centre for Digital Built Britain Completed Its Five-year Mission and Closed Its Doors at the End of September 2022. <https://www.cdcb.cam.ac.uk/research/digital-built-environment/staffordshire-bridges-long-term-performance-monitoring-usin>
17. How Digital twin and analytics Improve operations, Minimize costs. (n.d.). Jacobs. <https://www.jacobs.com/newsroom/news/how-digital-twin-and-analytics-improve-operations-minimize-costs>
18. <https://cordis.europa.eu/project/id/870697>
19. <https://www.digitalurbantwins.com/digitaltwins>
20. Il duet Local Digital Twin, intitolato Best Enabling Technology at World Smart City Awards | Plasmare il futuro digitale dell'Europa
21. <https://www.leadproject.eu/>
22. Digital Twin Technology & GIS | What Is a Digital Twin? <https://www.esri.com/en-us/digital-twin/overview>

23. Carbon Neutral Helsinki Action Plan (helsinginilmastoteot.fi)
24. Obiettivi climatici e monitoraggio – Carbon neutral Helsinki - Helsingin Ilmasto (helsinginilmastoteot.fi)
25. Greece Climate Resilience Policy Indicator – Analysis - IEA. (n.d.). IEA. <https://www.iea.org/articles/greece-climate-resilience-policy-indicator>
26. Forum Virium Helsinki. (2023, May 4). DVECE: residents to provide feedback on mobility through the Helsinki 3D model - Forum Virium Helsinki. <https://forumvirium.fi/en/projects/dvece/>
27. TC8.6 - Snap4City Living Lab Life Cycle | Snap4City

Appendici

APPENDICE A1: Stakeholders Casi Studio

Helsinki

City of Helsinki (Comune di Helsinki): Il Comune di Helsinki è l'ente governativo responsabile della gestione e dell'amministrazione della città di Helsinki. Si occupa di servizi pubblici, pianificazione urbana, infrastrutture e altre attività legate all'amministrazione comunale.

HRI (Helsinki Region Infoshare): HRI è un'iniziativa che promuove la condivisione di dati e informazioni nella regione di Helsinki. Si occupa di facilitare l'accesso ai dati e di promuovere la trasparenza e l'innovazione attraverso la condivisione delle risorse digitali.

STARA (Helsinki City Construction Service): STARA è responsabile della costruzione e della manutenzione delle infrastrutture della città di Helsinki, tra cui strade, parchi, edifici pubblici e altro ancora.

HSL (Helsinki Region Transport): HSL è l'ente responsabile dei trasporti pubblici nella regione di Helsinki. Si occupa della pianificazione, dell'organizzazione e dell'erogazione dei servizi di trasporto pubblico, tra cui autobus, tram, metropolitana e traghetti.

Fintraffic - Digitraffic: Fintraffic è un'azienda che gestisce l'infrastruttura dei trasporti in Finlandia, compresi i sistemi di traffico e di trasporto digitale. Digitraffic è il servizio di dati aperti che fornisce informazioni sul traffico e sul trasporto in tempo reale.

HSY (Helsinki Region Environmental Services): HSY è l'ente responsabile dei servizi ambientali nella regione di Helsinki. Si occupa di gestire i rifiuti, le acque reflue, la pulizia delle strade e altre attività legate all'ambiente.

FMI (Finnish Meteorological Institute): Il FMI è l'istituto meteorologico finlandese responsabile della previsione del tempo e del monitoraggio delle condizioni meteorologiche in Finlandia.

NLS (National Land Survey): NLS è l'ente responsabile del rilevamento topografico e della registrazione delle proprietà fondiarie in Finlandia. Si occupa della cartografia e della registrazione dei terreni.

Tabella 6 Identificazione degli Stakeholder del Digital Twin di Helsinki

	PPP	SETTORI	UTENTI
City of Helsinki	Pubblico	amministrazione	Sindaco e Cittadini
HRI (Helsinki Region Infoshare)	Pubblico	amministrazione	Data Analyst
STARA (Helsinki City Construction Service)	Pubblico	Edilizia	Tecnici, operatori e Manutentori
HSL (Helsinki Region Transport)	Pubblico	Mobilità	Pianificatori Trasporti
Fintraffic - Digitraffic	Pubblico	Mobilità e Innovazione Digitale	Sviluppatori Digitali e Gestori Stradali
HSY (Helsinki Region Environmental Service)	Pubblico	Ambiente	Ricercatori ambientali, autorità locali e regionali
FMI (Finnish Meteorological Institute)	Pubblico	Ambiente	Meteorologi
NLS (National Land Survey)	Pubblico	Pianificazione Urbana	Urbanisti

Atene

Municipality of Athens (Comune di Atene): Il Comune di Atene è l'ente governativo responsabile della gestione e dell'amministrazione della città di Atene. Si occupa di servizi pubblici, pianificazione urbana, infrastrutture e altre attività legate all'amministrazione comunale.

City of Athens - Municipal Police (Polizia Municipale di Atene): La Polizia Municipale di Atene è responsabile dell'applicazione delle leggi locali e della sicurezza pubblica nella città. Si occupa di questioni di sicurezza, vigilanza del traffico e applicazione delle normative comunali.

City of Athens - Department of Resilience and Sustainability (Dipartimento di Resilienza e Sostenibilità di Atene): Questo dipartimento si concentra sulla promozione della resilienza e della sostenibilità all'interno della città di Atene. Può essere coinvolto in progetti e iniziative volti a rendere la città più resiliente ai cambiamenti climatici e più sostenibile dal punto di vista ambientale.

City of Athens - Urban Planning Agency (Agenzia di Pianificazione Urbana di Atene): Questa agenzia si occupa della pianificazione urbana, della regolamentazione del territorio e dell'approvazione dei progetti edilizi nella città di Atene. Contribuisce a definire il futuro sviluppo urbano della città.

Athens Digital Lab: Athens Digital Lab è un'organizzazione che promuove l'innovazione digitale e tecnologica nella città di Atene. Si occupa di sviluppare soluzioni digitali e tecnologiche per migliorare la vita urbana.

Bike Associations, Shared Vehicles Associations (Associazioni per le Biciclette, Associazioni per i Veicoli Condivisi): Queste associazioni possono essere coinvolte nella promozione del trasporto sostenibile, come l'uso delle biciclette e dei veicoli condivisi, nonché nella difesa degli interessi dei ciclisti e degli utenti di veicoli condivisi.

Public Transport Means Associations (Associazioni per i Mezzi di Trasporto Pubblico): Queste associazioni possono rappresentare gli operatori dei mezzi di trasporto pubblico, come autobus, tram e metropolitana, e lavorare per migliorare i servizi di trasporto pubblico nella città.

OASA, STASY, Athens Metro: OASA (Organizzazione dei Trasporti Pubblici di Atene e Pireo), STASY (Società di Trasporti Atene-Pireo) e Athens Metro sono operatori di trasporto pubblico che gestiscono i servizi di autobus, tram e metropolitana nella città di Atene.

Tabella 7 Identificazione degli Stakeholder del Digital Twin di Atene

	PPP	SETTORI	UTENTI
Municipality of Athens	Pubblico	amministrazione	Sindaco, Funzionari Pubblici e Cittadini
City of Athens - Municipal Police	Pubblico	Sicurezza e Gestione Emergenze	Polizia, gestori sicurezza urbana
City of Athens - Department of Resilience and Sustainability	Pubblico	Gestione emergenze	Funzionari pubblici
City of Athens - Urban Planning Agency	Pubblico	Pianificazione Urbana	Urbanisti, imprenditori
Athens Digital Lab	Privato	Innovazione Digitale	Imprenditori, sviluppatori startup
Bike Associations, Shared vehicles associations	Privato	Mobilità	Attivisti e cittadini
Public Transport Means Associations	Privato	Mobilità e Trasporto	Attivisti e cittadini
(OASA, STASY, Athens Metro)	Privato	Mobilità e Trasporto	Pianificatore Trasporti
Citizens groups (Atenistas etc)	Altro	Altro	Attivisti e cittadini

Firenze

Comune di Firenze (Municipality of Florence): Il Comune di Firenze è l'ente governativo responsabile della gestione e dell'amministrazione della città di Firenze. Si occupa di servizi pubblici, pianificazione urbana, infrastrutture e altre attività legate all'amministrazione comunale.

Università degli Studi di Firenze (University of Florence): L'Università degli Studi di Firenze è un istituto di istruzione superiore che offre una vasta gamma di programmi accademici e svolge attività di ricerca in vari campi, compreso l'Ingegneria dell'Informazione.

DINFO (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione): Il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione è una componente dell'Università di Firenze e si concentra sulla ricerca e l'insegnamento nel campo dell'Ingegneria dell'Informazione, comprese le tecnologie digitali.

DISIT (Distributed System and Internet Technologies Lab): DISIT è un laboratorio di ricerca presso l'Università di Firenze che si specializza in sistemi distribuiti e tecnologie Internet. Potrebbe essere coinvolto in progetti di ricerca avanzata e sviluppo tecnologico.

Sii-Mobility (Supporto all'interoperabilità integrata per i servizi ai cittadini e alla pubblica amministrazione) è un progetto dello Smart City Nazionale in area Trasporti e mobilità terrestre.

È un progetto strategico smart city nazionale, cofinanziato dal MIUR (Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca) sviluppato in modo congiunto e coordinato da centri di ricerca (DISIT Lab di UNIFI), industrie e con il supporto della pubblica amministrazione per la sperimentazione sul campo.

Trafair: Il progetto Trafair riunisce dieci partner di due paesi europei (Italia e Spagna) per sviluppare servizi innovativi e sostenibili che combinano qualità dell'aria, condizioni meteorologiche e dati sui flussi di traffico per produrre nuove informazioni a beneficio dei cittadini e dei decisori.

MOSAIC: Progetto fondato dal Dipartimento DISIT dell'Università di Firenze. L'obiettivo di MOSAiC è sviluppare nuove soluzioni di Mobilità 4.0 per operatori di mobilità (concessionari, aziende di trasporto pubblico, ecc.). Questi servizi sono correlati alla gestione dinamica e in tempo reale del flusso di traffico veicolare e adotteranno i concetti più innovativi in termini di trasporto: Mobilità come Servizio (MaaS), Trasporto Attivo e Gestione della Domanda (ATDM), Sistemi di Trasporto Intelligenti Cooperativi (C-ITS), Strade Intelligenti, Veicoli Connessi e Autonomi. Inoltre, MOSAiC adotterà il modello dell'Industria 4.0 (raccolta e analisi dei dati, creazione di modelli digitali, assistenza decisionale, implementazione) per la gestione della mobilità urbana

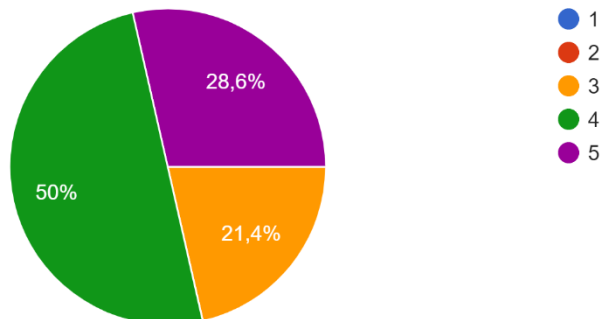
Tabella 8 Identificazione degli Stakeholder del Digital Twin di Firenze

	PPP	SETTORI	UTENTI
Comune di Firenze	Pubblico	amministrazione	Sindaco, Funzionari Pubblici e Cittadini
Università degli Studi di Firenze	Pubblico	Ricerca	Docenti, ricercatori, studenti
DINFO (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione)	Pubblico	Ricerca	Docenti, ricercatori, studenti
DISIT (Distributed System and Internet Technologies Lab)	Pubblico	Ricerca	Docenti, ricercatori, studenti
Start Up	Privato	Altro	Sviluppatori Digitali, imprenditori
Associazioni cittadine	Altro	Altro	Attivisti e cittadini
Sii-Mobility	Privato	Mobilità	Operatori e sviluppatori soluzioni mobilità, Urbanisti
TRAFAIR	Privato	Ambiente e Trasporto	Ricercatori Ambientali, Urbanisti
MOSAIC	Privato	Mobilità e Trasporto	Urbanisti, Pianificatori Traffico

APPENDICE A2: Risposte Sondaggio

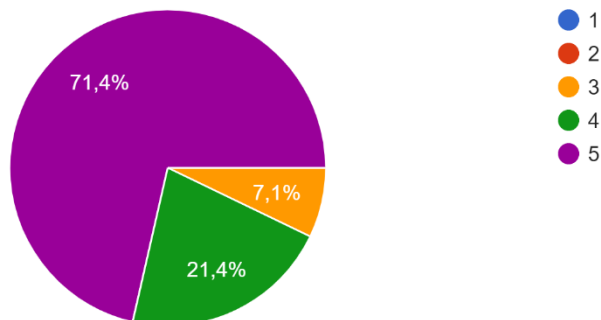
Realizzazione di una piattaforma intuitiva: La progettazione di una piattaforma semplice ed intuitiva, che implementi modelli di User Experience...tramite la partecipazione attiva della cittadinanza.

14 risposte



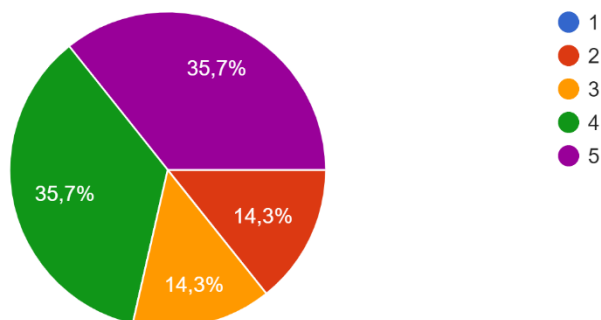
Interoperabilità della piattaforma con i sistemi esterni: L'interoperabilità con sistemi, dati e dispositivi IoT eterogenei, è essenziale per un sist...io ambientale, monitoraggio delle emissioni etc etc)

14 risposte

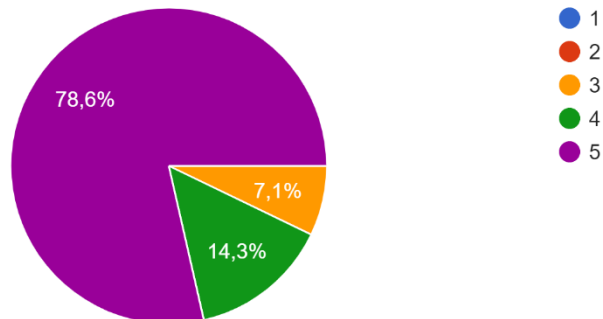


Archiviazione dei Dati: I dati hanno un ruolo centrale nel digital twin per smart city, pertanto è necessario progettare strutture dati in grado di cont...e e domestico - in un sistema intelligente e sicuro.

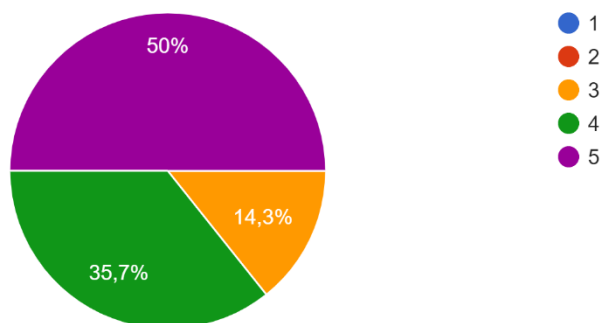
14 risposte



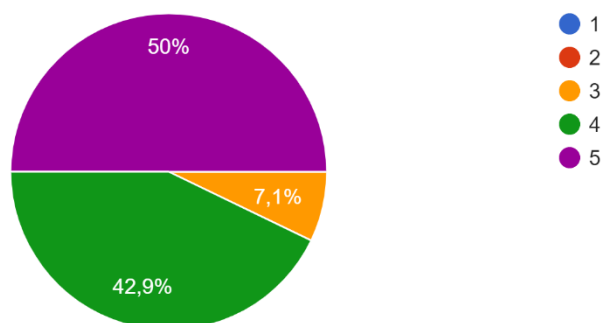
Gestione Legale ed Etica dei dati: La grande quantità di dati e di informazioni di diversa natura devono essere gestite dal punto di vista legale ed economico controllo sulle informazioni che li riguardano.
14 risposte



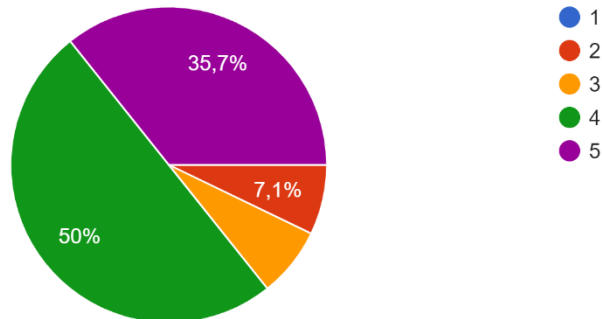
Trattamento efficiente dei dati Geospaziali: Il trattamento efficiente dei dati geospaziali è cruciale per garantire che il Digital Twin rifletta accuratamente una rappresentazione precisa del contesto urbano.
14 risposte



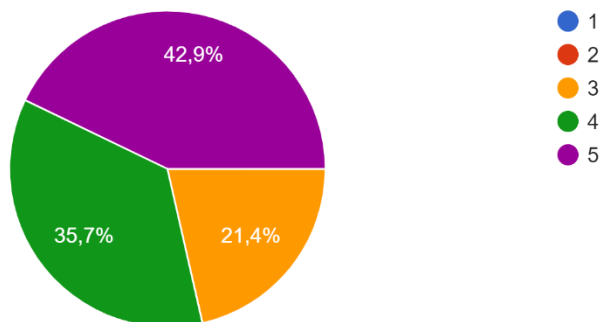
Rappresentazione dei Dati: A partire dal Modello 3D alla simulazione e creazione degli scenari "What-if", la visualizzazione dei dati aumenta il livello di supporto alle decisioni degli enti amministrativi.
14 risposte



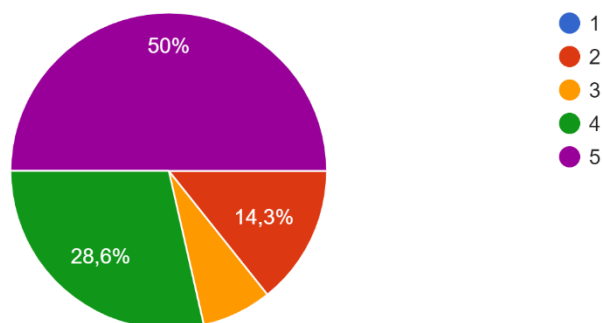
Digitalizzazione dei documenti catastali: La digitalizzazione dei documenti catastali è fondamentale per integrare i dati di proprietà e utili...anificazione e la gestione sostenibile del territorio.
14 risposte



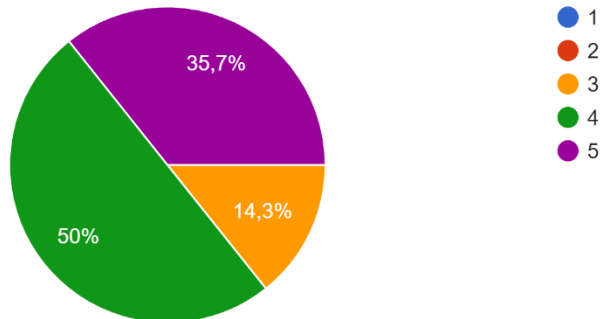
Uso e integrazione delle tecnologie di rilievo (Droni, Laser scanner, Nuvola di punti...): Consentono di acquisire dati dettagliati sulle co...eometricamente i dettagli del sistema del costruito.
14 risposte



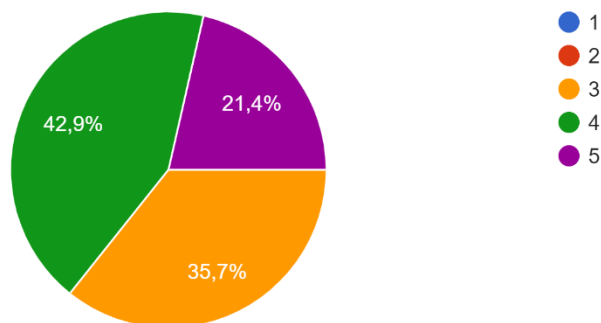
Arricchimento del modello tridimensionale: Per migliorare la rappresentazione del territorio, è importante arricchire il modello tridimensionale de...ecarbonizzazione o implementare azioni predittive.
14 risposte



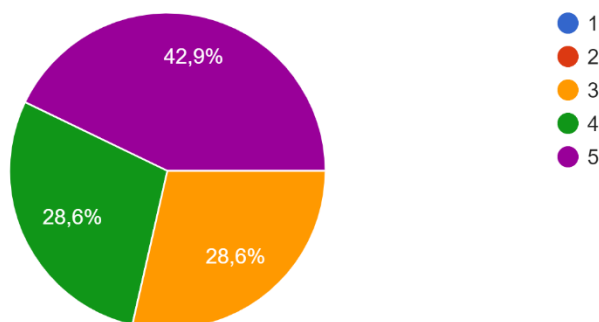
Monitoraggio del sistema edilizio: Il monitoraggio delle reti e delle tecnologie di servizio, come reti elettriche, idriche e di trasporto, è fondamentale per l'acquisizione accurata e completa dei dati della città
14 risposte



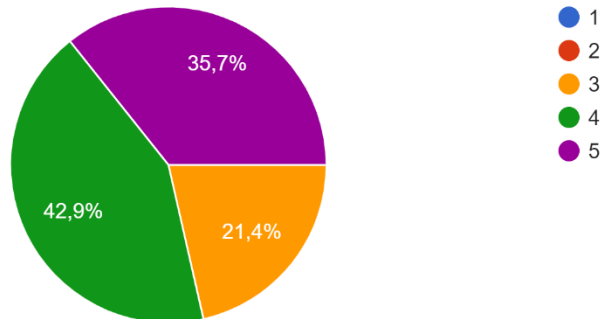
Monitoraggio del sistema di reti e tecnologie di servizio: Il monitoraggio delle reti e delle tecnologie di servizio, come reti elettriche, idriche ...quisizione accurata e completa dei dati della città.
14 risposte



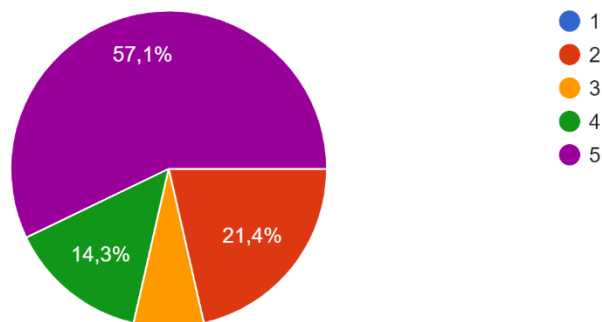
Progettazione del posizionamento dei sensori e delle tecnologie di Acquisizione dei Dati: Oltre alla raccolta dei dati da fonti esterne, l'integrazione con una copertura completa e un monitoraggio efficace.
14 risposte



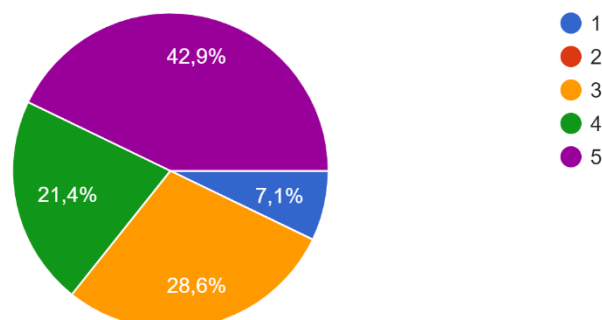
Localizzazione delle Infrastrutture di Servizio della città: Questo processo si concentra sulla mappatura e la gestione delle infrastrutture essenziali... facilitare l'adozione di soluzioni più ecologiche.
14 risposte



Partenariato Pubblico-Privato: La sinergia tra enti pubblici e aziende private permette di combinare risorse finanziarie, competenze tecniche e capacità d...rare l'attuazione dei progetti di digitalizzazione.
14 risposte



Coinvolgimento Comunitario: Il coinvolgimento comunitario rappresenta un approccio chiave per garantire il successo dei progetti di decarbonizzaz... base dati o forniscono puntualmente dei feedback.
14 risposte



Feedback continuo: La creazione di canali di comunicazione aperti e la raccolta regolare di opinioni e feedback da parte dei cittadini e delle par...te alla piattaforma e alla visualizzazione dei dati.

14 risposte

