

ARTICLE INFO

Received	18 March 2024
Revised	10 April 2024
Accepted	20 April 2024
Published	30 June 2024

GEMELLO DIGITALE URBANO E MODELLAZIONE ENERGETICA

Esperienze e analisi di casi d'uso

URBAN DIGITAL TWIN AND ENERGY MODELING

Experiences and case study analyses

Danila Longo, Beatrice Turillazzi, Rossella Roversi, Stefano Lilla,
Carlo Alberto Nucci, Alessandro Piccinini, Andrea Costa

ABSTRACT

La transizione verso città sostenibili e digitali è una sfida complessa, con implicazioni cruciali per il benessere dei cittadini. In questo contesto il concetto di Gemello Digitale (GD) urbano emerge come una risorsa innovativa, seppure le metodologie di applicazione e le tecnologie siano ancora in fase iniziale. L'articolo pertanto esplora l'uso del GD urbano nell'ambito della transizione energetica, focalizzandosi sull'esperienza di Bologna, una città italiana impegnata nella neutralità climatica entro il 2030. La sperimentazione in casi studio specifici dimostra come il GD consenta l'analisi dei dati e la simulazione di scenari trasformativi per ottimizzare l'efficienza energetica e promuovere la decarbonizzazione, contribuendo alle sfide legate alla raccolta e integrazione dei dati, agevolando il superamento dei problemi di privacy e abilitando una governance multi-stakeholder.

The transition towards sustainable and digital cities is a complex challenge with crucial implications for citizen well-being. In this context, the concept of an Urban Digital Twin (UDT) emerges as an innovative resource, although the methodologies and technologies applied are still at an initial stage. This article explores the use of the UDT in the context of energy transition, focusing on the experience of Bologna, an Italian city committed to climate neutrality by 2030. Experimentation in specific case studies demonstrates how the UDT enables data analysis and scenario simulation to optimise energy efficiency and promote decarbonisation, facilitates data collection and integration, overcomes privacy issues, and enables multi-stakeholder governance.

KEYWORDS

gemello urbano digitale, transizione energetica, modellazione energetica, neutralità climatica, decarbonizzazione

urban digital twin, energy transition, energy modeling, climate neutrality, decarbonisation

Danila Longo, Architect and PhD, is a Full Professor of Technology for Architecture at the Department of Architecture, University of Bologna (Italy). E-mail: danila.longo@unibo.it

Beatrice Turillazzi, Architect and PhD, is an Associate Professor of Technology for Architecture at the University of Bologna (Italy). E-mail: beatrice.turillazzi@unibo.it

Rossella Roversi, Architect and PhD, is an Adjunct Lecturer and Research Fellow at the Department of Architecture, University of Bologna (Italy). E-mail: rossella.roversi@unibo.it

Stefano Lilla, Electrical Engineer and PhD, is a Researcher at the University of Bologna (Italy). E-mail: stefano.lilla3@unibo.it

Carlo Alberto Nucci, Electrical Engineer, is a Full Professor of Electrical Systems for Energy at the University of Bologna (Italy). E-mail: carloalberto.nucci@unibo.it

Andrea Costa, Construction Engineer and PhD, is a Certified Energy Manager. E-mail: andrea.costa@r2msolution.com

Alessandro Piccinini is an EPS PhD Candidate with a scholarship co-funded by R2M Solution SpA (Italy). E-mail: alessandro.piccinini@r2msolution.com



La doppia sfida della transizione energetica e digitale, per sua natura affidata alle città, non può esprimere tutto il suo potenziale senza mettere in gioco la sostenibilità di processi, progetti, soluzioni e azioni che essa implica, necessari a generare i benefici attesi per l'ecosistema urbano e per chi lo abita. In questo contesto il Gemello Digitale (GD) alla scala urbana si sta affermando come strumento chiave per affrontare la complessità implicita in tale sfida (Al-Sehrawy, Kumar and Watson, 2021; Ketzler et alii, 2020). Tuttavia, nonostante i GD urbani siano al centro del dibattito e della ricerca scientifica recente che ne evidenziano le potenzialità e i rapidi sviluppi, le tecnologie e il livello di maturità sono ancora allo stadio iniziale (Shahat, Hyun and Yeom, 2021; Attaran and Celik, 2023) e quindi è cruciale il ruolo che può svolgere la sperimentazione di metodologie e tecnologie innovative, l'applicazione sul campo e la condivisione di buone pratiche.

Molte città europee, come Helsinki (Hämäläinen, 2021), Zurigo, Amsterdam e Dublino (Caprari et alii, 2022) inquadrano lo sviluppo del proprio GD urbano mettendolo al centro delle politiche di transizione energetica, di rigenerazione urbana e ambientale e dei processi di democratizzazione e inclusione sociale. Lo sviluppo dei progetti più innovativi e recenti sui GD urbani si configura come un laboratorio in cui confluiscono soluzioni, infrastrutture e competenze interdisciplinari (Deren, Wenbo and Zhenfeng, 2021).

Nel contesto della transizione energetica il sistema elettrico, attraverso la trasformazione in smart-grid al servizio delle smart-city, ricopre un'importanza crescente, generando una spinta trasformativa che investirà la città in tutti i suoi aspetti, sia che essa si manifesti nella dimensione fisica della rete elettrica e dell'ambiente costruito, sia che si manifesti in quella immateriale degli attori del sistema, inclusi i cittadini (Gantoler et alii, 2024). Tale spinta consentirà di affrontare questioni cruciali e necessarie, come l'incremento dell'efficienza energetica dei quartieri, la produzione in loco di energia rinnovabile, la creazione di comunità energetiche e l'elettrificazione della mobilità, tutti elementi che mettono alla prova il sistema multidimensionale di gestione dell'energia e per i quali l'impiego di un GD consentirebbe un livello di conoscenza dei fenomeni che generano e della loro evoluzione senza precedenti.

La visione strategica che accompagna la creazione di un GD a scala urbana e la necessità al contempo di essere operativi e funzionali a bisogni e sfide che emergono e mutano rapidamente, portano molte città a testare l'innovazione di processo in casi d'uso concreti. Tra questi, quello dell'energia emerge come prioritario ma complesso per le problematiche in gioco come la raccolta dei dati da fonti eterogenee, l'interoperabilità e la possibilità del loro riutilizzo e, soprattutto, i temi di accesso, etica e privacy dell'uso stesso dei dati, tutti fattori che, pur in presenza della disponibilità potenziale delle informazioni necessarie ad alimentare il gemello energetico, ne limitano l'uso o vanno attentamente regolati (Ramaswami et alii, 2023).

Tra le città italiane che hanno intrapreso il percorso di sviluppo di un proprio GD c'è anche Bologna, selezionata dalla Missione dell'Unione Europea 100 Climate-neutral and Smart Cities by 2030¹ (Cities Mission) tra quelle che dovranno raggiungere l'obiettivo della neutralità climatica entro

il 2030. Bologna necessita quindi di soluzioni di decarbonizzazione particolarmente rapide ed efficaci, per le quali il supporto di una infrastruttura tecnologica come il GD, in grado di fornire modelli, previsioni e simulazioni, può giocare un ruolo centrale, consentendo ai decisori urbani di prevedere e attivare misure e politiche guidate dai dati. Bologna, inoltre, è una delle città italiane nelle quali i progetti H2020 GRETA² (GA 01022317) e +CityX-Change³ (GA 824260) hanno sperimentato un framework metodologico di modellazione energetica, abilitato da un prototipo semplificato ma incrementale di GD, che consente di generare analisi e simulazioni focalizzate sul tema energetico, ma calibrate sugli obiettivi più ampi della decarbonizzazione.

Il principale aspetto originale della ricerca descritta dal presente contributo è lo sviluppo e l'applicazione a casi studio reali di una metodologia che porta al conseguimento della stima energetica di edifici e distretti urbani, basandosi su una modellazione resa possibile anche in mancanza di progetti sviluppati con tecnologie BIM e senza utilizzare banche dati che forniscano informazioni dettagliate. Queste potrebbero infatti non essere disponibili per ragioni di conformità a normative o problemi di privacy, come ad esempio avviene per il Sistema Accreditamento Certificazione Energetica (SACE) dell'Emilia Romagna.

Pertanto l'obiettivo del paper è illustrare lo studio applicativo del suddetto framework di modellazione energetica, applicato a due aree della Città di Bologna, dimostrando l'utilità dell'uso pionieristico della tecnologia GD per la transizione energetica. L'applicazione specifica di software ha permesso la creazione di una sorta di GD semplificato e tematico delle aree urbane (dal singolo edificio al quartiere) che integra diversi tipi di dati per una modellazione energetica urbana completa in grado di supportare l'elaborazione di strategie di decarbonizzazione dedicate anche ai centri storici, tenendo conto delle loro specificità e vincoli.

Il paper è strutturato come segue: il primo paragrafo traccia il background e lo stato dell'arte del GD, a partire dalla sua applicazione alla smart-grid e alla smart city e infine come ambiente predittivo e simulativo; il secondo paragrafo mette in evidenza le sfide e le problematiche ancora aperte, cui la metodologia illustrata nel terzo paragrafo contribuisce a far fronte e che viene ivi spiegata tramite la sua applicazione a casi studio concreti; il quarto paragrafo evidenzia le complementarità e le ulteriori potenzialità della metodologia mentre il quinto traccia le conclusioni.

Il Gemello Digitale urbano come evoluzione della smart-city

Il GD per una città si inserisce, come accennato, nel contesto dell'integrazione delle smart-grid nelle smart-city (Deren, Wenbo and Zhenfeng, 2021). Le smart-grid, grazie all'utilizzo di metodi di ottimizzazione matematica tipici dei sistemi energetici, a partire dal sistema elettrico, permettono una distribuzione più efficiente e affidabile dell'energia, in particolare nel contesto di sempre maggiore ricorso alle energie rinnovabili anche nelle aree urbane (Betis, Cassandras and Nucci, 2018). Lo sviluppo delle smart-city richiede un approccio che non può che essere multidisciplinare (Matera et alii, 2018): il GD estende e integra la logica applicata ai sistemi energetici e ai sistemi di gestione e utilizzo dei dati, muovendo

ben oltre la semplice digitalizzazione delle infrastrutture.

Il GD della città offre un quadro olistico e interconnesso di ogni aspetto della vita urbana prevedendo un approccio completamente integrato tra i vari attori della società, trasformando radicalmente la concezione, la pianificazione (Moghadam et alii, 2017) e, di conseguenza, la gestione delle aree urbane: esso permette infatti di modellare l'intero ecosistema urbano a partire dalla rete energetica, includendo i trasporti, le infrastrutture e i servizi pubblici e può essere uno strumento per prevedere i comportamenti dei cittadini (Annaswamy et alii, 2018). Al fulcro di questa trasformazione c'è la convergenza di tecnologie avanzate, come l'Intelligenza Artificiale (Doria, 2022), l'Internet of Things (Hammi et alii, 2018), la Realtà Aumentata (Shawash and Marji, 2020) e la modellazione 3D (Dejaco et alii, 2022).

L'efficienza energetica di parti della città è uno dei principali obiettivi delle smart-city e rappresenta un ambito chiave di applicazione per il GD (Bortolini et alii, 2022). Attraverso la simulazione e l'ottimizzazione dei flussi energetici a livello urbano (anche in tempo reale) è possibile identificare opportunità per ridurre il consumo, migliorare l'integrazione delle fonti rinnovabili e ottimizzare l'uso delle risorse (Zhang et alii, 2019). Un'area cruciale di intervento è l'infrastrutturazione della rete elettrica a servizio delle aree urbane e l'elettrificazione della mobilità (Kirpes et alii, 2019); tuttavia per massimizzare i benefici dell'elettrificazione è necessaria una transizione con un approccio olistico alla pianificazione urbana. Riguardo alla costituzione di comunità energetiche il GD può fornire la risposta alla duplice domanda in quali siti della città (aree convenzionali sottese alle varie cabine primarie) istituire una comunità energetica e da quale aggregato ottimale in termini di generazione elettrica e di carichi dei vari prosumer debba essere composta (Prevedi et alii, 2023; Nguyen-Huu et alii, 2022).

Uno degli aspetti più innovativi dei GD urbani è la loro capacità di anticipare e mitigare problemi attraverso la simulazione e la previsione, offrendo una panoramica completa e dinamica dell'ambiente urbano, consentendo di prendere decisioni più informate e interventi mirati per migliorare l'efficienza energetica (Ali et alii, 2024), di pianificare la costituzione di comunità energetiche rinnovabili nei siti più opportuni, di promuovere la mobilità sostenibile e di garantire la qualità della vita dei cittadini.

Come accennato, in molte città sono in corso sperimentazioni e casi studio. A Zurigo il GD si concentra soprattutto sulla pianificazione urbana, prendendo in esame anche il Piano energetico attraverso l'analisi delle potenzialità del solare e l'analisi delle ombre e dei flussi d'aria (Schrotter and Hürzeler, 2020). Il GD di Helsinki (Hämäläinen, 2021) rappresenta un caso studio avanzato, in cui il modello completo di città 3D è implementato on-line e fornisce per ogni edificio i dati energetici provenienti dai registri cittadini, uno strumento di confronto dei consumi tra edifici della stessa epoca, l'energia solare ricevuta dalle superfici, l'energia proveniente dai pozzi geotermici, la simulazione del consumo energetico e delle emissioni di CO₂ della città intera e la stima di potenziali miglioramenti dell'efficienza energetica considerando riqualificazioni adeguate.

Sono interessanti anche i casi studio di alcuni

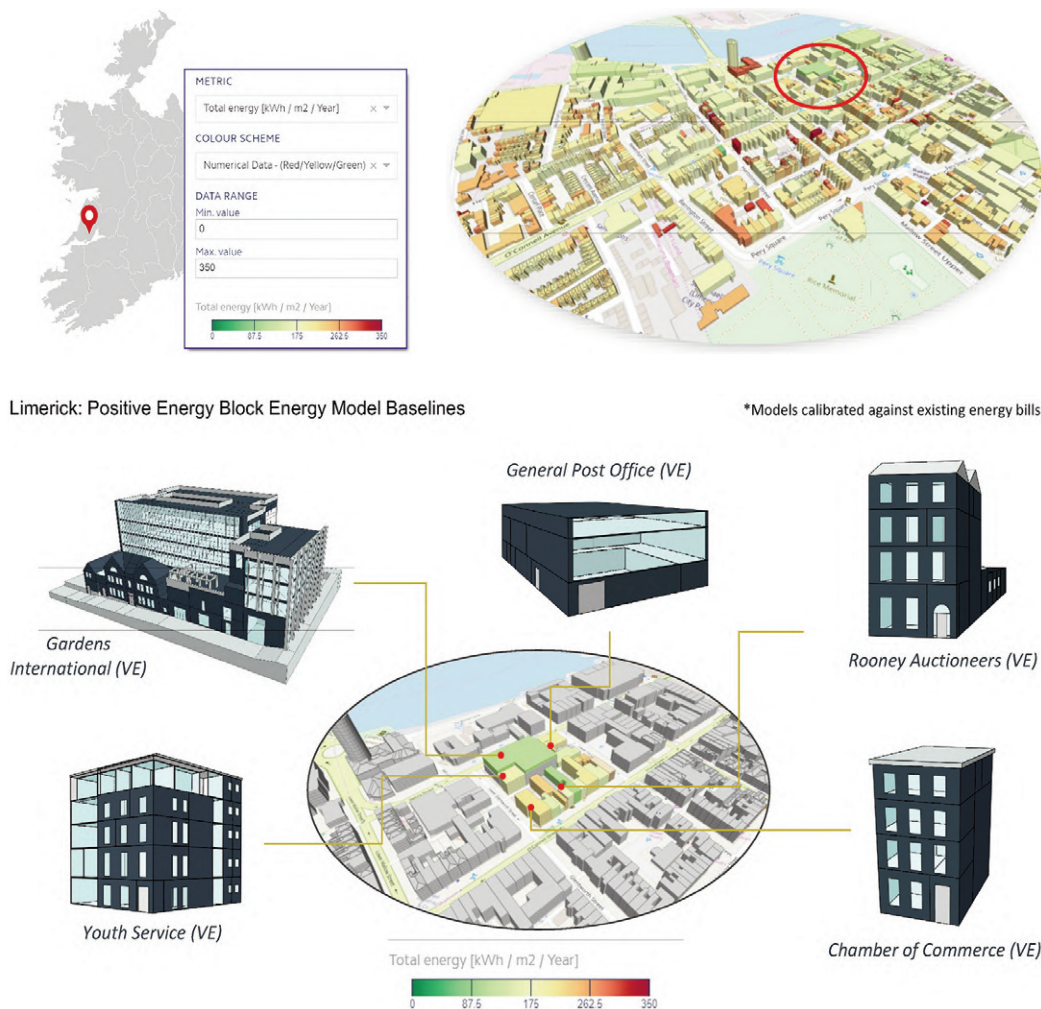


Fig. 1, 2 | Energy demand baseline: application of the Positive Energy Block methodology to Limerick city and the buildings involved in the trial (source: r2msolution.com; +CityxChange project).

Campus universitari, come quelli di West Cambridge (Qiuchen Lu et alii, 2019) e di Dublino, che presentano tuttavia una notevole semplificazione a causa del ridotto numero di edifici e di soggetti coinvolti; anche Torino rappresenta un caso studio pilota ristretto a singoli comparti o distretti della città (Anselmo et alii, 2023) in cui i consumi termici degli edifici sono dedotti dai dati termografici.

Dall'esame dei casi studio sull'uso del GD ai fini dell'indagine e simulazione energetica emerge la centralità del tema della disponibilità dei dati, statici e dinamici, che spesso non sono della quantità, qualità o accessibilità necessarie a poter sviluppare anche un modello approssimato. Molti degli esempi citati sono accomunati dall'utilizzo di piattaforme per la stima delle potenzialità di produzione di energia dal sole e del fabbisogno di energia degli edifici, tramite le quali, con metodi stocastici e con l'utilizzo di machine learning, estendono i dati ricavati da specifici casi studio di limitata estensione, e quindi più facilmente indagabili, al resto dell'ambiente urbano. La metodologia di seguito descritta riveste considerevole interesse perché rappresenta una strada per superare, in maniera flessibile e affinabile, la problematica essenziale della natura e reperibilità dei dati, soprattutto energetici, funzionali a un GD alla scala urbana.

Problematiche e progettualità | La strutturazione della sperimentazione del GD nell'ambito ener-

gia ha solitamente inizio con la raccolta dei dati, assai eterogenei per origine, formato, granularità e dimensione. L'integrazione di tali dati – provenienti ad esempio dal catasto, modelli 3D, consumi di energia elettrica e gas, produzione di energia da fonti rinnovabili e Attestati di Prestazione Energetica degli edifici – richiede metodologie specifiche e presuppone il superamento di una serie di criticità, prima fra tutte la raccolta e il riutilizzo dei dati (molti dei quali di proprietà privata) che sollevano importanti questioni di rispetto della normativa sulla privacy e dell'etica.

Inoltre, una volta incorporato il set di dati iniziali, questi necessitano di essere periodicamente aggiornati e integrati in modelli matematici che forniscano indicatori sintetici sull'evoluzione degli aspetti indagati. Infine la presenza nelle città europee (soprattutto in Italia) di centri storici con edifici tutelati impone alcune limitazioni agli interventi di ammodernamento ed efficientamento, quali l'applicazione di coibentazioni o l'installazione di pannelli fotovoltaici. In questo contesto, qualora venga verificata la sostanziale impossibilità di raggiungere gli obiettivi di efficientamento prefissati, il GD dovrà contribuire a definire interventi compensativi in altre zone della città.

L'obiettivo della metodologia di seguito illustrata conduce alla sperimentazione di tecnologie digitali e processi in grado di analizzare la risposta energetica dell'ambiente urbano, in primis della sua componente costruita, per poi effettuare simu-

lazioni di scenari di trasformazione che consentano di prefigurare interventi di efficientamento e altri più ampi di riqualificazione. La metodologia è estremamente significativa poiché consente di supportare la creazione di GD energetici semplificati, specificatamente calibrati sulle necessità dell'indagine alla scala urbana.

R2M Solution⁴ è stato partner tecnologico del progetto H2020 +CityxChange (parte del programma 'Smart Cities and Communities') nell'ambito del quale ha verificato la scalabilità dell'uso dei software e della metodologia adottati nel caso dello studio dei Positive Energy Blocks (Fig. 1, 2). R2M Solution ha esteso a 5 città italiane, tra cui Bologna, la sperimentazione effettuata in +CityxChange su due città lighthouse, Limerick in Irlanda e Trondheim in Norvegia. Le sperimentazioni nelle 5 città italiane hanno prodotto la progettazione di scenari di decarbonizzazione e gestione dell'energia che dalla scala dell'isolato, o gruppo di edifici, può essere applicata alla scala di distretto, e quindi rappresentare una valida metodologia per quelle città che devono accelerare il loro percorso di transizione energetica per raggiungere gli obiettivi ambiziosi entro il 2030.

Le 100 città selezionate dalla Cities Mission necessitano infatti di strumenti e infrastrutture digitali che abilitino procedure rapide e siano in grado di sfruttare al meglio la quantità di dati già oggi nelle loro disponibilità, senza precludere la possibilità di integrare successivamente ulteriori quantità e tipologie di informazioni, la cui raccolta e gestione può essere via via abilitata, anche grazie all'applicazione di procedure FAIR⁵. Tali procedure, che comportano la collaborazione e lo scambio tra attori pubblici, cittadini e operatori del mercato dell'energia, richiede infatti tempi dilatati, che possono non essere compatibili con le esigenze della tabella di marcia della decarbonizzazione e che possono rallentare lo sviluppo dei GD urbani ad essa funzionali (Apanavičienė and Shahrabani, 2023).

Casi studio: metodologia, analisi dei dati e risultati | Per testare la metodologia sviluppata in +CityxChange sono state selezionate alcune città italiane, diverse per dimensioni, politiche ed esperienze legate ai processi di transizione, e in particolare Bologna, Milano, Roma, Udine e Crispiano in Provincia di Taranto (Fig. 3), coinvolte anche nell'iniziativa complementare Scalable Cities, volta a testarne la replicabilità e ad espandere la scala delle esperienze in altri contesti. Attraverso l'uso di un ecosistema di software facenti capo a IES Intelligent Communities Lifecycle (ICL)⁶ è stato creato un modello energetico dinamico in grado di riflettere le prestazioni del contesto in esame, ma anche di prevedere, con elevato livello di dettaglio, il consumo energetico degli edifici, le emissioni di CO₂, i picchi di domanda energetica, i costi energetici e la produzione di energia rinnovabile.

L'approccio è stato progressivo e ha seguito un percorso incrementale: partendo da interventi mirati alla riduzione del consumo energetico degli edifici attraverso l'implementazione di misure passive sull'involucro si è poi passati all'ottimizzazione degli impianti; infine ci si è concentrati sulla produzione di energia rinnovabile distribuita localmente e sull'implementazione di sistemi di scambio energetico in chiave Comunità Energetica Rinnovabile.

Nel caso di Bologna sono state prese in esame due aree molto diverse per localizzazione, morfologia, tipologia di edifici, abitanti, realtà socio-economiche, funzioni: il distretto Pilastro-Roveri, situato a Nord Est della città, caratterizzato dal villaggio residenziale del Pilastro e dalla zona produttiva Roveri, con forte presenza di attività produttive e artigianali; l'area del Pratello / Sant'Isaia, situata nel Centro storico della città. Il distretto Pilastro-Roveri è stato anche uno dei casi studio del Progetto GECO⁷, finanziato dall'European Institute of Innovation & Technology, orientato ad agevolare il percorso di realizzazione di una comunità energetica, e del progetto H2020 GRETA, che mirava al miglioramento della conoscenza delle condizioni e delle barriere all'emergere di forme di partecipazione attiva dei cittadini all'interno del sistema energetico, a sostegno degli obiettivi di decarbonizzazione locale e globale. Entrambi i gruppi di ricerca del Dipartimento di Architettura e del Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione Guglielmo Marconi dell'Università di Bologna erano anche partner dei due suddetti progetti.

Nell'ambito del progetto GRETA sono stati testati modelli per definire la domanda energetica attuale di quattro casi di studio, tra cui Bologna, sviluppati nell'ambiente di Enerkad GIS⁸. Per generare il modello energetico sono state utilizzate le informazioni del catasto urbano e gli anni di costruzione sono stati stabiliti attraverso stime e per aree omogenee. Il numero e la potenza installata di pannelli fotovoltaici sono stati ricavati dagli Open Data del Comune di Bologna. I risultati della modellazione di GRETA sono stati recepiti e incorporati nel modello energetico realizzato da R2M nella nuova ricerca.

È importante sottolineare che la validità e l'estremo interesse di questa metodologia multiscale di analisi e simulazione risiede nella capacità di fornire risultati di interesse, sufficienti a orientare strategie di retrofitting, efficientamento e decarbonizzazione, anche in assenza di dati e informazioni di dettaglio. Per creare un modello bastano i dati prioritari obbligatori, come la geometria semplificata degli edifici, la loro destinazione d'uso, i dati climatici (Tab. 1). Nel caso di Bologna Pilastro sono stati inclusi i dati con priorità alta e medio-alta; la possibilità di raffinarli in output è comunque garantita dalla opzione di incamerare dati più specifici, a priorità media e medio-bassa, se disponibili.

Il modello geometrico tridimensionale è stato generato tramite il software iCD (uno dei tools di IES ICL), un plug-in di Sketchup, sulla base GIS di OpenStreetMap, database geografico libero e modificabile (Figg. 4, 5). In base all'anno di costruzione, al numero dei piani degli edifici (cui si associano le stratigrafie degli involucri e le tipologie di impianto di condizionamento estivo e invernale), alle caratteristiche formali, al tipo d'uso (residenziale, scolastico, direzionale, etc.) e all'esposizione è stato possibile ricavare il consumo energetico dei singoli edifici e dell'intera area presa in esame (Fig. 6).






Fig. 3 | The five Italian cities involved in the Scalable Cities initiative (source: r2msolution.com; +CityxChange project).

Tab. 1 | Model input data: each coefficient is categorised according to 1) priority, 2) ease of finding the information and 3) the possible origin of the data (credit: the Authors, 2024).

Si è generata quindi la baseline pre-intervento, espressa in kWh/mq per anno, e poi si è proceduto a simulare gli scenari di intervento che possono includere misure passive (come l'incremento della trasmittanza dell'involucro opaco attraverso l'introduzione di un cappotto o la sostituzione degli infissi) e/o attive (come la sostituzione del generatore di calore); è altresì possibile simulare i benefici derivanti dall'introduzione di pannelli fotovoltaici sulle coperture, valutando le opportunità di installazione e rendimento in base all'inclinazione e all'esposizione dei tetti (Figg. 7, 8). Rapidamente vengono così generati scenari di intervento alternativi, consentendo una valutazione

comparativa per determinare quale soluzione sia più idonea a raggiungere gli obiettivi desiderati, tenendo conto anche dei vincoli imposti dalle caratteristiche specifiche del luogo.

Per l'introduzione di cappotti, pannelli fotovoltaici in copertura o altri interventi di efficientamento in contesti in cui siano presenti vincoli storico-artistici è necessario avere una conoscenza più approfondita dei singoli edifici interessati, in modo da escluderli dagli interventi ipotizzati o procedere a una progettazione più puntuale. Nel caso della simulazione di efficientamento dell'involucro prevista nel Centro storico di Bologna, per edifici non vincolati è stato previsto un cappotto interno. Le

Bologna	Milano	Udine	Crispiano	Roma
Area: 140,86 km ² Inhabitants: 388 171	Area: 181,67 km ² Inhabitants: 1 361 908	Area: 57,17 km ² Inhabitants: 97 841	Area: ~ 111 km ² Inhabitants: 13 770	Area: 1 287,36 km ² Inhabitants: 2 746 639
Buildings: 1080 Area: 7 750 218 m ² Inhabitants: ~ 23 000	Buildings: 31 Area: 50 132 m ² Inhabitants: 97 841	Buildings: 10 (2 Schools, 1 Shopping mall, 7 Apartment blocks) Area: 134 400 m ² Inhabitants: ~1000 (405 Apartments)	Buildings: 7 (1 municipal building, 1 library, 2 schools, 2 offices, 1 sport center) Area: ~ 16 000 m ² Occupancy: ~750 people/day	Buildings: 155 Area: ~ 660 696 m ² Inhabitants: ~7610
				
- geoJSON file containing: - Number of floors - Year of construction - Building Type - Installed PV Capacity	iCD model with this information: - Building Type - Year of construction - Envelope description & U _{value} - HVAC & DHW system	- Building's plans and sections - Technical reports of the interventions - Buildings' Energy Performance Certificates	Building plans, survey reports, and energy requalification projects holding: - Building geometry - Envelope description - Building type, Construction year	- GIS file containing: - Building Type - Number of floors - Roof Type - Potential roof area for PV

Main Parameters DT	Parameter Priority	Availability	Data Source
Type of Building	1 - Mandatory	High	GIS, Google Earth
Type of Generation	1 - Mandatory	Medium	GIS, Diagnosis Database
Simplified Geometry	1 - Mandatory	High	GIS, OSM
Climate File	1 - Mandatory	High	GIS, Google Earth
Glazed Surface Ratio	2 - High	Medium / High	GIS, Google Earth
Opaque Envelope Transmittances	3 - Medium / High	Medium	GIS, APE, Database Diagnosis
Glazed Envelope Transmittances	3 - Medium / High	Medium	GIS, APE, Database Diagnosis
Emission Type	3 - Medium / High	Medium	GIS, Database Diagnosis
Plant Operating Hours	4 - Medium	Medium / Low	GIS, Database Diagnosis
Roof Type	4 - Medium	High	GIS, Google Earth
Heating Setpoint	4 - Medium	Medium	GIS, Database Diagnosis
Lighting Load	4 - Medium	Medium	GIS, Ashrae 90.1 database and diagnosis
Load Power	5 - Medium	Low	GIS, Ashrae 90.1 database and diagnosis
DHW Plant Type	5 - Average	Medium	GIS, Database Diagnosis
DHW Distribution Efficiency	5 - Medium / Low	Low	GIS, Database Diagnosis
Ventilation Type	5 - Medium / Low	Low	GIS, Database Diagnosis
Air infiltration	5 - Medium / Low	Low	GIS, Database Diagnosis
Occupancy	5 - Medium / Low	Low	GIS, Ashrae Database 90.1 and Diagnosis
Internal Load Profiles	5 - Medium / Low	Low	GIS, Database Ashrae 90.1 and Diagnosis

simulazioni energetiche riguardanti lo stato attuale e gli scenari di intervento con soluzioni attive e passive rivelano un notevole potenziale di miglioramento dell'efficienza energetica e di mitigazione delle emissioni di gas serra (Figg. 9, 10).

Ai fini di esplicitare i vari passaggi e favorire la replicabilità della metodologia proposta si veda il diagramma di flusso in Figura 11, che esplicita in maniera sintetica il processo di creazione del GD.

Soluzioni complementari e ulteriori potenzialità | Le sperimentazioni nelle aree Pilastrò / Roveri e nel Centro storico di Bologna hanno generato un modello tematico, semplificato ma dettagliabile a seconda della disponibilità dei dati in ingresso,

applicabile al singolo edificio, a un quartiere e potenzialmente espandibile all'intera città. Ciò dimostra come un GD urbano possa supportare esperti, tecnici e decisori nella pianificazione, valutazione e gestione delle prestazioni della città, o di una sua porzione, avvalendosi di modelli di analisi e simulazione a livelli incrementali di approfondimento e complessità, in base allo stato di sviluppo dell'infrastruttura stessa del GD e della disponibilità di dati che lo alimentano.

La ricerca presentata intende compiere ulteriori passi avanti, interpretando i GD come infrastrutture a supporto della multidisciplinarietà e trasversalità degli ambiti coinvolti nei processi di decarbonizzazione delle città: molti GD europei, tra

cui quello di Bologna, intendono non solo essere strumenti abilitanti per politiche urbane basate sui dati, ma anche piattaforme che mettono in connessione vari attori urbani (Ketzler et alii, 2020).

Per affrontare questa sfida la metodologia illustrata ha implementato con successo la condivisione dei risultati di analisi e simulazioni attraverso una versione pilota di database centrale, estendibile a scala cittadina. Attraverso il software iCIM⁹, è stata creata una piattaforma di monitoraggio e gestione delle risorse accessibile e condivisa. Questa piattaforma consente di visualizzare le metriche di sostenibilità in maniera chiara e comprensibile, anche ai non addetti ai lavori, e di coinvolgere gli attori nel confronto tra scenari alternativi (Fig. 12); inoltre offre la possibilità di gestire parzialmente i dati attraverso filtri, interrogazioni e strumenti di analisi delle tendenze, consentendo di ottenere insights utili per prendere decisioni informate.

Un altro sviluppo molto promettente della metodologia è la possibilità di fornire supporto alla creazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili e valutare diversi scenari mediante uno studio strategico che, attraverso la modellazione dinamica degli edifici, la simulazione delle reti di teleriscaldamento, teleraffrescamento e smart grid elettrica, consente di valutare l'eventuale potenziamento dello stoccaggio energetico, l'impatto della generazione locale e del miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici sulle reti elettriche.

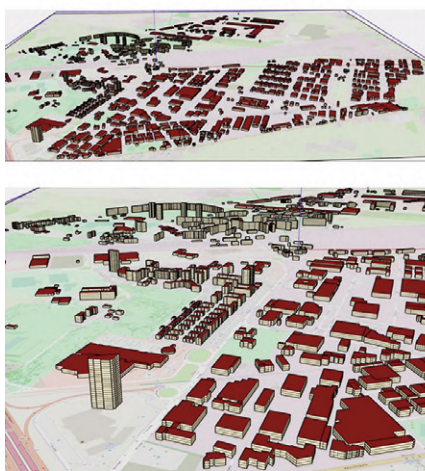
L'esito ultimo del complesso delle simulazioni fin qui descritte è la possibilità di prefigurare una 'decarbonization roadmap', che aiuti le città a programmare l'attuazione delle misure previste in base agli obiettivi prefissati, da scandire secondo intervalli temporali pianificabili, tenendo anche conto della presenza o meno di incentivi economici e valutando anche i piani di ritorno degli investimenti (Figg. 13, 14).

Conclusioni e futuri sviluppi | L'intelligenza artificiale, insieme ai registri digitali e ai GD, sta rivoluzionando i processi di rigenerazione urbana. Gli strumenti per analizzare e simulare la città nella sua totalità si dimostrano sempre più necessari per gestire il consumo energetico delle aree urbanizzate in modo sostenibile e studiare misure di compensazione per un equilibrio generale e in vista degli obiettivi di neutralità climatica, cui anche la Città di Bologna ambisce (He et alii, 2020).

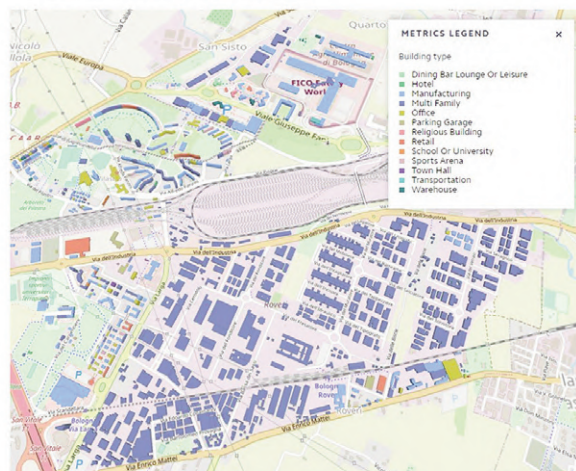
Ad oggi si rilevano alcune barriere allo sviluppo dei GD urbani in ambito energetico, prima fra tutte la complessità nella raccolta dei dati provenienti da diverse fonti e sistemi, nonché la loro integrazione e gestione. A ciò si aggiungono gli elevati costi di implementazione dovuti a investimenti significativi in infrastrutture tecnologiche (ad esempio sensori e sviluppo software per la acquisizione e gestione dei dati relativi), la difficoltà di normalizzazione dei dati e di interoperabilità tra sistemi, dovuta alla mancanza di standard universalmente accettati, il che limita la scalabilità delle soluzioni, e infine la sicurezza dei dati raccolti e analizzati in grandi quantità, in particolare di quelli sensibili (Le Dréau et alii, 2023). Il paper ha illustrato un approccio innovativo alla gestione dell'energia urbana utilizzando la tecnologia del GD, orientata al superamento delle barriere sopra esposte ed esemplificata in alcuni casi d'uso concreti.

L'interdisciplinarietà del lavoro presentato inco-

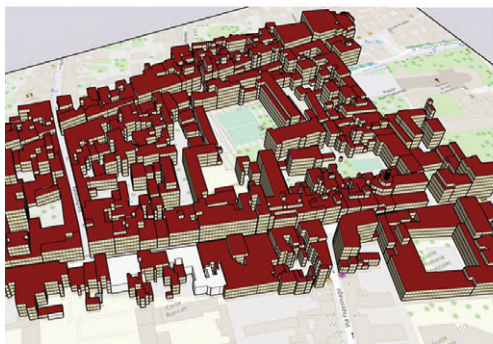
Model set up from iCD plugin in Sketchup:



Visualization from iCIM webpage:



Model set up from iCD plugin in Sketchup:



Visualization from iCIM webpage:

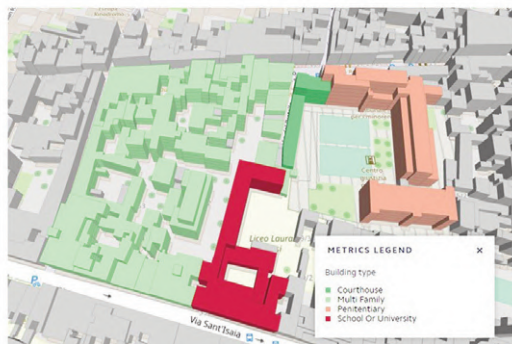


Fig. 4 | Pilastrò / Roveri district, Bologna: 3D model made with iCD; attribution to the buildings of the prevailing uses and building type, which contribute to estimating the energy consumption baseline (source: projectgreta.eu; r2msolution.com).

Fig. 5 | Prateello / Sant'Isaia area, historical city centre of Bologna: 3D model made using iCD, a Sketchup plugin; Attribution to the buildings of the prevailing uses and building type, which contribute to estimating the energy consumption baseline (source: r2msolution.com).

Fig. 6 | The City of Bologna, Pilastrò / Roveri district case study: analysis of buildings' thermal and electrical energy demand (source: projectgreta.eu).

raggia le collaborazioni e le innovazioni trasversali, influenzando la pianificazione e la politica urbana a livello internazionale, rendendola altamente rilevante per le decisioni informate nei contesti urbani e nella sostenibilità. La ricerca deve continuare esplorando ulteriori casi d'uso, ampliando anche lo spettro degli ambiti di applicazione ad altri settori, come la mobilità sostenibile. Un altro passo avanti da compiere è costituito dalla validazione delle simulazioni attraverso la comparazione degli esiti con dati reali, in modo da poter meglio comprendere l'affidabilità della metodologia e procedere a eventuali calibrazioni.

Il ricorso ai GD come strumenti a supporto delle politiche urbane può portare a una maggiore efficienza nell'uso delle risorse e a una migliore qualità della vita per i cittadini, tuttavia il loro processo di integrazione negli strumenti esistenti e nelle politiche urbane richiederà un ulteriore sforzo collaborativo tra ricercatori, decisori urbani e società civile: da qui la necessità di aprire le indagini – oggi prevalentemente dedicate ad affrontare tematiche tecniche e tecnologiche – a modalità di 'ricerca contributiva' che ricorrano ad ambienti collaborativi al contempo sociali, digitali e fisici, che funzionino come centri di sperimentazione di nuovi assetti di governance, progettualità, pianificazione, gestione e coinvolgimento dei cittadini.



Fig. 7 | Pilastro / Roveri district, Bologna: Simulation model of the district's energy consumption; Simulation of the potential for electricity production from the installation of photovoltaic panels (source: projectgreta.eu; r2msolution.com).

Fig. 8 | Pratello / Sant'Isaia area, historic city centre of Bologna: Simulation model of the district's energy consumption; Simulation of transformation scenario 1, using only passive measures (source: r2msolution.com).

The dual challenge of energy and digital transition, inherently reliant on cities, cannot fully realise its potential without engaging the sustainability of processes, projects, solutions, and actions that it entails, necessary to generate the expected benefits for the urban ecosystem and its inhabitants. In this context, the Digital Twin (DT) at the urban scale is establishing itself as a key tool to address the complexity inherent in this challenge (Al-Sehrawy, Kumar and Watson, 2021; Ketzler et alii, 2020). However, despite urban DTs being at the heart of recent scientific debate and research highlighting their potential and rapid developments, technologies and maturity levels are still at an early stage (Shahat, Hyun and Yeom, 2021; Attaran and Celik, 2023), thus underscoring the crucial role that experimenting with innovative methodologies and technologies, on-the-ground application, and the sharing of best practices can play. Many European cities, such as Helsinki (Hämäläinen, 2021), Zurich, Amsterdam, and Dublin (Caprari et alii, 2022) frame the development of their own UDT by placing it at the centre of energy transition policies, urban and environmental regeneration, and processes of democratisation and social inclusion. The development of the most innovative and recent projects on UDTs configures as a laboratory where solutions, infrastructure, and interdisciplinary skills converge (Deren, Wenbo and Zhenfeng, 2021).

In the context of the energy transition, the electrical system, through transformation into smart grids serving smart cities, is gaining increasing importance, generating a transformative push that will invest the city in all its aspects, whether manifesting in the physical dimension of the electrical grid and the built environment or in the intangible dimension of system actors, including citizens (Gantioler et alii, 2024). This drive will allow addressing crucial and necessary issues such as the increase in energy efficiency of neighbourhoods, on-site production of

renewable energy, the creation of energy communities, and the electrification of mobility, all elements that challenge the multidimensional energy management system and for which the use of a DT would allow an unprecedented level of knowledge of the phenomena generating them and their evolution.

The strategic vision that accompanies the creation of a DT at the urban scale and the simultaneous need to be operational and functional to emerging and rapidly changing needs and challenges lead many cities to test process innovation in concrete use cases. Among these, the energy sector emerges as a priority yet complex due to the issues at stake, such as data collection from heterogeneous sources, interoperability, and the possibility of their reuse, and above all, the themes of access, ethics, and privacy of data use, all factors that, despite the potential availability of the necessary information to feed the energy twin, limit its use or must be carefully regulated (Ramaswami et alii, 2023).

Among the Italian cities that have undertaken the development of their own DT is Bologna, selected by the European Union Mission 100 Climate-neutral and Smart Cities by 2030 (Cities Mission) among those that must achieve the goal of climate neutrality by 2030¹. Bologna, therefore, requires particularly rapid and effective decarbonisation solutions, for which the support of a technological infrastructure such as the DT, capable of providing models, predictions, and simulations, can play a central role, allowing urban decision-makers to anticipate and activate data-driven mea-

asures and policies. Bologna is also one of the Italian cities where the H2020 GRETA² (GA 01022317) and +CityxChange³ (GA 824260) projects have tested a methodological framework of energy modeling enabled by a simplified but incremental DT prototype, allowing for the generation of analyses and simulations focused on the energy theme but calibrated on broader decarbonisation goals.

The main original aspect of the research described by this contribution is the development and application to real case studies of a methodology that leads to the energy estimation of buildings and urban districts based on modeling made possible even in the absence of projects developed with BIM technologies and without using databases that provide detailed information. These might indeed not be available for reasons of compliance with regulations or privacy issues, such as those occurring for the Energy Certification Accreditation System (SACE) of Emilia-Romagna (Italy).

Therefore, this paper aims to illustrate the applied study of the aforementioned energy modeling framework applied to two areas of the City of Bologna, demonstrating the usefulness of the pioneering use of DT technology for energy transition. The specific application of software has allowed the creation of a simplified and thematic DT of urban areas (from the single building to the neighbourhood) that integrates various types of data for comprehensive urban energy modeling capable of supporting the development of decarbonisation strategies also dedicated to historic centres, taking into account their specificities and constraints.

<p>BASELINE – Pre intervention</p> <ul style="list-style-type: none"> External wall $U_{value} = 2.2 + 1.95 \text{ W/m}^2\text{K}$ Windows: $U = 3.17 + 2.64 \text{ W/m}^2\text{K}$ Un-insulated Ground Floors: $U = 0.71 \text{ W/m}^2\text{K}$ Un-insulated Roofs: $U = 1.56 \text{ W/m}^2\text{K}$ <p>Heating/DHW systems: Old/Modern natural gas Boilers</p>	<p>PASSIVE MEASURES</p> <p>Scenario 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ext Wall: $0.23 \text{ W/m}^2\text{K}$ GroundFloor: $0.29 \text{ W/m}^2\text{K}$ Roof: $0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ Windows $U = 1.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ <p>ACTIVE MEASURES</p> <p>Scenario 2: Substitution of heating system to Air source HP with COP=4 in all buildings</p> <p>Scenario 3: Addition of PV panels on building's rooftops</p>
<p>BASELINE – Pre intervention</p> <ul style="list-style-type: none"> External wall $U_{value} = 2.2 + 1.95 \text{ W/m}^2\text{K}$ Windows: $U = 3.17 + 2.64 \text{ W/m}^2\text{K}$ Un-insulated Ground Floors: $U = 0.71 \text{ W/m}^2\text{K}$ Un-insulated Roofs: $U = 1.56 \text{ W/m}^2\text{K}$ <p>Heating/DHW systems: Old/Modern natural gas Boilers</p>	<p>PASSIVE MEASURES</p> <p>Scenario 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ext Wall: $0.23 \text{ W/m}^2\text{K}$ GroundFloor: $0.29 \text{ W/m}^2\text{K}$ Roof: $0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ Windows $U = 1.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ <p>ACTIVE MEASURES</p> <p>Scenario 2: Substitution of heating system to Air source HP with COP=4 in all buildings</p> <p>Scenario 3: Addition of PV panels on building's rooftops</p>

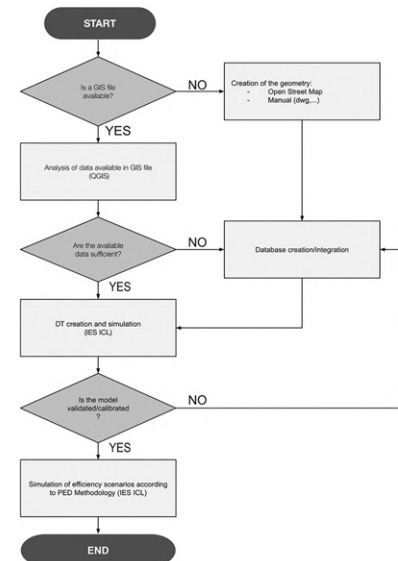
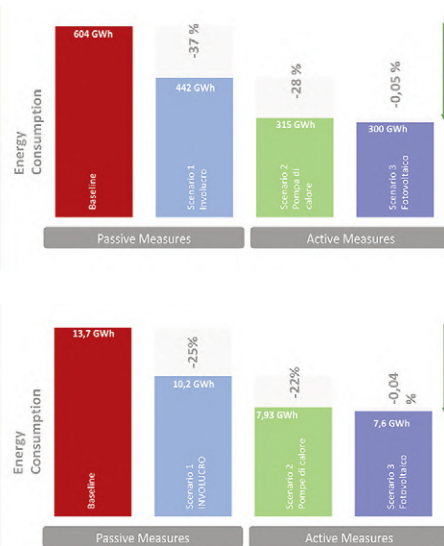


Fig. 9 | Pilastrò / Roveri district, Bologna: The results of energy simulations concerning the actual state and the application of efficiency enhancement scenarios through passive and active measures; Comparison of the three incremental transformation scenarios (source: r2msolution.com).

Fig. 10 | Zona Pratello / Sant'Isaia, historic city centre of Bologna: The results of energy simulations concerning the actual state and the application of efficiency enhancement scenarios through passive and active measures; Comparison of the results of the three incremental transformation scenarios (source: r2msolution.com).

Fig. 11 | Flow chart summarising the various steps of the energy simulation methodology (source: r2msolution.com).

The paper is structured as follows: the first paragraph traces the background and the state of the art of the DT, starting from its application to the smart grid and the smart city and finally as a predictive and simulative environment; the second paragraph highlights the challenges and open issues to which the methodology illustrated in the third paragraph contributes to addressing and which is explained therein through its application to concrete case studies; the fourth paragraph highlights the complementarities and further potentials of the methodology; the fifth paragraph traces the conclusions.

Urban Digital Twin as an evolution of the smart city | As mentioned, the DT for a city fits into the context of integrating smart grids into smart cities (Deren, Wenbo and Zhenfeng, 2021). Smart grids, through mathematical optimisation methods typical of energy systems starting from the electrical system, allow a more efficient and reliable energy distribution, particularly in the context of increasing reliance on renewable energies, even in urban areas. (Betis, Cassandras and Nucci, 2018). The development of smart cities requires a multidisciplinary approach (Masera et alii, 2018): the DT extends and integrates the logic applied to energy systems and data management and use systems, moving well beyond the simple digitalisation of infrastructures.

The city's DT offers a holistic and interconnected framework of every aspect of urban life, envisioning a fully integrated approach among the various actors of society, radically transforming the conception, planning (Moghadam et alii, 2017), and consequently the management of urban areas: it indeed allows for modeling the entire urban ecosystem starting from the energy network, including transport, infrastructure, and public services, and can be a tool to predict citizen behaviours (Annaswamy et alii, 2018). At the core of this transformation is the convergence of advanced technologies such as Artificial Intelligence (Doria, 2022),

the Internet of Things (Hammi et alii, 2018), Augmented Reality (Shawash and Marji, 2020), and 3D modeling (Dejaco et alii, 2022).

Energy efficiency in parts of the city is one of the main goals of smart cities and represents a key area of application for the DT (Bortolini et alii, 2022). Through the simulation and optimisation of urban energy flows (also in real-time), it is possible to identify opportunities to reduce consumption, improve the integration of renewable sources, and optimise resource use (Zhang et alii, 2019). A crucial area of intervention is the structuring of the electrical grid serving urban areas and the electrification of mobility (Kirpes et alii, 2019); however, to maximise the benefits of electrification, a holistic approach to urban planning is necessary. Regarding the establishment of energy communities, the DT can answer the dual question of which sites in the city (areas underlying the various primary cabins) to establish an energy community and from which optimal aggregate in terms of electricity generation and loads of various prosumers it should be composed (Prevedi et alii, 2023; Nguyen-Huu et alii, 2022).

One of the most innovative aspects of urban DTs is their ability to anticipate and mitigate problems through simulation and forecasting, offering a comprehensive and dynamic overview of the urban environment, enabling more informed decision-making and targeted interventions to improve energy efficiency (Ali et alii, 2024), plan the constitution of renewable energy communities in the most suitable sites, promote sustainable mobility, and ensure the quality of life for citizens.

As mentioned, many cities are undergoing experimentation and case studies. In Zurich, the DT focuses mainly on urban planning, examining the Energy Plan through solar potential, shadow analysis and airflow (Schrotter and Hürzeler, 2020). The Helsinki DT (Hämäläinen, 2021) represents an advanced case study in which the complete 3D city model is implemented online and provides energy data for each building from city registries, a tool for comparing energy consumption between buildings

of the same era, the solar energy received by surfaces, the energy from geothermal wells, the simulation of energy consumption and CO₂ emissions of the entire city, and the estimation of potential energy efficiency improvements considering appropriate renovations.

There are also interesting case studies of some university campuses, such as those of West Cambridge (Qiuchen Lu et alii, 2019) and Dublin, which, however, show significant simplification due to the reduced number of buildings and stakeholders involved; Turin also represents a pilot case study limited to individual sectors or districts of the city (Anselmo et alii, 2023), in which the thermal consumption of buildings is deduced from thermographic data.

From examining case studies on the use of DTs for energy investigation and simulation, the centrality of the theme of the availability of static and dynamic data emerges, which often are not of the quantity, quality, or accessibility necessary to develop even an approximate model. Many of the examples cited are united by the use of platforms for estimating the potential for energy production from the sun and the energy needs of buildings, through which, with stochastic methods and the use of machine learning, they extend the data obtained from specific case studies of limited extension and therefore more easily investigable to the rest of the urban environment. The methodology described below is particularly interesting because it represents a way of overcoming, in a flexible and refined approach, the essential problem of the nature and availability of data, especially energy data, that is functional for a DT at an urban scale.

Challenges and design | The structuring of the experimentation of the DT in the energy field usually begins with the collection of highly heterogeneous data in terms of origin, format, granularity, and size. The integration of such data – arising, for example, from cadastres, 3D models, electricity and gas energy consumption, production of energy from re-

newable sources, and Energy Performance Certificates of buildings – requires specific methodologies and presupposes overcoming a series of critical issues, foremost among them the collection and reuse of data (many of which are privately owned) that raise significant issues of compliance with privacy regulations and ethics.

Moreover, once the initial dataset is incorporated, it needs to be periodically updated and integrated into mathematical models that provide synthetic indicators on the evolution of the aspects investigated. Finally, historical centres in European cities (especially in Italy) with protected buildings impose some limitations on modernisation and efficiency interventions, such as installing insulations or photovoltaic panels. In this context, if it is verified that achieving the set efficiency goals is substantially impossible, the DT must contribute to defining compensatory interventions in other areas of the city.

The goal of the methodology illustrated below leads to the experimentation of digital technologies and processes capable of analysing the energy response of the urban environment, primarily its built component, to then perform simulations of transformation scenarios that allow for the prefiguration of efficiency measures and other broader requalification interventions. The methodology is extremely significant as it supports the creation of explicitly simplified calibrated energy DTs for the investigation at the urban scale.

R2M Solution⁴ was a technology partner of the H2020 +CityxChange project (part of the ‘Smart Cities and Communities’ program), within which it verified the scalability of the use of the software and methodology adopted in the case study of Positive Energy Blocks (Fig. 1, 2). R2M Solution has extended to 5 Italian cities – including Bologna – the experimentation carried out in +CityxChange on two lighthouse cities, Limerick in Ireland and Trondheim in Norway. The experiments in the 5 Italian cities led to the design of decarbonisation and energy management scenarios that, from the scale of the block or group of buildings, can be applied to the district scale and thus represent a valid methodology for those cities that need to accelerate their energy transition path to meet ambitious goals by 2030. The 100 cities selected by the Cities Mission indeed require digital tools and infrastructures that enable rapid procedures and are capable of making the most of the quantity of data already available today without precluding the possibility of later integrating further quantities and types of information whose collection and management can be gradually enabled also thanks to the application of FAIR⁵. Such procedures, which involve collaboration and exchange among public actors, citizens, and energy market operators, indeed require extended times that may not be compatible with the needs of the decarbonisation roadmap and may slow down the development of DTs functional to it (Apanavičienė and Shahrabani, 2023).

Case studies: methodology, data analysis, and results

To test the methods developed in +CityxChange, several Italian cities of different sizes, politics, and experiences related to transition processes were selected, in particular Bologna, Milan, Rome, Udine, and Crispiano in the Province of Taranto (Fig. 3), also involved in the complementary initiative Scalable Cities aimed at testing its replicability and expanding the scale of experiences in

other contexts. Through the use of an ecosystem of software under the IES Intelligent Communities Lifecycle (ICL)⁶, a dynamic energy model was created capable of reflecting the performances of the context under examination but also of predicting with a high level of detail the energy consumption of buildings, CO₂ emissions, energy demand peaks, energy costs, and the production of renewable energy.

The approach was progressive and followed an incremental path: starting from interventions aimed at reducing the energy consumption of buildings through the implementation of passive measures on

the envelope, it then moved on to optimising the systems; finally, it focused on the production of locally distributed renewable energy and on the implementation of energy exchange systems in a Renewable Energy Community key.

In the case of Bologna, two very different areas were examined for location, morphology, building types, inhabitants, socioeconomic realities, and functions: the Pilastro-Roveri district located in the Northeast of the city characterised by the residential village of Pilastro and the Roveri production area with a strong presence of manufacturing and craft activities; the Pratello / Sant’Isaia area located in the

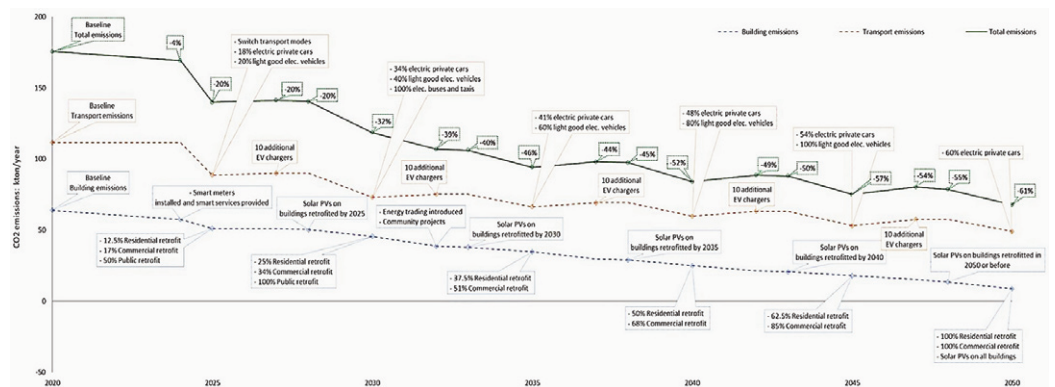
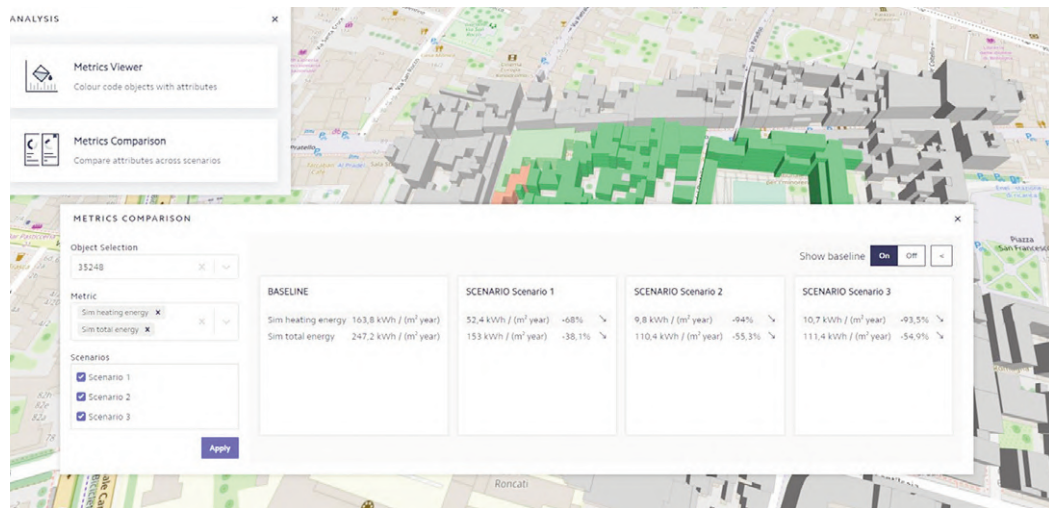


Fig. 12 | Zona Pratello / Sant’Isaia, historic city centre of Bologna: comparison metrics between the three transformation scenarios (source: r2msolution.com; +CityxChange project).

Fig. 13 | Limerick city decarbonisation roadmap graphic, up to 2050 final target (source: r2msolution.com; +CityxChange project).

Fig. 14 | 3D visualisation of the City of Limerick decarbonisation roadmap (source: r2msolution.com; +CityxChange project).

city's historical centre. The Pilastro-Roveri district was also one of the case studies of the GECO Project⁷, funded by the European Institute of Innovation & Technology, aimed at facilitating the path to the realisation of an energy community and the H2020 GRETA project, which aimed at improving the knowledge of the conditions and barriers to the emergence of active citizen participation within the energy system to support local and global decarbonisation goals. Both research groups from the Department of Architecture and the Department of Electrical, Electronic, and Information Engineering Guglielmo Marconi of the University of Bologna were also partners in the aforementioned projects.

Within the GRETA project, models were tested to define the current energy demand of four case studies, including Bologna, developed within the Enerkad GIS environment⁸. To generate the energy model, information from the urban cadastre and the years of construction were established through estimates and for homogeneous areas. The number and installed capacity of photovoltaic panels were derived from the Open Data of the City of Bologna. The results of the GRETA modeling were adopted and incorporated into the energy model developed by R2M in the new research.

It is important to emphasise that the validity and extreme interest of this multiscale methodology of analysis and simulation lie in its ability to provide sufficiently interesting results to guide strategies for retrofitting, efficiency improvement, and decarbonisation, even without detailed data and information. To create a model, only mandatory priority data such as simplified building geometry, building use and climate data are required (Tab. 1). In the case of the Bologna Pilastro area, data with high and medium-high priority were included; however, the possibility of refining the data output is nevertheless guaranteed by the option to incorporate more specific data with medium and medium-low priority if available.

The three-dimensional geometric model was generated using the iCD software (one of the tools from IES ICL), a Sketchup plugin on the OpenStreetMap GIS-based database (Fig. 4, 5). Based on the year of construction, the number of floors of buildings (to which the stratigraphy of the envelopes and the types of summer and winter air conditioning systems are associated), formal characteristics, type of use (residential, school, directional, etc.), and exposure, it was possible to derive the energy consumption of individual buildings and of the entire area under examination (Fig. 6).

A baseline pre-intervention expressed in kWh/m² per year was then generated, and subsequent scenarios of intervention were simulated, which may include passive measures (such as increasing the transmittance of the opaque envelope through the introduction of an insulating coat or the replacement of fixtures) and/or active measures (such as the replacement of the heat generator); it is also possible to simulate the benefits derived from the introduction of photovoltaic panels on roofs, evaluating installation opportunities and performance based on the inclination and exposure of the roofs (Fig. 7, 8). Scenarios of alternative interventions are quickly generated, allowing a comparative evaluation to determine which solution is most suitable in achieving the desired objectives, also considering the constraints imposed by the specific characteristics of the place.

For the introduction of insulating coats, photovoltaic panels on roofs, or other efficiency interventions in contexts where there are historical-artistic constraints, it is necessary to have a more in-depth knowledge of the individual buildings involved so as to exclude them from the hypothesised interventions or proceed with more precise design. In the case of the efficiency simulation of the envelope planned in the historical centre of Bologna for non-protected buildings, an internal coat was foreseen. The energy simulations concerning the current state and the intervention scenarios with active and passive solutions reveal significant potential for improving energy efficiency and mitigating greenhouse gas emissions (Fig. 9, 10).

The flowchart in Figure 11 succinctly outlines the process of creating the DT to clarify the various steps and promote the replicability of the proposed methodology.

Complementary solutions and further potential

The experiments in the Pilastro / Roveri areas and the historic centre of Bologna generated a thematic model simplified but detailed according to the availability of input data, applicable to an individual building, a neighbourhood, and potentially expandable to the entire city. This demonstrates how an urban DT can support experts and decision-makers in planning, evaluating, and managing city performance or a portion thereof, making use of analysis and simulation models at incremental levels of depth and complexity based on the development status of the DT infrastructure itself and the availability of data feeding it.

The research presented intends to take further steps forward, interpreting DTs as infrastructures supporting the multidisciplinary and transversality of the areas involved in cities' decarbonisation processes; many European DTs, including that of Bologna, aim to be not only enabling tools for data-based urban policies but also platforms that connect the various urban actors (Ketzler et alii, 2020).

To tackle this challenge, the methodology illustrated successfully implemented the sharing of analysis and simulation results through a pilot version of a central database extendable at the city scale. Through the iCIM software⁹, a monitoring and resource management platform that is accessible and shared was created. This platform allows the visualisation of sustainability metrics clearly and understandably even to laypersons and involves actors in the comparison between alternative scenarios (Fig. 12); moreover, it offers the possibility of partially managing data through filters, queries, and analysis tools of trends, allowing the acquisition of insights useful for making informed decisions.

Another very promising development of the methodology is the possibility of providing support for the creation of Renewable Energy Communities and evaluating different scenarios through a strategic study that, through the dynamic modeling of buildings, the simulation of district heating, district cooling, and smart electric grids, allows evaluating the potential enhancement of energy storage, the impact of local generation, and the improvement of building energy efficiency on electrical networks.

The outcome of the complex simulations described so far is the possibility of prefiguring a 'decarbonisation roadmap' that helps cities plan the implementation of the measures envisaged according to predetermined time intervals, also con-

sidering the presence or absence of economic incentives and evaluating investment return plans as well (Fig. 13, 14).

Conclusions and future developments | Artificial intelligence, digital registries and DTs are revolutionising urban regeneration processes. Tools to analyse and simulate the city in its entirety are increasingly necessary to manage the energy consumption of urbanised areas sustainably and to study compensation measures for a general balance in view of the climate neutrality goals that even the City of Bologna aspires to (He et alii, 2020).

To date, several barriers to the development of urban DTs in the energy sector are observed, first among them the complexity in collecting data from various sources and systems, as well as their integration and management. Additionally, the high costs of implementation due to significant investments in technological infrastructures (such as sensors and software development for the acquisition and management of related data), the difficulty of data normalisation and interoperability between systems due to the lack of universally accepted standards, which limits the scalability of solutions, and finally, the security of data collected and analysed in large quantities, particularly those sensitive (Le Dréau et alii, 2023). The paper has illustrated an innovative approach to urban energy management using DT technology aimed at overcoming the barriers mentioned above and exemplified in several concrete use cases.

The interdisciplinarity of the work presented encourages cross-sectoral collaborations and innovations influencing urban planning and policy at the international level, making it highly relevant for informed decisions in urban contexts and sustainability. The research needs to be continued by exploring further use cases and also extending the spectrum of application areas to other sectors, such as sustainable mobility. Another step forward consists of validating the simulations through the comparison of outcomes with real data in order to better understand the reliability of the methodology and proceed with any necessary calibrations.

Using DTs as tools to support urban policies can lead to greater efficiency in resource use and a better quality of life for citizens. However, their integration process into existing tools and urban policies will require a further collaborative effort among researchers, urban decision-makers, and civil society; hence the need to open today's research focused on addressing technical and technological issues to 'contributive research' modes that employ collaborative environments at the same time social, digital, and physical that function as experimentation centres for new governance structures, project planning, management, and citizen engagement.

Notes

- 1) The five-year +CityXChange project (GA 824260) ends in October 2023 (source: cityxchange.eu).
- 2) For more information, see the webpage research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/climate-neutral-and-smart-cities_en#documents [Accessed 11 April 2024].
- 3) For more information on GRETA – GReen Energy Transition Actions (GA101022317), see the webpage: projectgreta.eu [Accessed 11 April 2024].
- 4) R2M Solution is an engineering company specialising in integrated, multidisciplinary consultancy; it acts as a link between the research world and the market, enabling the migration of innovative technologies and services. For more information, see the webpage: r2msolution.com/it [Accessed 11 April 2024].
- 5) Acronym for findability, accessibility, interoperability, and reusability.
- 6) For more information on ICL (IES), see the webpage: r2msolution.com/it/services/prodotti-innovativi/ies-icl-2/ [Accessed 6 April 2024].
- 7) For more information on GECCO – Green Energy Community, EIT Climate KIC TC_2.2.15_190736_P125-1, see the webpage: gecocommunity.it [Accessed 6 April 2024].
- 8) For more information, see the webpage: projectgreta.shinyapps.io/greta-analytics/?tab=cs1 [Accessed 6 April 2024].
- 9) For more information on iCIM (IES), see the webpage: iesve.com/support/icim [Accessed 6 April 2024].

References

- Al-Seaarwy, R., Kumar, B. and Watson, R. (2021), “A Digital Twin Uses Classification System for Urban Planning and City Infrastructure Management”, in *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 26, pp. 832-862. [Online] Available at: doi.org/10.36680/j.itcon.2021.045 [Accessed 11 April 2024].
- Anselmo, S., Ferrara, M., Corgnati, S. P. and Boccardo, P. (2023), “Aerial urban observation to enhance energy assessment and planning towards climate-neutrality – A pilot application to the city of Turin”, in *Sustainable Cities and Society*, vol. 99, article 104938, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2023.104938 [Accessed 13 April 2024].
- Apanavičienė, R. and Shahrabani, M. M. N. (2023), “Key Factors Affecting Smart Building Integration into Smart City – Technological Aspects”, in *Smart Cities*, vol. 6, issue 4, pp. 1832-1857. [Online] Available at: doi.org/10.3390/smartcities6040085 [Accessed 11 April 2024].
- Attaran, M. and Celik, B. G. (2023), “Digital Twin – Benefits, use cases, challenges, and opportunities”, in *Decision Analytics Journal*, vol. 6, article 100165, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165 [Accessed 11 March 2024].
- Ali, U., Bano, S., Shamsi, M. H., Sood, D., Hoare, C., Zuo, W., Hewitt, N. and O’Donnell J. (2024), “Urban building energy performance prediction and retrofit analysis using data-driven machine learning approach”, in *Energy and Buildings*, vol. 303, article 113768, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113768 [Accessed 11 April 2024].
- Annaswamy, A. M., Guan, Y., Tseng, H. E., Zhou, H., Phan, T. and Yanakiev, D. (2018), “Transactive Control in Smart Cities”, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, issue 4, pp. 518-537. [Online] Available at: doi.org/10.1109/JPROC.2018.2790841 [Accessed 11 April 2024].
- Betis, G., Cassandras, C. G. and Nucci, C. A. (2018), “Smart Cities”, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, issue 4, pp. 513-517. [Online] Available at: doi.org/10.1109/JPROC.2018.2812998 [Accessed 11 April 2024].
- Bortolini, R., Rodrigues, R., Alavi, H., Vecchia, L. F. D. and Forcada, N. (2022), “Digital Twins’ Applications for Building Energy Efficiency – A Review”, in *Energies*, vol. 15, issue 19, article 7002, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en15197002 [Accessed 11 April 2024].
- Caprari, G., Castelli, G., Montuori, M., Camardelli, M. and Malvezzi, R. (2022), “Digital Twin for Urban Planning in the Green Deal Era – A State of the Art and Future Perspectives”, in *Sustainability*, vol. 14, issue 10, article 6263, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14106263 [Accessed 11 April 2024].
- Dejaco, M. C., Scanagatta, C., Mannino, A. and Condotta, M. (2022), “Transizione digitale per il facility management – BIM, CMMS e manutenzione predittiva | Digital transition in facility management – BIM, CMMS and diagnostic maintenance”, in *Agathón / International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 168-177. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12152022 [Accessed 11 April 2024].
- Deren, L., Wenbo, Y. and Zhenfeng, S. (2021), “Smart city based on digital twins”, in *Computational Urban Science*, vol. 1, article 4, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s43762-021-00005-y [Accessed 11 April 2024].
- Doria, E. (2022), “L’automazione del censimento tecnologico – Il centro storico di Betlemme | Automation of urban technological census – The historical centre of Bethlehem”, in *Agathón / International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 178-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12162022 [Accessed 11 April 2024].
- Gantioler, S., Balest, J., Tomasi, S., Voltolini, F. and Della Valle, N. (2023), “Transformative disruptiveness or transition? Revealing digitalization and deep decarbonization pathways in the Italian smart electricity meter roll-out”, in *Energy Research and Social Science*, vol. 106, article 103309, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.erss.2023.103309 [Accessed 11 April 2024].
- Hämäläinen, M. (2021), “Urban Development with Dynamic Digital Twins in Helsinki City”, in *IET Smart Cities*, vol. 3, issue 4, pp. 201-210. [Online] Available at: doi.org/10.1049/smc.2.12015 [Accessed 11 April 2024].
- Hammi, B., Khatoun, R., Zeadally, S., Fayad, A. and Khoukhi, L. (2018), “IoT technologies for smart cities”, in *IET Networks*, vol. 7, issue 1, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1049/iet-net.2017.0163 [Accessed 11 April 2024].
- He, X., Lin, M., Chen, T.-L., Liu, B., Tseng, P.-C., Cao, W. and Chiang, P.-C. (2020), “Implementation plan for low-carbon resilient city towards sustainable development goals – Challenges and perspectives”, in *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 20, issue 3, pp. 444-464. [Online] Available at: doi.org/10.4209/aaqr.2019.11.0568 [Accessed 11 April 2024].
- Ketzler, B., Naserentin, V., Latino, F., Zangelidis, C., Thuvander, L. and Logg, A. (2020), “Digital Twins for Cities – A State-of-the-Art Review”, in *Built Environment Journal*, vol. 46, issue 4, pp. 547-573. [Online] Available at: doi.org/10.2148/benv.46.4.547 [Accessed 11 April 2024].
- Kirpes, B., Danner, P., Basmadjian, R., de Meer, H. and Becker, C. (2019), “E-Mobility Systems Architecture – A model-based framework for managing complexity and interoperability”, in *Energy Informatics*, vol. 2, article 15, pp. 1-31. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s42162-019-0072-4 [Accessed 11 April 2024].
- Le Dréau, J., Lopes, R. A., O’Connell, S., Finn, D., Hu, M., Queiroz, H., Alexander, D., Satchwell, A., Österreicher, D., Polly, B., Arteconi, A., de Andrade Pereira, F., Hall, M., Kirant-Mitic, T., Cai, H., Johra, H., Kazmi, H., Li, R., Liu, A., Nespoli, L. and Saeed, M. H. (2023), “Developing energy flexibility in clusters of buildings – A critical analysis of barriers from planning to operation”, in *Energy and Buildings*, vol. 300, article 113608, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113608 [Accessed 11 April 2024].
- Masera, M., Bompard, E. F., Profumo, F. and Hadjsaid, N. (2018), “Smart (Electricity) Grids for Smart Cities – Assessing Roles and Societal Impacts”, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, issue 4, pp. 613-625. [Online] Available at: doi.org/10.1109/JPROC.2018.2812212 [Accessed 11 April 2024].
- Moghadam, S. T., Delmastro, C., Corgnati, S. P. and Lombardi, P. (2017), “Urban energy planning procedure for sustainable development in the built environment – A review of available spatial approaches”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 811-827. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.142 [Accessed 11 April 2024].
- Nguyen-Huu, T.-A., Tran, T. T., Tran, M.-Q., Nguyen, P. H. and Sloomweg, J. (2022), “Operation Orchestration of Local Energy Communities through Digital Twin – A Review on Suitable Modeling and Simulation Approaches”, in *2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON), May 9-12 2022, Riga, Latvia*, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830264 [Accessed 11 April 2024].
- Prevedi, A., Penalzoza, J. D. R., Pontecorvo, T., Napolitano, F., Tossani, F., Borghetti, A. and Nucci, C. A. (2023), “Optimal Operation of Renewable Energy Communities Through Battery Energy Systems – A Field Data-Driven Real-Time Simulation Study”, in *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 4-6 September 2023, Mugla, Turkiye*, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1109/SEST57387.2023.10257402 [Accessed 11 April 2024].
- Qiuchen Lu, V., Parlikad, A. K., Woodall, P., Ranasinghe, G. D. and Heaton, J. (2019), “Developing a Dynamic Digital Twin at a Building Level – Using Cambridge Campus as Case Study”, in DeJong, M. J., Schooling, J. M. and Viggiani, G. M. B. (eds), *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC) | Driving data-informed decision-making*, pp. 67-75. [Online] Available at: doi.org/10.1680/icsic.64669.067 [Accessed 13 April 2024].
- Ramaswami, A., Pandey, B., Li, Q., Das, K. and Nagpure, A. (2023), “Toward Zero-Carbon Urban Transitions with Health, Climate Resilience, and Equity Co-Benefits – Assessing Nexus Linkages”, in *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 48, pp. 81-121. [Online] Available at: doi.org/10.1146/annurev-environ-112621-063931 [Accessed 11 April 2024].
- Schrotter, G. and Hürzeler, C. (2020), “The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning”, in *PFG / Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, vol. 88, pp. 99-112. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2 [Accessed 11 April 2024].
- Shahat, E., Hyun, C. T. and Yeom, C. (2021), “City Digital Twin Potentials – A Review and Research Agenda”, in *Sustainability*, vol. 13, issue 6, article 3386, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su13063386 [Accessed 11 April 2024].
- Shawash, J. and Marji, N. (2020), “Visioni di un futuro più verde per il Seil di Amman – La Realtà Aumentata come strumento di progetto | Visions of a greener future for the Seil of Amman – Augmented Reality as an urban design tool”, in *Agathón / International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 220-229. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8212020 [Accessed 11 April 2024].
- Zhang, C., Cui, C., Zhang, Y., Yuan, J., Luo, Y. and Gang, W. (2019), “A review of renewable energy assessment methods in green building and green neighborhood rating systems”, in *Energy and Buildings*, vol. 195, pp. 68-81. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.040 [Accessed 11 April 2024].