

ARTICLE INFO

Received	06 April 2024
Revised	10 April 2024
Accepted	18 April 2024
Published	30 June 2024

VERSO LA NEUTRALITÀ CLIMATICA

Il ruolo chiave del Digital Twin nell'Industria 5.0

TOWARDS CLIMATE NEUTRALITY

The key role of the Digital Twin in Industry 5.0

Anna Osello, Matteo Del Giudice, Angelo Juliano Donato,
Andrea Fratto

ABSTRACT

La neutralità climatica è una sfida planetaria che richiede una rivoluzione nei modelli produttivi e nell'uso dell'energia. Il settore industriale, tra i principali responsabili delle emissioni inquinanti, necessita innovazione tecnologica per invertire questa tendenza, promuovendo soluzioni per migliorare la produzione, ridurre i consumi energetici e abbattere i costi di gestione. La transizione digitale verso l'Industria 5.0 esplora la complessità della transizione energetica e lo sviluppo di un gemello digitale, consentendo di affrontare le sfide dei cambiamenti climatici. La ricerca descrive un processo innovativo basato sulle Information Technologies e metodologie BIMtoBEM per sviluppare un gemello digitale della fabbrica con l'obiettivo di implementare sistemi di visualizzazione, cruscotti digitali e tecnologie di realtà estesa, con l'intento di porre l'essere umano al centro del flusso metodologico proposto.

Climate neutrality is a global challenge that requires a revolution in production models and energy use. The industrial sector, one of the leading emitters of pollutants, needs technological innovation to reverse this trend, promoting solutions to improve production, reduce energy consumption and cut operating costs. The Digital Transition to Industry 5.0 explores the complexity of the energy transition and the development of a digital twin to address the challenges of climate change. The research describes an innovative process based on Information Technologies and BIMtoBEM methodologies to develop a digital twin of the factory to implement visualisation systems, such as digital dashboards and extended reality technologies, placing human beings at the centre of the proposed methodological flow.

KEYWORDS

gemello digitale, transizione energetica, innovabilità, industria 5.0, BIM

digital twin, energy transition, innovability, industry 5.0, BIM

Anna Osello, Full Professor of Drawing at Politecnico of Turin (Italy), focuses her research on BIM and DIM for smart city development. Since 2015, she has coordinated the drawingTOthefuture Laboratory and the VR@polito Laboratory and has carried out theoretical and applied research on the topics of BIM and interoperability of data management software for the digital built environment. E-mail: anna.osello@polito.it

Matteo Del Giudice is a Researcher at the Department of Structural, Geotechnical and Building Engineering at Politecnico of Turin (Italy). Since 2009, he has been studying and applying the BIM methodology, investigating interoperability issues in real case studies in national and international contexts. E-mail: matteo.delgiudice@polito.it

Angelo Juliano Donato is a Research Fellow at the drawingTOthefuture Laboratory at Politecnico of Turin (Italy), where research and training are constantly integrated and developed on the topics of BIM, Virtual and Augmented Reality. E-mail: angelo.donato@polito.it

Andrea Fratto is a Research Fellow at the drawingTOthefuture Laboratory at Politecnico of Turin (Italy), where he researches electrical systems and explores BIMtoBEM interaction issues. E-mail: andrea.fratto@polito.it



Temperature più elevate, fenomeni atmosferici più violenti e aumento della siccità, del riscaldamento e dell'innalzamento degli oceani sono alcuni degli effetti causati dai cambiamenti climatici a cui l'umanità sta assistendo, contestualmente all'incremento della domanda globale di energia e della dipendenza dalle importazioni energetiche. Su questo tema il Green Deal Europeo (European Commission, 2019) è determinato a rendere la transizione energetica inclusiva, trasformando le sfide climatiche e ambientali in opportunità, azzerando le emissioni di CO₂ entro il 2050 con l'adozione di limiti come la neutralità climatica e la ricerca della neutralità del carbonio (Terenzi, 2022). Per tale finalità le Information and Communication Technologies (ICTs) sono considerate strumenti vitali, in quanto ritenute in grado di proporre modelli economici innovativi e opportunità di creazione di valore all'interno del nuovo ecosistema globale: la fondazione World Economic Forum (WEF, 2022) ha previsto una potenziale riduzione del 15% delle emissioni globali di carbonio alle ICTs, evidenziando il ruolo significativo che la digitalizzazione potrebbe svolgere nell'affrontare le sfide associate alla neutralità climatica (Ghenai et alii, 2022).

Con l'avvento delle tecnologie digitali si assiste a un cambio di paradigma orientato a nuovi metodi e strumenti per innovare il processo decisionale e grazie a innovative tecnologie di visualizzazione (Ma et alii, 2024) è possibile ottimizzare le prestazioni energetiche degli edifici (Massari et alii, 2022). Il concetto di 'innovability', sincretismo di innovazione e sostenibilità, si sposa con quanto detto finora: i due ambiti devono essere messi a sistema per definire un nuovo paradigma di sviluppo che esprima la necessità di promuovere e innovare le risorse del Pianeta, sfruttando gli strumenti messi a disposizione dall'era digitale (Zaffagnini and Palmirani, 2022).

L'influenza della transizione digitale / ecologica può essere guidata dalla consapevolezza dell'essere umano, orientando il modello di Industria 4.0 (Fig. 1) verso la visione umano-centrica propria dell'Industria 5.0 (Lv, 2023); l'enfasi posta sulla digitalizzazione e sulle tecnologie innovative per migliorare l'efficienza e la flessibilità della produzione può quindi essere finalizzata al raggiungimento dei principi di giustizia sociale e sostenibilità. L'innovazione tecnologica, guidata dalla visione umano-centrica, permette all'industria di fornire servizi all'umanità a lungo termine (Huang et alii, 2022), in un contesto nel quale il settore industriale emerge come uno dei principali responsabili delle emissioni di gas serra e inquinanti nell'atmosfera; per tale motivo diventa necessario esaminarlo attentamente dal punto di vista energetico e secondo Facciolongo (2018) la neutralità climatica può essere raggiunta innovando i modelli di produzione e consumo energetico, piuttosto che solo limitando i consumi.

Il concetto di 'fabbrica intelligente' si basa sul nuovo ecosistema fabbrica-uomo che propone informazioni legate alla gestione del fabbricato e dei processi produttivi e al comfort, ottimizzando le risorse utilizzate per ridurre la produzione di rifiuti e le emissioni climateranti (Romano et alii, 2022). La 'gestione dell'obsolescenza dell'opera architettonica' e del suo 'ciclo di vita' rappresentano necessità ineludibili di una significativa 'estensione', concettuale e operativa, dello stesso pro-

getto di architettura verso una dimensione di responsabilità umana per la gestione dell'ambiente antropizzato, sfruttando i servizi digitali (Giallocosta, 2019; Lauria and Azzalin, 2021). Big data, Gemelli Digitali (GD) e algoritmi di Intelligenza Artificiale (IA) possono essere finalizzati al raggiungimento dei requisiti informativi utili agli utenti finali (Ryalat, ElMoaqet and AlFaouri, 2023).

In particolare l'adozione di piattaforme basate su Gemelli Digitali Energetici (GDE; Yu et alii, 2022) definisce una nuova idea di fabbrica in cui i dati vengono esposti mediante interfacce grafiche sfruttando l'interoperabilità. La sua applicazione, integrata all'utilizzo di sensori intelligenti, può portare a un sistema di gestione e manutenzione dell'edificio e di tutte le sue componenti tecniche e tecnologiche verso approcci predittivi e programmati (Dejaco et alii, 2022). In questo ambito le procedure di interoperabilità per trasferire il dato da una piattaforma di modellazione proprietaria (BIM authoring) a quelle di analisi specifica (Building Energy Models – BEMs) offrono numerosi spunti di riflessione sul tema della condivisione e dell'affidabilità dei dati (Maiezza, 2019). Confrontare dati provenienti da sensori che misurano il mondo fisico con quelli derivati da una simulazione appartenenti al mondo digitale pone una serie di quesiti legati al concetto di livello di dettaglio e di affidabilità dei componenti digitali (Jung et alii, 2023).

L'obiettivo della ricerca è considerare la procedura BIMtoBEM come un'attività semi-automatica in grado di generare scenari diversi finalizzati a un'attività decisionale centrata sull'uomo attraverso un'interfaccia grafica. L'innovazione metodologica consiste nel ridurre il numero di passaggi scientificamente già consolidati; sfruttando infatti i vari formati di esportazione e le nuove implementazioni dei software si rende possibile ottimizzare gli scenari produttivi con un minor utilizzo di risorse. Infine il contributo indaga l'affidabilità delle simulazioni proposte, implementando sistemi di visualizzazione come cruscotti digitali e sistemi di Realtà Estesa (Extended Reality – XR) con l'uomo al centro del flusso metodologico proposto.

Stato dell'arte | Le metodologie consolidate per l'analisi energetica si basano su un percorso ben delineato, composto ma con numerosi punti critici che aumentano notevolmente i tempi di calcolo e richiedono risorse altamente qualificate. La metodologia che si intende esplorare inizia con l'analisi delle criticità di un percorso classico. Come illustrato nella Figura 2 i passaggi per ottenere una simulazione energetica si basano sulla creazione di un modello su un programma di BIM authoring e proseguono con l'esportazione in formato .gbxml o .ifc sui differenti software di simulazione per valutarne le prestazioni energetiche. Poiché la sintesi dei risultati e delle simulazioni sono stampati in tabelle, file di testo o in formato .html, è conveniente implementare dei sistemi di visualizzazione in grado di facilitare l'interpretazione dei dati da parte degli utenti. Lo stato dell'arte e i casi studio presenti in letteratura evidenziano come la metodologia BIMtoBEM può essere applicata tanto nel settore industriale quanto in quello edilizio e in particolare nel settore residenziale (Bastos Porsani et alii, 2021) o dell'edilizia pubblica (Jung et alii, 2023).

Dal confronto effettuato sui diversi studi in letteratura emerge che, al fine di ottenere la calibra-

zione del modello, è necessario effettuare un arricchimento delle informazioni energetiche e dirimere le principali criticità che risiedono nell'esportazione delle geometrie e delle informazioni. In quest'ottica il contributo ha la finalità di descrivere una metodologia innovativa basata su nuovi sistemi di visualizzazione in grado di risolvere le criticità emerse nell'uso di una metodologia ampiamente consolidata. In particolare la metodologia consente una riduzione nei tempi di arricchimento del modello BEM e la possibilità di interagire con il modello attraverso una facile interpretazione dei risultati, svincolandosi dai problemi legati all'esportazione e all'uso dei software energetici. L'innovazione si basa nell'impiego diretto del motore di calcolo presente nelle ultime versioni dei software di BIM authoring che consente simulazioni energetiche in differenti scenari e configurazioni. I sistemi di cruscotti digitali o l'utilizzo dei sistemi di XR garantiscono una facile interpretazione dei report in formato .html dei risultati delle simulazioni da parte dei differenti utenti (Fig. 3).

L'innovazione del metodo proposto si basa sulla capacità di valutare e agire sul modello attraverso l'interpretazione dei risultati: la differenza sostanziale rispetto a una metodologia tradizionale consiste nella notevole riduzione sui tempi di simulazione e sulle risorse a disposizione (Fig. 4). L'aspetto critico della metodologia analizzata risiede nell'affidabilità dei risultati delle simulazioni causati dal mancato utilizzo di un software specifico di simulazione energetica. Tuttavia, trovata la configurazione del modello più efficiente, è possibile esportarlo ed effettuare delle simulazioni dettagliate: esportare direttamente la migliore soluzione energetica del modello contribuisce alla riduzione dei tempi rispetto al processo tradizionale e a un notevole aumento dell'affidabilità dei risultati.

Metodologia e fasi della ricerca | L'inizio della transizione verso l'Industria 5.0 richiede la creazione di una rappresentazione digitale dettagliata dell'edificio, processo fondamentale che si avvia con la raccolta esaustiva dei dati (Maiezza, 2019). Questa fase iniziale si presenta come un processo complesso e laborioso, portando con sé considerevoli sfide e costi in termini di tempo (Sriyolja, Harwin and Yahya, 2021). La ricerca e lo sviluppo della metodologia riportata nel presente articolo è finanziata dal Piano Nazionale Ripresa Resilienza attraverso il progetto di ricerca MANufacturing Automotive Green Evolution 5.0 (Manage5.0), basato sullo sviluppo efficace del GD di uno stabilimento industriale (Fig. 5), che rappresenta uno strumento cruciale per l'avanzamento verso l'Industria 5.0. L'applicazione della metodologia al caso studio ha evidenziato come la centralità dell'uomo sia essenziale per la sostenibilità e il raggiungimento della neutralità climatica.

Lo schema di gestione (Fig. 6) descrive la centralità dell'azione umana nell'osservare, pianificare e agire mitigando e adattando i propri comportamenti, definendo una strategia basata sull'interazione tra mondo fisico e digitale grazie alla User eXperience (UX), sfruttando un GD. L'utilizzo di dispositivi improntati sull'UX permettono la visualizzazione, il monitoraggio e l'interazione con i diversi scenari digitali (Fig. 7); i concetti di XR influenzano i costi, i tempi e l'impiego di risorse nelle fasi di gestione dei sistemi installati (Namjoshi and Rawat, 2022).

I concetti chiave dell'Industria 5.0 si basano

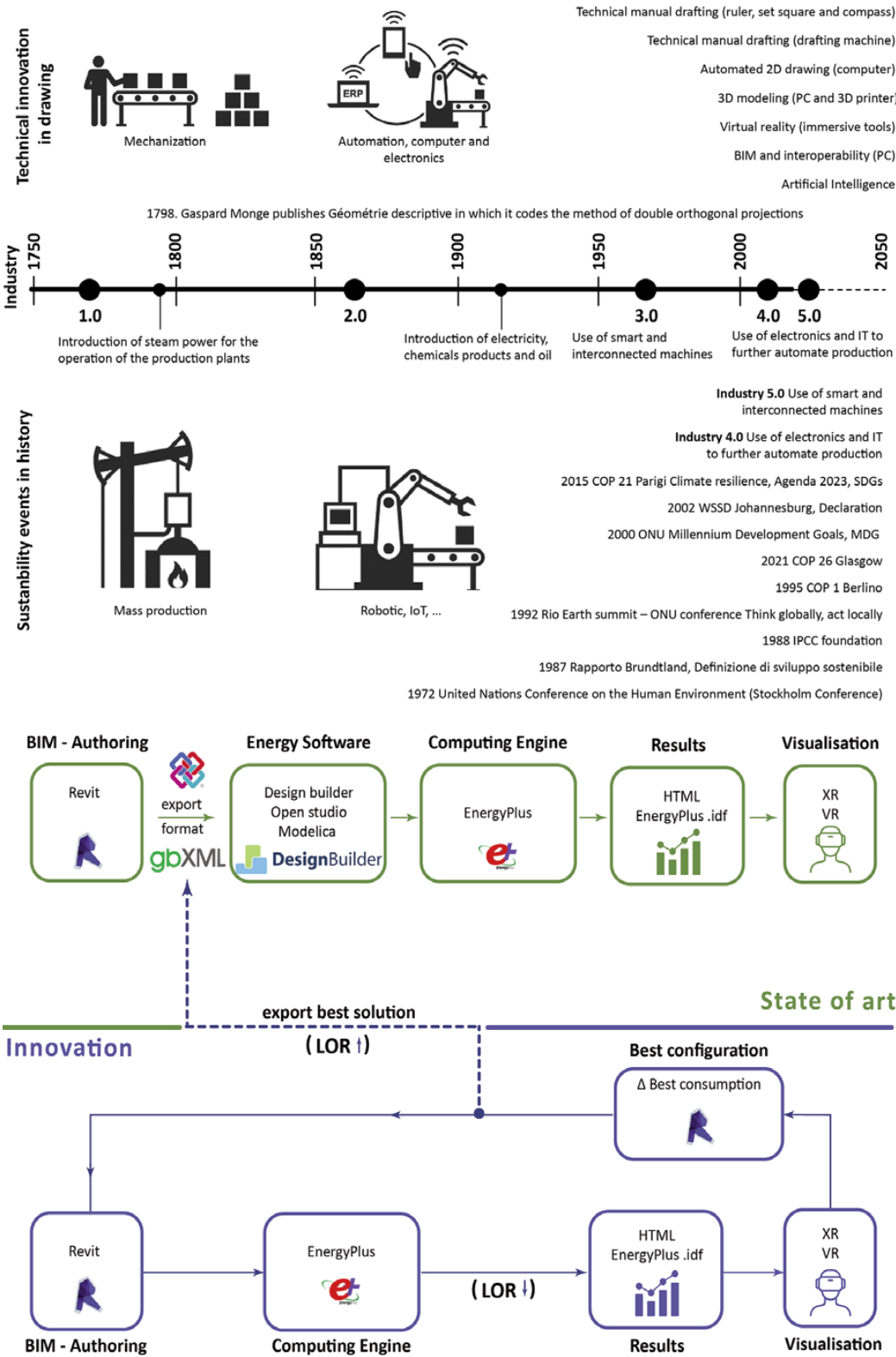


Fig. 1, 2 | Innovation, sustainability and industry over time; State of the art (credits: the Authors, 2024).

sull'interazione uomo-macchina, sulla capacità di interoperare con le tecnologie a disposizione ed utilizzarle al fine di adattare la produzione all'esigenze umane: per tale motivo sorge la necessità di realizzare un modello digitale basato sul concetto dell'Human-centred Interaction (HCI): collocando l'essere umano come punto focale del modello (Fig. 8) saranno la sua percezione, la sua esperienza e le sue sensazioni a creare il punto di collegamento fra il mondo fisico e quello digitale. Inoltre l'uomo, oltre che usufruire dei molteplici benefici della realizzazione di un GD come la possibilità

di monitorare, visualizzare e gestire i differenti scenari, avrà la possibilità di agire e interagire direttamente con esso, creando così un continuum temporale fra uomo e macchina (Tao et alii, 2022); in questo modo interfacce grafiche potranno innescare azioni di mitigazione e adattamento per la resilienza e la sostenibilità. La creazione del GD si basa sulla possibilità di ricevere dati statici e dinamici in input e manipolarli al fine di realizzare delle interfacce grafiche per la gestione dell'intero stabilimento (De Luca et alii, 2021).

Per consolidare la metodologia descritta e ot-

tenere gli obiettivi di sostenibilità, neutralità climatica e raggiungere i principi dell'Industria 5.0 la ricerca è suddivisa nelle fasi di raccolta dati, flusso informativo BIMtoBEM, simulazione BEM e visualizzazione dei risultati.

Raccolta Dati | La prima fase è basata sulla raccolta e scambio di dati; le informazioni principali per la realizzazione del modello sono state reperite tramite l'interazione tra l'esperto in gestione digitale delle costruzioni e il cliente, partendo dai rilievi effettuati con approcci tradizionali e dalla possibilità di avvalersi di tecnologie innovative di acquisizione.

I principali dati di input arrivano dalla documentazione storica, dai dati di fabbrica architettonici e dei differenti sistemi IoT installati all'interno dello stabilimento. L'utilizzo di applicazioni, dashboard e sistemi di XR permettono di interagire con la replica virtuale del modello. L'interpretazione della visualizzazione del modello digitale assume significati differenti a seconda dei diversi profili d'utente: le squadre di manutenzione, ad esempio, avranno la possibilità di monitorare i componenti all'interno dello stabilimento e valutare l'approccio migliore per la manutenzione riducendo i tempi di intervento e i rischi sul lavoro; un modello così generato fornisce un valore aggiunto al fabbricato industriale.

La necessità di mantenere il passo con le mutevoli esigenze normative e innovazioni tecnologiche richiede un costante impegno nella ricerca e nell'adozione di soluzioni avanzate per la raccolta, la gestione e l'analisi dei dati. Spesso si riscontra una notevole confusione nella ricerca dei dati di ingresso a causa di innumerevoli cambiamenti del layout produttivo che comportano un basso livello di affidabilità (Massafra, Predari and Gulli, 2022). Solo un approccio diligente e innovativo nella raccolta dei dati garantisce il successo e la longevità del GD nell'ambito dell'Industria 5.0 (Boje et alii, 2023).

Flusso informativo BIMtoBEM | A seguire la fase di analisi dettagliata delle criticità dei dati raccolti, la seconda fase interessa il flusso informativo successivo alla costruzione del modello BIM e del modello BEM. La piattaforma GD proposta è fondata su domini di dati eterogenei statici e dinamici: a) dominio BIM, per la definizione di un'anagrafica tecnica affidabile; dominio BEM, per le valutazioni energetiche; flusso BIMtoBEM. Il contributo si focalizza sul processo BIMtoBEM, soffermandosi sugli aspetti principali legati all'efficiamento energetico e alla visualizzazione. Il dominio di dati BIM è costituito dalla federazione di modelli concettuali, architettonici e impiantistici, elettrico e meccanico (Fig. 9). L'utilizzo del modello BIM federato, prodotto con la piattaforma Autodesk Revit, garantisce lo scambio dati tra diversi professionisti coinvolti e permette la visualizzazione delle interazioni tra i diversi sistemi installati (Russo Ermolli and Galluccio, 2019). I dati provenienti dal dominio BIM sono arricchiti con le proprietà termofisiche dell'involucro e le relative zone termiche, le caratteristiche dei sistemi di ventilazione e condizionamento culminano con lo sviluppo di modelli BEMs (Fig. 10) per la digitalizzazione del plant.

Il flusso BIMtoBEM (Fig. 11) inizia con l'acquisizione dei requisiti informativi per lo sviluppo del modello BIM e la successiva trasformazione in un

modello BEM attraverso uno scambio di informazioni garantito dall'interoperabilità tra modelli, software e banca dati (Del Giudice et alii, 2021). La realizzazione di un modello BEM, utile per la realizzazione delle simulazioni energetiche, elettriche e dei processi necessita di un filtraggio dei dati in ingresso tramite il Data Sharing. Durante questo processo si ha la valutazione di tutti i dati condivisi dai differenti modelli con la selezione di quelli utili per la realizzazione del modello BEM e per le diverse simulazioni. Il confronto tra le informazioni ricevute dai modelli BIM permette di identificare incongruenze nella realizzazione dei modelli: è così possibile effettuare una calibrazione aumentando l'affidabilità dei modelli e delle simulazioni (Saad and Eicker, 2023).

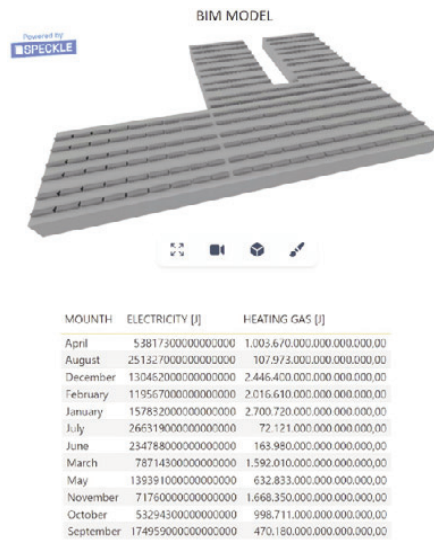
Per validare l'affidabilità della metodologia proposta, sono stati effettuati test di interoperabilità con i differenti software di simulazione energetica (Bastos Porsani et alii, 2021) attraverso l'esportazione del modello in formato Green Building XML (.gbxml). I test eseguiti hanno confermato le criticità e l'elevato tempo necessario per esportare correttamente tutte le geometrie presenti nel modello (Fig. 12).

Simulazioni BEM | La simulazione BEM, successiva all'esportazione e all'arricchimento del modello con i parametri energetici, è stata processata attraverso l'utilizzo di EnergyPlus, uno dei motori di calcolo energetico più prestazionali e utilizzati nel settore (Di Biccari et alii, 2022). I differenti parametri impostati sul modello energetico sono il livello di infiltrazione, occupazione, ventilazione e le configurazioni delle differenti zone termiche nello stabilimento. La calibrazione del modello, al fine di ottenere un sottile margine tra i consumi energetici reali e simulati e di aumentare l'affidabilità delle simulazioni, è stata basata sulla personalizzazione del file climatico in formato EnergyPlus Weather, ovvero .epw (Moradi et alii, 2023). L'arricchimento di informazioni permette di aumentare notevolmente il grado di affidabilità dei risultati delle simulazioni ma, allo stesso tempo, aumenta notevolmente i tempi di simulazione e la difficoltà di lettura dei dati. L'interpretazione e la comprensione dei risultati delle simulazioni varia in funzione del tipo di utente che si interfaccia con i sistemi di visualizzazione.

La costruzione di un GD permette inoltre di effettuare anche simulazioni sui differenti impianti presenti nello stabilimento. Le simulazioni elettriche, affrontate sul caso studio in esame, si soffermano sugli aspetti legati alla manutenzione e gestione delle diverse installazioni presenti nello stabilimento, sull'analisi illuminotecnica e sul monitoraggio dei flussi di potenza nell'edificio. Infine possono essere ricreati scenari inerenti alla gestione dei processi e dei prodotti all'interno dello stabilimento. Seguendo la procedura è possibile visualizzare agevolmente i dati e i differenti scenari, gestire la manutenzione del costruito e sviluppare scenari di efficientamento energetico e monitoraggio dei diversi vettori energetici. La decisione, l'aspetto critico e l'esperienza offerta dall'utente diventano parte integrante nell'aumento di affidabilità delle simulazioni (Chong, Gu and Jia, 2021),

il continuo aggiornamento dei modelli e lo sviluppo dei concetti human-centred legati all'Industria 5.0.

Risultati | Un ecosistema in cui l'uomo è il mediatore tra le interfacce di visualizzazione e il modello permette di realizzare un gemello digitale basato sull'utilizzo di attuatori e intelligenza artificiale in grado di collegare il mondo naturale all'edificio (Ratti and Belleri, 2020). Il presente studio propone una metodologia per condurre simulazioni energetiche dello stabilimento, con l'obiettivo di agevolare l'interpretazione dei risultati attraverso l'utilizzo di cruscotti digitali innovativi e ridurre i tempi di simulazione; ciò consente un adattamento dei processi decisionali relativi ai diversi layout produttivi al fine di ridurre i consumi energetici (Zheng et alii, 2023).



Un esempio di cruscotto digitale (Fig. 13) raffigura una possibile interfaccia grafica del layout produttivo; le differenti zone termiche, presenti all'interno del modello, sono tematizzate per rappresentare i consumi energetici generati dagli apporti termici gratuiti e dalle lavorazioni tenendo conto i ricambi orari dell'impianto HVAC. L'HCI, in questo caso, è basata sulla tipologia di utente che si interfaccia con la visualizzazione di questo dato. La sensibilizzazione dell'operatore, le soluzioni ingegneristiche che può fornire il facility manager o le scelte di investimento da parte della società controllante possono essere alcune delle interazioni tra la visualizzazione e il gemello digitale (Pan et alii, 2023).

Il secondo aspetto affrontato riguarda l'utilizzo dei sistemi di XR. Sono stati esaminati scenari di Realtà Aumentata che consentono di visualizzare

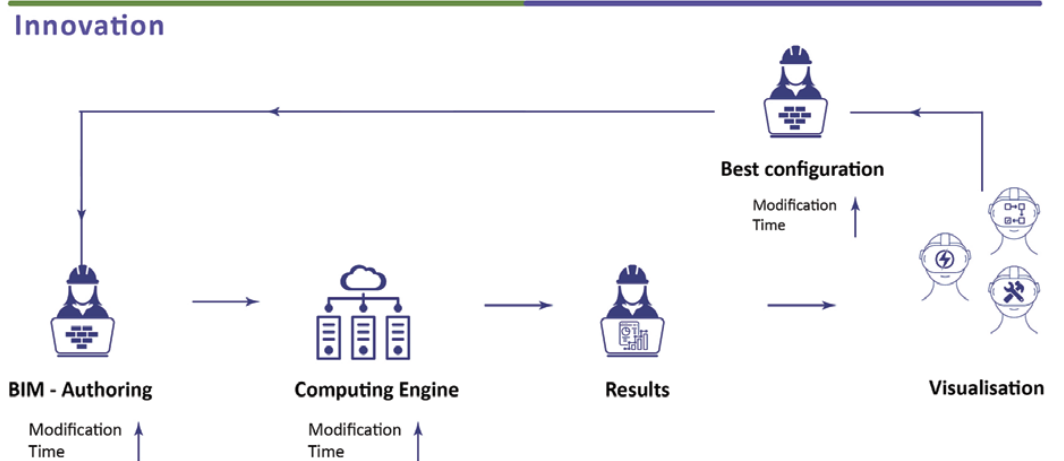
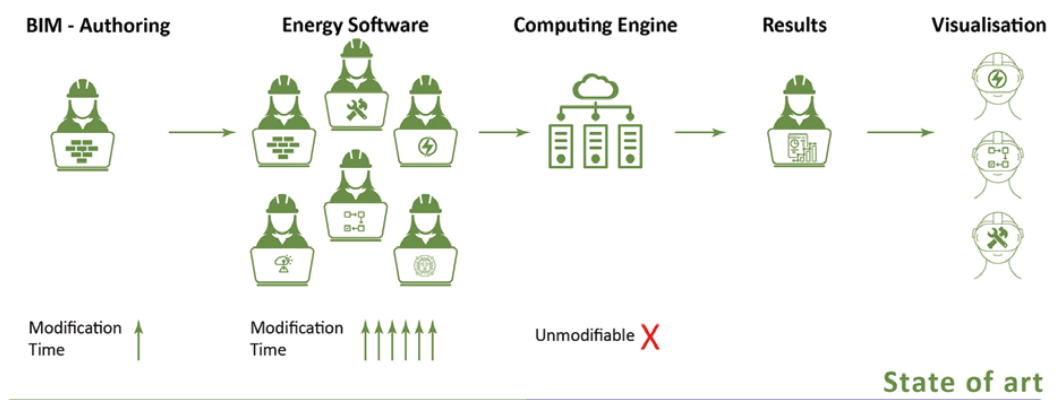
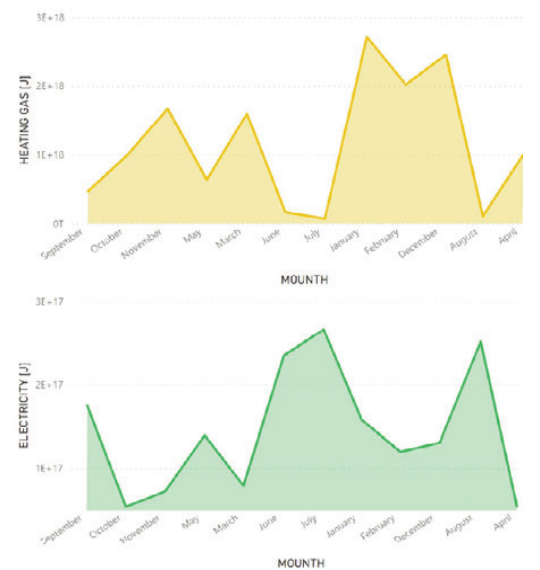


Fig. 3 | Displaying results (credit: the Authors, 2024).

Fig. 4 | Resources in the BEM (credit: the Authors, 2024).

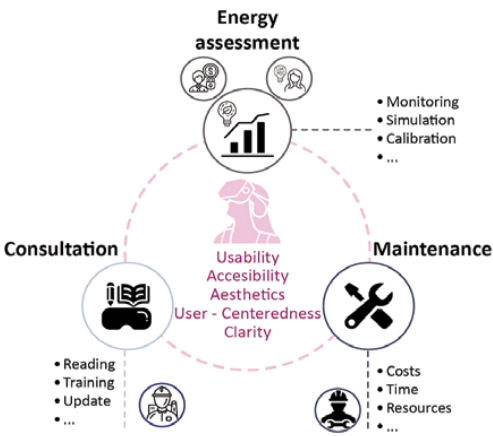
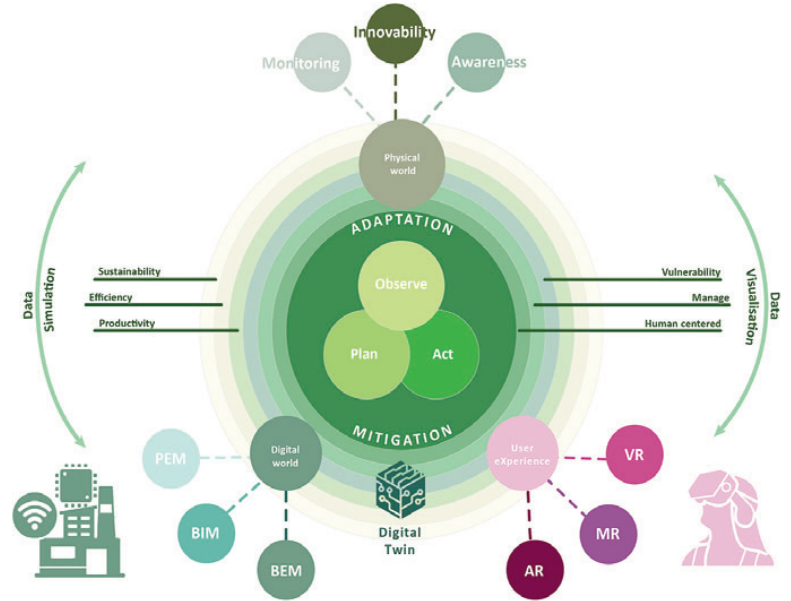
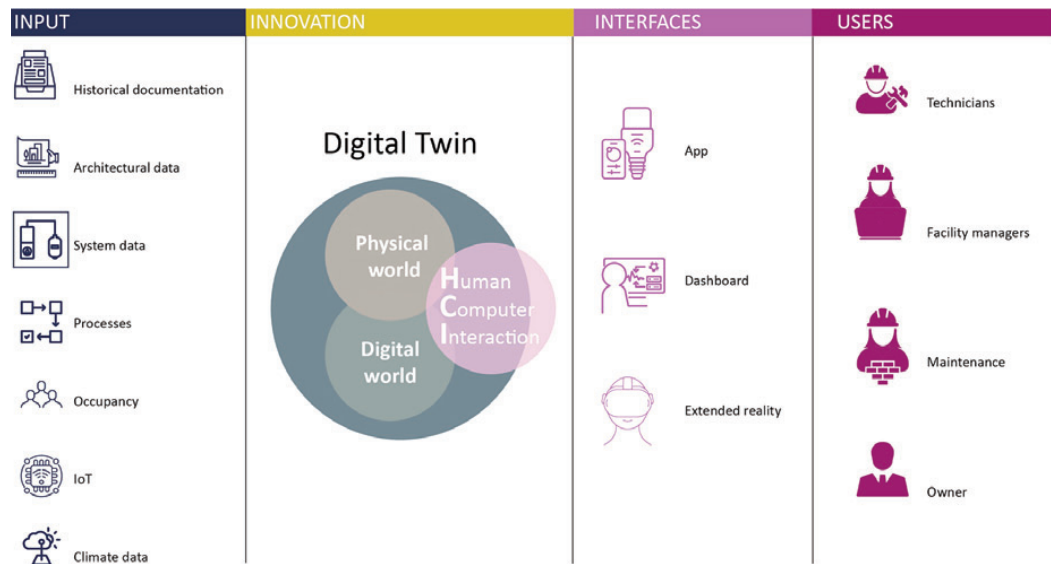


Fig. 5 | Case study (source: Google Earth, 2024).

Fig. 6-8 | Innovative industry management; User Experience in Industry; Methodological diagram (credit: the Authors, 2024).



i componenti modellati dello stabilimento sovrapponendo il mondo reale a quello digitale. A titolo esemplificativo la Figura 14 mostra una possibile interazione con i componenti della cabina elettrica, applicando automatismi alla gestione della manutenzione attraverso filtri tematici. L'esperienza dell'utente è incentrata sulla gestione dei componenti e sulla possibilità per il facility manager di spiegare in sicurezza gli interventi necessari agli operatori, fattore che può portare a una riduzione delle risorse, dei materiali e delle emissioni dovute a una gestione inefficiente della manutenzione. Allo stesso modo utilizzando la Realtà Virtuale (Cárdenas-Robledo et alii, 2022) è possibile creare scenari immersivi per visualizzare, interagire e comunicare gli interventi di manutenzione, monitorare i principali parametri dei dispositivi ed addestrare in sicurezza le squadre di manutenzione.

Conclusioni | L'era della trasformazione digitale impone un cambio di paradigma all'industria delle costruzioni, influenzata dai cambiamenti climatici che stressano gli ecosistemi naturali e antropici. L'ecosistema digitale descritto nel contributo assume un ruolo chiave nell'innovazione sostenibile e di economia circolare, supportando aziende, En-

ti e Istituzioni nel ridurre i costi operativi, ottimizzare l'uso delle risorse e diminuire l'impronta di carbonio (Terenzi, 2022). Il potenziale dei Gemelli Digitali e il raggiungimento degli obiettivi dell'Industria 5.0 risultano limitati dall'imaturità dei mercati e dalla difficoltà di raggiungere i differenti utenti. Gli sviluppi futuri si basano sulla possibilità di modificare i dati direttamente sul modello attraverso i sistemi di visualizzazione proposti nella metodologia, centralizzando ancora di più l'utente nel flusso.

Inoltre lo sviluppo di sistemi di IA può aiutare l'interazione e la visualizzazione da parte del progettista e degli utenti che si interfacciano con i sistemi di visualizzazione (Paciotti and Di Stefano, 2021) e l'utilizzo dell'Industry Foundation Classes (.ifc) per gli aspetti legati all'esportazione del modello, per le simulazioni e gli aspetti legati visualizzazione in XR. L'utilizzo di questo formato per lo scambio di dati è tra i più utilizzati nel mondo: sono infatti diverse le automazioni, basate sull'esportazione del modello in questo formato, per l'arricchimento dell'Energy Analysis Model (EAM) e per migliorare l'efficienza della simulazione BEM (Ramaji, Messner and Mostavi, 2020).

Una delle principali differenze riscontrate tra il

formato .gbxml e .ifc risiede nella possibilità di esportare i differenti sistemi presenti all'interno dello stabilimento, ad esempio, il sistema Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC). Esportando il modello in formato .ifc mediante l'utilizzo di algoritmi è possibile arricchire il modello di transizione e ridurre i tempi di modellazione e simulazione (Hang and Jiansong, 2023).

La proposta del contributo mostra le potenzialità derivate dalla modellazione informativa finalizzata alla prototipazione di scenari di efficientamento energetico mediante l'applicazione di interfacce grafiche. La speranza è affidata alla capacità dell'uomo di sfruttare le innovazioni proposte per centrare l'obiettivo della neutralità climatica. Questa metodologia permette di raggiungere le caratteristiche principali dell'Industria 5.0 attraverso l'interazione uomo-macchina resa possibile dai sistemi di visualizzazione descritti e dalla possibilità di aggiornare il modello digitale. La stessa metodologia potrebbe essere applicata anche ad altri contesti in cui l'uomo deve o vuole diventare parte integrante del modello.

Il ruolo chiave nella realizzazione di un Gemello Digitale nel settore industriale, e non solo, agevola la gestione del costruito verso la neutralità clima-

tica e il raggiungimento di un ecosistema sostenibile nonostante le difficoltà operative nella digitalizzazione del patrimonio costruito.

Higher temperatures, more violent weather conditions, increased droughts, warming and rising oceans are some of the effects caused by climate change that humanity is witnessing, while global energy demand, as well as dependence on energy imports, is increasing. On this issue, the European Green Deal (European Commission, 2019) is determined to make the energy transition inclusive, turning climate and environmental challenges into opportunities by turning CO₂ emissions to zero by 2050 by adopting limits such as climate neutrality and the pursuit of carbon neutrality (Terenzi, 2022). For this purpose, Information and Communication Technologies (ICTs) play a vital role, considering them capable of proposing innovative economic models and value-creation opportunities within the new global ecosystem: the World Economic Forum Foundation (WEF, 2022) has predicted a potential 15% reduction in global carbon emissions under the influence of ICTs, highlighting the significant role that digitisation could play in addressing the challenges associated with climate neutrality (Ghenai et alii, 2022).

With the advent of digital technologies, there is a paradigm shift towards new methods and tools to innovate decision-making; thanks to innovative visualisation technologies (Ma et alii, 2024), it is possible to optimise the energy performance of buildings (Massari et alii, 2022). The concept of 'innovability', a synchrisis of innovation and sustainability, fits in with previous considerations: the two spheres set up a system to define a new development paradigm that expresses the need to promote and innovate the Planet's resources, exploiting the tools made available by the digital era (Zafagnini and Palmi, 2022).

The influence of the digital / ecological transition can be driven by the awareness of the human being, orienting the Industry 4.0 model (Fig. 1) towards the human-centric vision of Industry 5.0 (Lv, 2023); the emphasis on digitisation and innovative technologies to improve the efficiency and flexibility of production can thus aim to achieve the principles of social justice and sustainability. Technological innovation, guided by the human-centric view, enables industry to provide services to humanity in the long term (Huang et alii, 2022) in a context in which the industrial sector emerges as a significant contributor to greenhouse gas emissions and pollutants in the atmosphere; for this reason, it becomes necessary to carefully examine it from an energy perspective and according to Facciolongo (2018), climate neutrality is achievable by innovating energy production and consumption patterns, rather than simply limiting consumption.

The 'smart factory' concept relies on the new factory-man ecosystem that exposes information about building and production process management and comfort, optimising the resources used to reduce waste production and climate-changing emissions (Romano et alii, 2022). The 'management of the obsolescence of the architectural work' and

its 'life cycle' represent inescapable necessities of a significant conceptual and operational 'extension' of the architectural project itself towards a dimension of human responsibility for the management of the anthropised environment, exploiting digital services (Giallocosta, 2019; Lauria and Azzalin, 2021) Big data, Digital Twins (DTs) and Artificial Intelligence (AI) algorithms can all serve to achieve information requirements helpful to final users (Ryalat, ElMoaqet and AlFaouri, 2023).

Specifically, adopting platforms based on Energy Digital Twins (EDTs; Yu et alii, 2022) defines a new idea of a factory where data becomes visible through graphical interfaces by exploiting interoperability. Its application, combined with smart sen-

sors, can lead to a management and maintenance system of the building and all its technical and technological components towards predictive and programmed approaches (Dejaco et alii, 2022). In this context, interoperability procedures to transfer data from a proprietary modelling platform (BIM authoring) to specific analysis platforms (Building Energy Models – BEMs) offer numerous insights into the issue of data sharing and reliability (Maiezza, 2019). Comparing data from sensors measuring the physical world with those derived from a simulation belonging to the digital world raises several questions related to the level of detail and reliability of digital components (Jung et alii, 2023).

The research aims to consider the BIMtoBEM

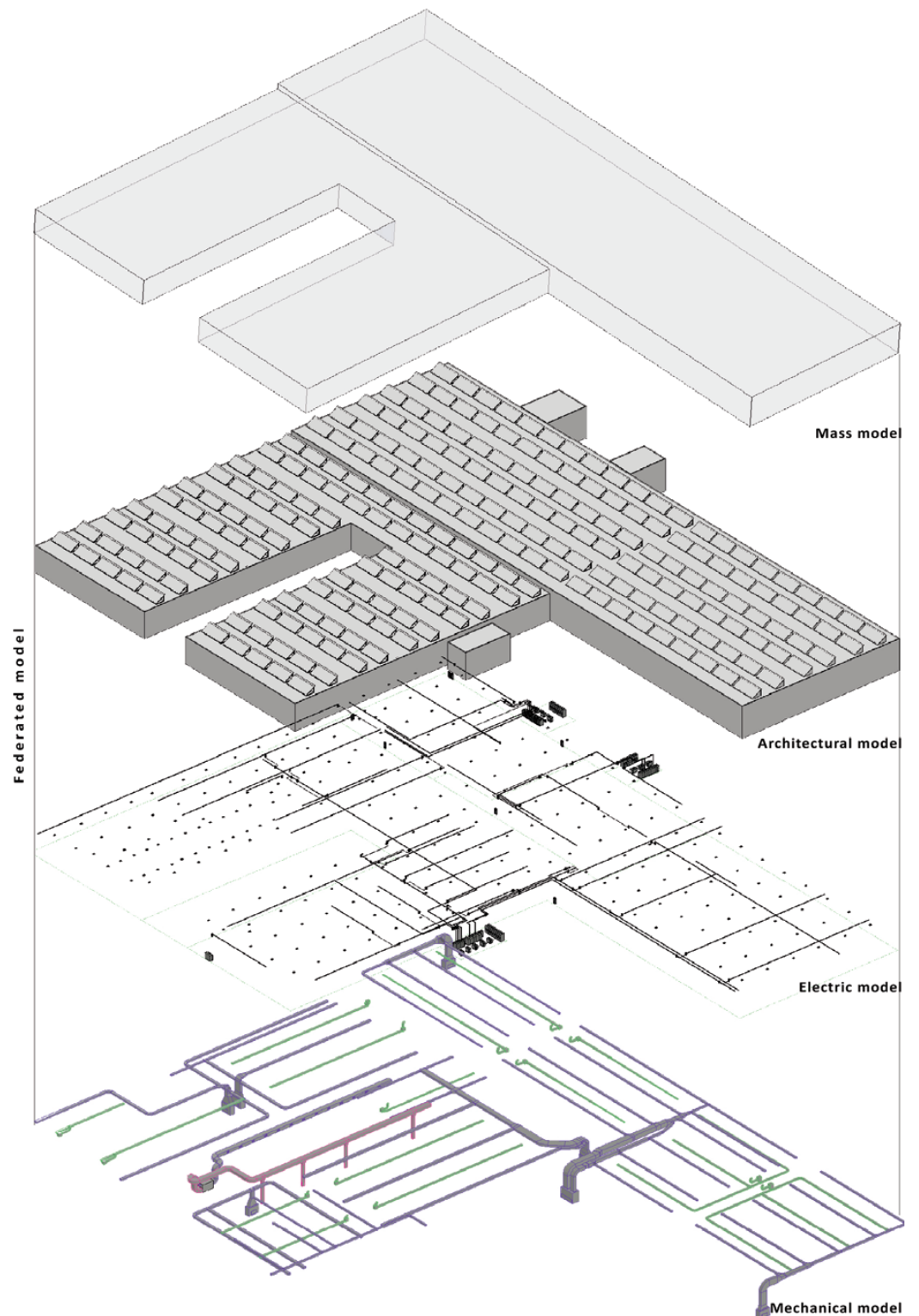
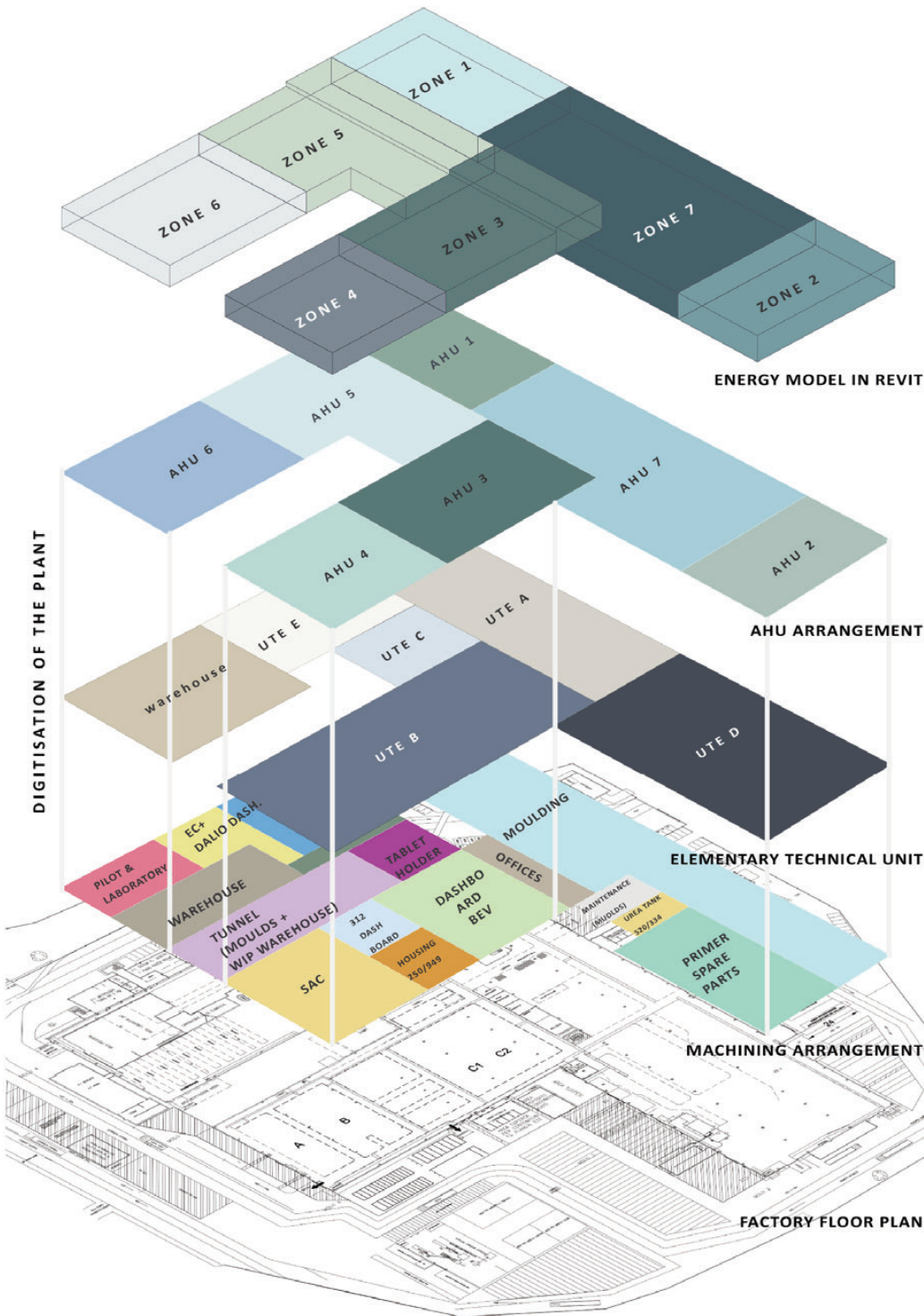


Fig. 9 | Federated BIM Domain (credit: the Authors, 2024).



procedure as a semi-automatic activity capable of generating different scenarios aimed at human-centred decision-making via a graphical interface. The methodological innovation consists of reducing the number of scientifically established steps; by exploiting various export formats and new software implementations, it is possible to optimise production scenarios with lower use of resources. Finally, the contribution investigates the reliability of the proposed simulations, implementing visualisation systems such as digital dashboards and Extended Reality (XR) systems, placing man at the centre of the proposed methodological flow.

State-of-the-art | Established methodologies for energy analysis rely on a well-defined pathway with numerous critical points that significantly increase calculation time and require highly qualified resources. The methodology we plan to explore begins with an analysis of the criticalities of a classical route. As illustrated in Figure 2, the steps to obtain an energy simulation start with model generation on a BIM authoring programme and continue with the export in .gbxml or .ifc format to the different simulation software to evaluate its energy performance. Since the summary of results and simulations comes in tables, text files, or .html format, it is convenient to implement visualisation systems that facilitate users' interpretation of data. The state-of-the-art and case studies in the literature show how BIMtoBEM methodology applies in the construction and industrial sectors, especially in the residential (Bastos Porsani et alii, 2021) or public building sectors (Jung et alii, 2023).

A comparison of the different studies in the literature shows that enrichment of energy information is necessary for achieving model calibration, while the main critical issues lie in the export of geometries and information. With this in mind, the contribution aims to describe an innovative methodology based on new visualisation systems capable of resolving the criticalities that have emerged using a widely established methodology. The methodology allows for shorter BEM model enrichment times and the possibility to interact with the model by interpreting the results readily, freeing one from the problems associated with exporting and using energy software. Innovation comes from a direct calculation engine in the latest versions of the BIM creation software, which allows energy simulations in different scenarios and configurations. Digital dashboard systems or XR systems ensure simple interpretation of reports in .html format of simulation results by several users (Fig. 3).

The innovation of the proposed method focuses on the ability to evaluate and act on the model through the interpretation of the results: the fundamental difference to the traditional methodology is the considerable reduction in simulation time and available resources (Fig. 4). The critical aspect of the analysed method lies in the reliability of the simulation results caused by not using specific energy simulation software. However, having found the most efficient model configuration, it is possible to export it and carry out detailed simulations: directly exporting the model's best energy solution con-

Fig. 10 | BEM Domain (credit: the Authors, 2024).

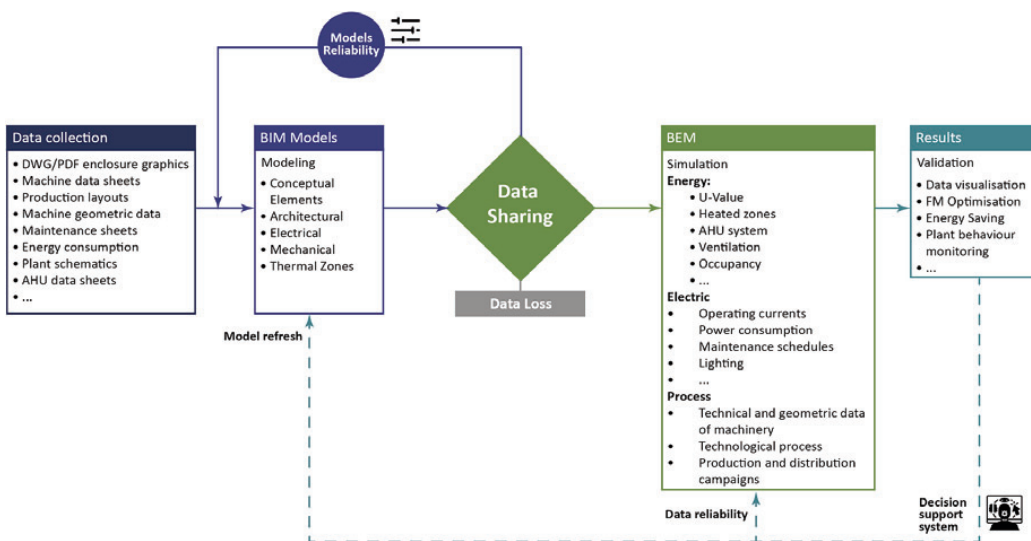


Fig. 11 | BIMtoBEM methodological scheme (credit: the Authors, 2024).

tributes to a reduction in time compared to the traditional process and a considerable increase in the reliability of the results.

Methodology and research steps | Starting the transition to Industry 5.0 requires the creation of a detailed digital representation of the building, a fundamental process that starts with the exhaustive collection of data (Maiezza, 2019). This initial phase is a complex and laborious process, involving considerable challenges and time costs (Sriyolja, Harwin and Yahya, 2021). The research and development of the methodology reported in this paper is funded by the National Resilience Plan through the research project MANufacturing Automotive Green Evolution 5.0 (Manage5.0), based on the effective development of the DT of an industrial plant (Fig. 5), which is a crucial tool for the advancement towards Industry 5.0. Applying the methodology to the case study highlighted how human-centredness is essential for sustainability and climate neutrality.

The management scheme (Fig. 6) describes the centrality of the human action of observing, planning and acting by mitigating and adapting one's behaviour, defining a strategy based on the interaction between the physical and digital world through the User eXperience (UX), exploiting a DT. The use of UX-oriented devices enables visualisation, monitoring and interaction with different digital scenarios (Fig. 7). XR concepts influence cost, time and resource usage in the management phases of installed systems (Namjoshi and Rawat, 2022).

The main concepts of Industry 5.0 lie in human-machine interaction, the ability to interoperate with the available technologies and use them to adapt production to human needs, which is why a digital model based on the concept of Human-centred Interaction (HCI) is needed. With the human being as the focal point of the model (Fig. 8), his perception, experience, and sensations will create the link between the physical and digital worlds. Furthermore, humans, in addition to enjoying the multiple benefits of the creation of a DT as the ability to monitor, visualise and manage different scenar-

ios, will have the opportunity to act and interact directly with it, thus creating a temporal continuum between man and machine (Tao et alii, 2022); in this way, graphical interfaces will be able to trigger mitigation and adaptation actions for resilience and sustainability. DT creation focuses on the possibility of receiving data from static and dynamic inputs and manipulating them to create graphical interfaces for plant-wide management (De Luca et alii, 2021).

This research consists of the phases of data collection, BIMtoBEM information flow, BEM simulation and visualisation of results to consolidate the described methodology and achieve the goals of sustainability, climate neutrality and Industry 5.0 principles.

Data Collection | The first phase involves data collection and exchange; the principal information for realising the model was found through the interaction between the digital construction management expert and the client, starting from the surveys carried out with traditional approaches and the possibility of using innovative acquisition technologies.

Primary input data comes from historical documentation, architectural factory data and the different IoT systems installed within the factory. The use of applications, dashboards and XR systems allow interaction with the virtual replica of the model. The interpretation of the digital model visualisation takes on different meanings depending on the type of user profile: maintenance teams, for example, will be able to monitor the components within the plant and assess the best approach for maintenance, reducing intervention times and risks at work. A model generated in this way provides added value to the industrial building.

Keeping up with changing regulatory requirements and technological innovations requires constant research and progressive solutions for data collection, management and analysis. There is often considerable confusion in the search for input data due to countless changes in the production layout that result in a low level of reliability (Massafra,

Predari and Gulli, 2022). Only a diligent and innovative approach to data collection ensures the success and longevity of DT in the context of Industry 5.0 (Boje et alii, 2023).

BIMtoBEM information flow | Following the detailed analysis phase of the criticality of the collected data, the second phase concerns the information flow following the construction of the BIM model and the BEM model. The DT platform we propose relies on heterogeneous static and dynamic data domains: a) the BIM domain, providing reliable technical record definition; the BEM domain, for energy assessments; and BIMtoBEM flow. The contribution concentrates on the BIMtoBEM process, focusing on the main aspects of energy efficiency and visualisation. The BIM data domain consists of the federation of conceptual, architectural and plant, electrical and mechanical models (Fig. 9). The use of the federated BIM model, produced with the Autodesk Revit platform, ensures data exchange between different professionals involved and allows the visualisation of interference between different installed systems (Russo Ermolli and Galluccio, 2019). The data from the BIM domain take in the thermophysical properties of the envelope and its thermal zones, the characteristics of the ventilation and air conditioning systems culminating in the development of BEMs models (Fig. 10) for the digitisation of the plant.

The BIMtoBEM flow (Fig. 11) starts with the acquisition of information requirements for the development of the BIM model and the subsequent transformation into a BEM model through an exchange of information guaranteed by the interoperability between models, software and databases (Del Giudice et alii, 2021). BEM model creation, which is beneficial for energy, electrical and process simulations, requires filtering of input data through data sharing. Creating a BEM model – useful for energy, electrical and process simulations – requires filtering of input data through Data Sharing. During this process, there is an evaluation of all the data shared by the different models, with the selection

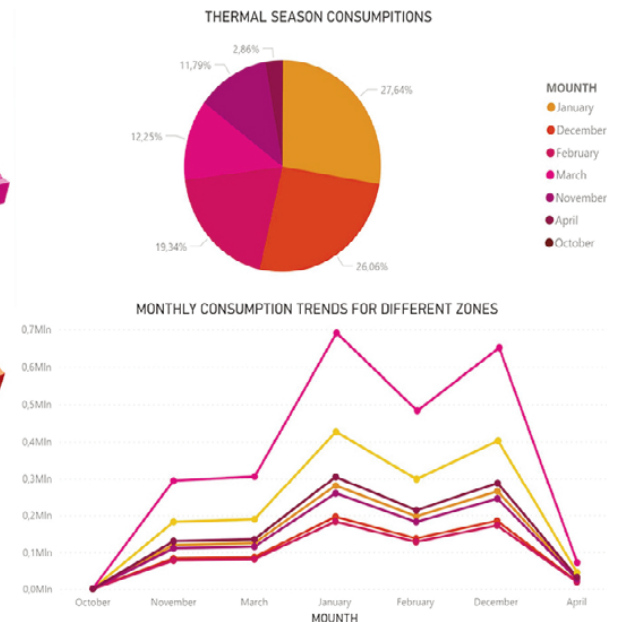
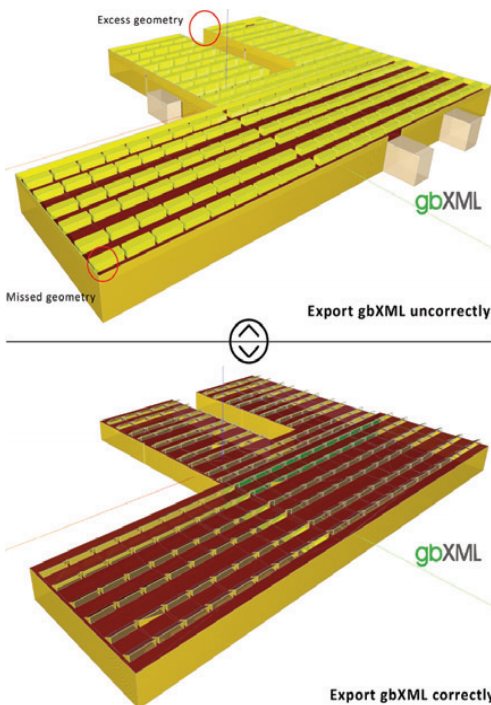


Fig. 12 | gbxml interoperability (credit: the Authors, 2024).

Fig. 13 | Digital dashboard concept for industrial management (credit: the Authors, 2024).

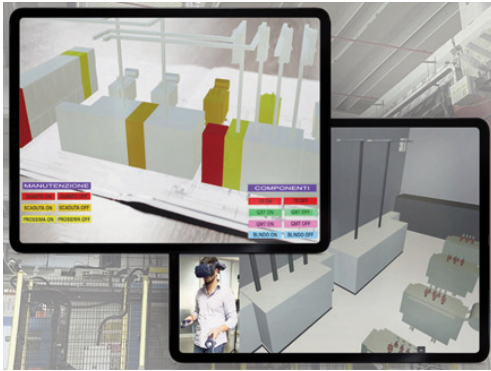


Fig. 14 | eXtended Reality for industrial plant management (credit: the Authors, 2024).

of those relevant to the BEM model and several simulation runs. The comparison of the information received from the BIM models makes it possible to identify inconsistencies in the realisation of the models: this allows calibration to take place, increasing the reliability of models and simulations, increasing the reliability of models and simulations (Saad and Eicker, 2023).

Several interoperability tests with different energy simulation software took place to validate the reliability of the proposed methodology (Bastos Porsani et alii, 2021) by exporting the model in Green Building XML (.gbxml). The tests confirmed the criticality and high time required to correctly export all the geometries in the model (Fig. 12).

BEM simulations | The BEM simulation, following the export and enrichment of the model with the energy parameters, was processed through the use of EnergyPlus, one of the most high-performance and widely used energy calculation engines in the industry (Di Biccari et alii, 2022). The different parameters set in the energy model are the level of infiltration, occupancy, ventilation and the configurations of the various thermal zones in the plant. The calibration of the model, to obtain a thin margin between actual and simulated energy consumption and to increase the reliability of the simulations, was based on the customisation of the climate file in the EnergyPlus Weather format, i.e. .epw (Moradi et alii, 2023). The enrichment of information significantly increases the reliability of simulation outcomes while at the same time significantly increasing the simulation time and the difficulty of reading the data. The interpretation and understanding of simulation results vary depending on the type of user interfacing with the visualisation systems.

Constructing a DT also allows simulations concerning the different plant installations possible. The electrical simulations undertaken in the case study

under examination focus on the maintenance and management aspects of the plant's various installations, lighting analysis and the monitoring of energy flows in the building. Finally, it is possible to recreate scenarios relating to managing processes and products within the plant. Following the procedure, it can easily visualise data and scenarios, manage building maintenance and develop energy efficiency and monitoring scenarios for different energy carriers. The decision, the critical aspect and the user experience become integral in increasing the reliability of simulations (Chong, Gu and Jia, 2021), the continuous updating of models and the development of human-centred concepts related to Industry 5.0.

Results | An ecosystem where humans mediate between the visualisation interfaces and the model allows for a digital twin based on actuators and artificial intelligence to connect the natural world to the building (Ratti and Belleri, 2020). The present study proposes a methodology for conducting energy simulations of the plant, intending to facilitate the interpretation of results through the use of innovative digital dashboards and reduce simulation time; this allows for the adaptation of decision-making processes related to different production layouts to mitigate energy consumption (Zheng et alii, 2023).

An example of a digital dashboard (Fig. 13) depicts a possible graphic interface of the production layout. Different thermal areas in the model are themed to represent the energy consumption generated by the free heat input, processing and accounting for hourly variations in the HVAC system. HCI depends on the type of user who interfaces with the visualisation of this data. The awareness of the operator, the engineering solutions that the facility manager can provide or the investment choices made by the controlling company can be some of the interactions that can take place between the display and the digital twin (Pan et alii, 2023).

The second aspect addressed concerns the use of XR systems. Augmented Reality scenarios allowing modelled plant components to display the actual world over the digital world came into play. Figure 14 shows a possible interaction with the electrical cabin components, applying automation to maintenance management by exploiting thematic filters. The user experience focuses on component management and the ability of the facility manager to safely explain to operators the necessary operations, which can lead to a reduction in resources, materials and emissions due to inefficient maintenance management. Similarly, using Virtual Reality (Cárdenas-Robledo et alii, 2022), it is possible to create immersive scenarios to visualise, interact and communicate maintenance interventions, mon-

itor key device parameters and safely train maintenance teams.

Conclusions | The digital transformation era imposes a paradigm shift in the construction industry, influenced by climate change that stresses natural and artificial ecosystems. The digital ecosystem described in the contribution assumes a leading role in sustainable innovation and circular economy, supporting companies, organisations and Institutions to reduce operating costs, optimise resource use and decrease carbon footprint (Terenzi, 2022). The potential of Digital Twins and the achievement of Industry 5.0 goals suffer from the immaturity of the markets and the difficulty of reaching different users. Future developments hinge on the possibility of modifying data directly on the model through the visualisation systems proposed in the methodology, centralising the user even more in the flow.

In addition, developing AI systems can aid interaction and utilisation by the designer and users who interface with visualisation systems (Paciotti and Di Stefano, 2021). Use Industry Foundation Classes (.ifc), for model export in XR simulation and visualisation aspects. The use of this format for data exchange is among the most widespread in the world: there are several automations, based on the export of the model in this format, for enriching the Energy Analysis Model (EAM) and improving the efficiency of the BEM simulation (Ramaji, Messner and Mostavi, 2020).

One of the main differences between the .gbxml and .ifc formats lies in the possibility of exporting the different systems within the plant, such as the Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system. Exporting the model in .ifc format and using algorithms can enrich the transition model and reduce modelling and simulation time (Hang and Jiansong, 2023).

This contribution shows the potential of information modelling for prototyping energy efficiency scenarios by applying graphical interfaces. The hope lies in man's ability to mitigate and exploit the proposed innovations to achieve the goal of climate neutrality. This methodology achieves the main features of Industry 5.0 through the human-machine interaction made possible by the visualisation systems described and the possibility of updating the digital model. The same methodology might apply to other contexts where humans must or want to become part of the model.

The core role in implementing Digital Twins in industry and beyond facilitates the management of the built environment towards climate neutrality and achieving a sustainable ecosystem despite operational difficulties in digitising the built heritage.

Acknowledgements

The Authors would like to thank the MANAGE 5.0 project, funded by the Ministry of Economic Development – MISE (PNRR – Complementary Plan).

References

Bastos Porsani, G., Del Valle de Lersundi, K., Sánchez-Ostiz Gutiérrez, A. and Fernández Bandera, C. (2021), "In-

teroperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Model (BEM)", in *Applied Sciences*, vol. 11, issue 5, article 2167, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app11052167 [Accessed 24 March 2024].

Boje, C., Hahn Menacho, Á. J., Marvuglia, A., Benetto, E., Kubicki, S., Schaubroek, T. and Navarrete Gutiérrez, T. (2023), "A framework using BIM and digital twins in facilitating LCSA for buildings", in *Journal of Building Engineering*, vol. 76, article 107232, pp. 1-21. [Online] Avail-

able at: doi.org/10.1016/j.jobee.2023.107232 [Accessed 24 March 2024].

Cárdenas-Robledo, L. A., Hernández-Urbe, Ó., Reta, C. and Cantoral-Ceballos, J. A. (2022), "Extended reality applications in industry 4.0 – A systematic literature review", in *Telematics and Informatics*, vol. 73, article 101863, pp. 1-39. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.tele.2022.101863 [Accessed 24 March 2024].

Chong, A., Gu, Y. and Jia, H. (2021), "Calibrating building energy simulation models – A review of the basics to

- guide future work”, in *Energy and Buildings*, vol. 253, article 111533, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111533 [Accessed 24 March 2024].
- De Luca, D., Dettori, M., Del Giudice, M. and Osello, A. (2021), “Connected BIM Models Towards Industry 4.0”, in Del Giudice, M. and Osello, A. (eds), *Handbook of Research on Developing Smart Cities Based on Digital Twins*, IGI Global, pp. 219-242. [Online] Available at: doi.org/10.4018/978-1-7998-7091-3.ch011 [Accessed 24 March 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 24 March 2024].
- Del Giudice, M., Dettori, M., Magnano, S. and Osello, A. (2021), “A BIM to BEM approach for data exchange: advantages and weaknesses for industrial buildings energy assessment”, in Semenov, V. and Scherer, R. J. (eds), *ECPPM 2021 – eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction – Proceedings of the 13th European Conference on Product and Process Modeling, 15-17 September 2021, Moscow*, CRC Press, pp. 98-105. [Online] Available at: doi.org/10.1201/9781003191476 [Accessed 24 March 2024].
- Di Biccari, C., Calcerano, F., D’Uffizi, F., Esposito, A., Campari, M. and Gliarelli, E. (2022), “Building information modeling and building performance simulation interoperability – State-of-the-art and trends in current literature”, in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 54, article 101753, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aei.2022.101753 [Accessed 24 March 2024].
- European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 24 March 2024].
- Facciolongo, A. (2018), *Paesaggi e Marginalità – Etica ed Estetica del Terzo Paesaggio*, Mimesis, Milano-Udine.
- Fatta, F. (2020), “Le molte dimensioni del modello digitale | The many dimensions of the digital model”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 7, pp. 16-25. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/722020 [Accessed 24 March 2024].
- Ghenai, C., Alhaj Husein, L., Al Nahlawi, M., Hamid, A. K. and Bettayeb, M. (2022), “Recent trends of digital twin technologies in the energy sector – A comprehensive review”, in *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 54, article 102837, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.seta.2022.102837 [Accessed 24 March 2024].
- Giallocosta, G. (2019), “Caratteri e criticità di innovazione di processo | Features and critical issues of process innovations”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 5-10. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/512019 [Accessed 24 March 2024].
- Hang, L. and Jiansong, Z. (2023), “Improving IFC-Based Interoperability between BIM and BEM Using Invariant Signatures of HVAC Objects”, in *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 37, issue 2, article 0402059, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001063 [Accessed 24 March 2024].
- Huang, S., Wang, B., Li, X., Zheng, P., Mourtzis, D. and Wang, L. (2022), “Industry 5.0 and Society 5.0 – Comparison, complementation and co-evolution”, in *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, pp. 424-428. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.07.010 [Accessed 24 March 2024].
- Jung, D. E., Kim, S., Han, S., Yoo, S., Jeong, H., Lee, K. H. and Kim, J. (2023), “Appropriate level of development of in-situ building information modeling for existing building energy modeling implementation”, in *Journal of Building Engineering*, vol. 69, article 106233, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2023.106233 [Accessed 24 March 2024].
- Lauria, M. and Azzalin, M. (2021), “Paradigmi | Paradigms”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 12-21. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/912021 [Accessed 24 March 2024].
- Lv, Z. (2023), “Digital Twins in Industry 5.0”, in *Research*, vol. 6, article 0071, pp. 1-17. [Online] Available at: spj.science.org/doi/abs/10.34133/research.0071 [Accessed 24 March 2024].
- Ma, J., Yang, L., Wang, D., Li, Y., Xie, Z., Lv, H. and Woo, D. (2024), “Digitalization in response to carbon neutrality – Mechanisms, effects and prospects”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 191, article 114138, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2023.114138 [Accessed 24 March 2024].
- Maiezza, P. (2019), “As-built reliability in architectural HBIM modeling”, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W9, pp. 461-466. [Online] Available at: doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-461-2019 [Accessed 24 March 2024].
- Massafra, A., Predari, G. and Gulli, R. (2022), “Towards digital twin driven cultural heritage management – A HBIM-based workflow for energy improvement of modern buildings”, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVI-5/W1-2022, pp. 149-157. [Online] Available at: doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-149-2022 [Accessed 24 March 2024].
- Massari, G. A., Barbini, A., Bernardini, E. and Roman, O. (2022), “Riqualificazione energetica dell’edilizia esistente – Modellazione e gestione geometrico-informativa | Energy retrofitting of existing buildings – Geometric-informative modelling and management”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 146-157. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12132022 [Accessed 24 March 2024].
- Moradi, A., Kavgić, M., Costanzo, V. and Evola, G. (2023), “Impact of typical and actual weather years on the energy simulation of buildings with different construction features and under different climates”, in *Energy*, vol. 270, article 126875, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.energy.2023.126875 [Accessed 24 March 2024].
- Namjoshi, J. and Rawat, M. (2022), “Role of smart manufacturing in industry 4.0”, in *Materials Today | Proceedings*, vol. 63, pp. 475-478. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.620 [Accessed 24 March 2024].
- Paciotti, D. and Di Stefano, A. (2021), “Design generativo e prodotto industriale – Connettere la dimensione fisica/digitale del progetto | Generative design and industrial product – Connecting physical/digital dimensions of the project”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 158-167. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/10142021 [Accessed 24 March 2024].
- Pan, Y., Zhu, M., Lv, Y., Yang, Y., Liang, Y., Yin, R., Yang, Y., Jia, X., Wang, X., Zeng, F., Huang, S., Hou, D., Xu, L., Yin, R. and Yuan, X. (2023), “Building energy simulation and its application for building performance optimization – A review of methods, tools, and case studies”, in *Advances in Applied Energy*, vol. 10, article 100135, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100135 [Accessed 24 March 2024].
- Ramaji, I. J., Messner, J. I. and Mostavi, E. (2020), “IFC-Based BIM-to-BEM Model Transformation”, in *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 34, issue 3, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000880 [Accessed 24 March 2024].
- Ratti, C. and Belleri, D. (2020), “Verso una cyber-ecologia | Towards a cyber ecology”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 8-19. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/812020 [Accessed 24 March 2024].
- Romano, R., Belardi, E., Gallo, P. and Distefano, D. L. (2022), “Sistemi costruttivi low-tech 4.0 – Innovazione di prodotto-processo BIM-based per la prefabbricazione in cartone ondulato | 4.0 low-tech building systems – BIM-based product-process innovation for corrugated cardboard prefabrication”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 158-167. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12142022 [Accessed 24 March 2024].
- Russo Ermolli, S. and Galluccio, G. (2019), “Industrializzazione Edilizia e Prefabbricazione tra Materialità e Immaterialità | Building Industrialization and Prefabrication between Materiality and Immateriality”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 93-100. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5102019 [Accessed 24 March 2024].
- Ryalat, M., ElMoaqet, H. and AlFaouri, M. (2023), “Design of a Smart Factory Based on Cyber-Physical Systems and Internet of Things towards Industry 4.0”, in *Applied Sciences*, vol. 13, issue 4, article 2156, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app13042156 [Accessed 24 March 2024].
- Saad, M. M. and Eicker, U. (2023), “Investigating the reliability of building energy models – Comparative analysis of the impact of data pipelines and model complexities”, in *Journal of Building Engineering*, vol. 71, article 106511, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2023.106511 [Accessed 24 March 2024].
- Sriyolja, Z., Harwin, N. and Yahya, K. (2021), “Barriers to Implement Building Information Modeling (BIM) in Construction Industry – A Critical Review”, in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 738, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/738/1/012021 [Accessed 24 March 2024].
- Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J. and Ji, P. (2022), “Digital twin modelling”, in *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, pp. 372-389. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015 [Accessed 24 March 2024].
- Terenzi, B. (2022), “Design vs Disegno – Reale vs Virtuale – Il Digital Twin come approccio olistico alla sostenibilità | Design vs Disegno – Real vs Virtual – The Digital Twin as a Holistic Approach to Sustainability”, in *disegno | Biannual Journal of the UID*, n. 11, pp. 159-170. [Online] Available at: doi.org/10.26375/diseigno.11.2022.17 [Accessed 24 March 2024].
- WEF – World Economic Forum (2022), “A digital silver bullet for the world – Digitalization”, in *weforum.org*, 19/05/2022. [Online] Available at: weforum.org/agenda/2022/05/a-digital-silver-bullet-for-the-world/ [Accessed 24 March 2024].
- Yu, W., Patros, P., Young, B., Klinac, E. and Walmsley, T. G. (2022), “Energy digital twin technology for industrial energy management – Classification, challenges and future”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, article 112407, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2022.112407 [Accessed 24 March 2024].
- Zaffagnini, T. and Palmi, O. (2022), “Retrospective e prospettive sul rapporto tra progetto, tecnologia e neocibernetica | Past and future of the connection between project, technology and neocybernetics”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 24-35. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/122022 [Accessed 24 March 2024].
- Zheng, P., Liu, J., Liu, P. and Nakanishi, Y. (2023), “An optimal operational scheduling model for energy-efficient building with dynamic heat loss prediction”, in *Energy and Buildings*, vol. 280, article 112735, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112735 [Accessed 24 March 2024].