

# Il paradigma del gemello digitale a supporto del monitoraggio della qualità dell'aria interna

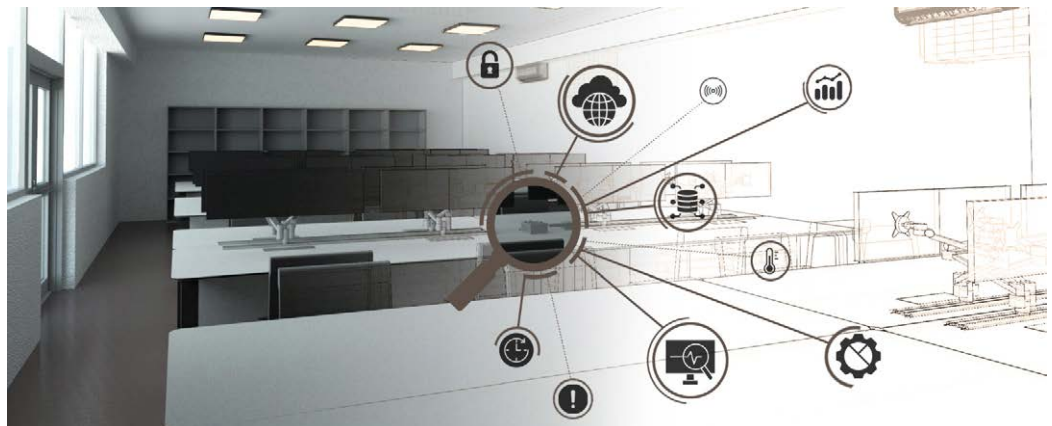
Caterina Gabriella Guida  
Lorena Centarti  
Paula Barboza  
Neri Edgardo Güidi

## Abstract

Il gemello digitale (DT), tendenza emergente nel processo di digitalizzazione dell'Industria 4.0 e delle innovazioni future, ha trovato ampia applicazione in diversi settori. Tuttavia, la sua adozione nel settore delle costruzioni rimane limitata, ostacolata dalla difficoltà di integrazione e visualizzazione dell'elevata quantità di dati dinamici acquisiti in tempo reale. In particolare, nel caso degli ambienti interni gli attuali metodi di monitoraggio risultano tuttora inefficaci a causa della mancanza di standardizzazione, della carenza di informazioni spaziali e dell'assenza di interfacce di visualizzazione dei dati. Per rispondere a questa necessità, il presente lavoro propone una metodologia improntata sulla creazione di un gemello digitale, ottenuto mediante l'integrazione automatizzata di sistemi di acquisizione IoT a basso costo con un modello parametrico BIM. Il modello così elaborato risulta uno strumento affidabile e pratico per misurare, organizzare e visualizzare dati dinamici, facilitando la gestione efficiente durante la fase operativa e in grado di supportare un monitoraggio intelligente delle condizioni ambientali interne. Consente inoltre l'automatizzazione di alcune procedure atte a garantire il comfort degli occupanti e l'ottimizzazione del consumo energetico.

## Parole chiave

*Indoor Air Quality, Digital Twin, Internet of Things, Building Information Modeling, Point Cloud*



Il sistema di sensori IoT costituisce l'elemento congiuntivo tra realtà fisica dell'aula universitaria (a sinistra) e la sua controparte digitale (a destra), abilitando un sistema di monitoraggio integrato della qualità ambientale interna. Elaborazione degli autori.

## Introduzione

Il *Building Information Modeling* (BIM) ha trasformato i flussi di lavoro quotidiani, offrendo un valido supporto per la catalogazione di un'enorme quantità di informazioni utili a migliorare il processo di progettazione, costruzione e gestione degli edifici. Attualmente il settore dell'architettura, dell'ingegneria, delle costruzioni e delle operazioni (AECO) è orientato verso l'impiego di nuove tecnologie emergenti, quali il Digital Twin (DT), l'*Internet of Things* (IoT), i *Big Data*, il *Cloud Computing* e l'*Artificial Intelligence* (AI), per estendere le capacità del BIM [Baghalzadeh Shisheghar-khaneh et al. 2022]. Un'area in cui tale attenzione è stata focalizzata, con l'obiettivo di trasformare le pratiche esistenti di gestione patrimoniale su base documentale in processi automatizzati incentrati sui dati, è l'impiego del *Digital Twin* per il *Facility Management* (FM) [Shahzad et al. 2022; Siccardi et al. 2022].

Il Digital Twin, concepito da Grieves, è inteso come replica virtuale dell'asset fisico che interconnette le due entità con un flusso bidirezionale di informazioni in tempo reale [Grieves 2014, pp. 1–7], in grado di rispecchiare il comportamento reale dell'oggetto di studio, prevederne lo stato di salute e le prestazioni attese (fig. 1). Accade spesso che la scarsa accessibilità alle informazioni relative al funzionamento degli edifici causi profonde difficoltà nella pianificazione di interventi adeguati.

La proliferazione di dispositivi IoT ha portato alla generazione di grandi quantità di Big Data non strutturati, spesso ingovernabile e difficile da interpretare in modo efficace [Gandomi et al. 2015, pp. 137–144]. Sebbene vengano impiegati sensori automatizzati, un ostacolo al loro efficace utilizzo è la mancanza di contesto spaziale dell'ambiente costruito [Mannino et al. 2021].

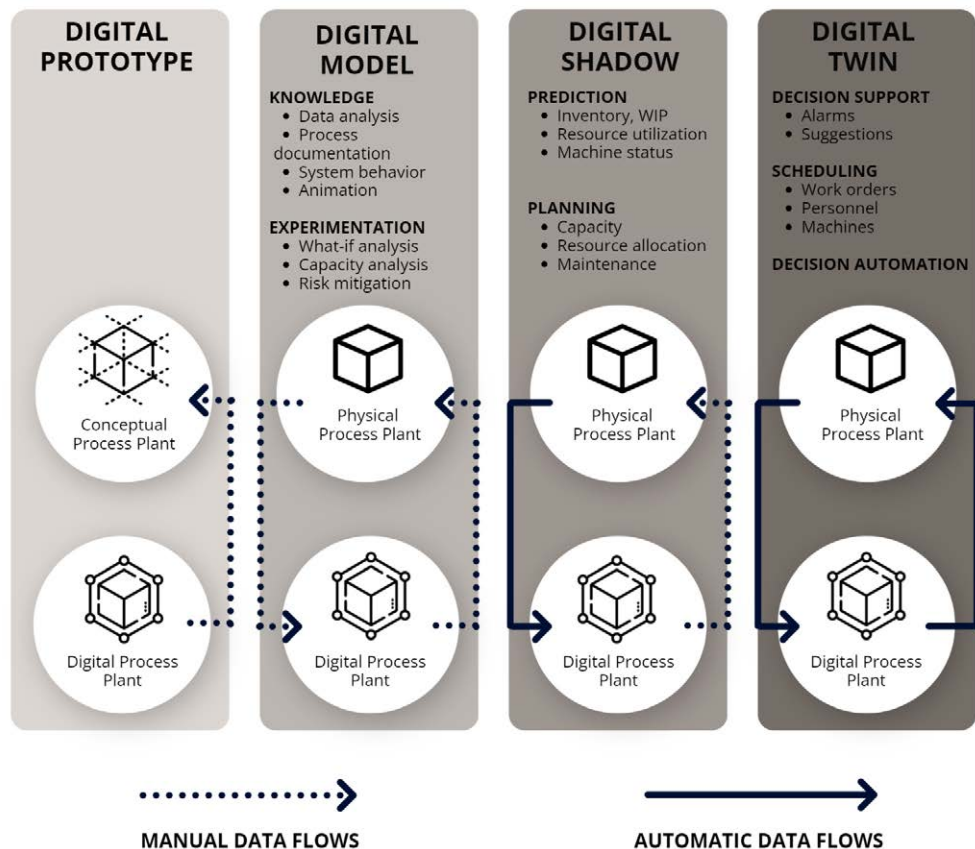


Fig. 1. Dal Digital Prototype al Digital Twin: flusso di dati tra mondo reale e mondo digitale. Elaborazione degli autori.

Il BIM si pone come interfaccia per l'implementazione dei dati IoT, determinando una convergenza dei dati definita *Internet degli Edifici* (IoB) [Miller et al. 2021]. Tuttavia, il carattere statico delle informazioni in esso contenute mal si adatta alle necessità di FM. L'integrazione del BIM e dell'IoT promette di far passare l'industria delle costruzioni da orientata al prodotto a quella orientata al servizio, migliorando la trasparenza e gestione del costruito. Per superare il principale limite di questa metodologia creando una modalità coerente di organizzazione e interpretazione di grandi quantità di dati, ci si pone sfide tecnologiche e di interoperabilità [Deng et al. 2021, pp. 58–83].

Studi recenti hanno sottolineato il ruolo dell'*Internal Environment Monitoring* (IEM) – un processo di valutazione e analisi continua delle condizioni ambientali interne, quali la *Indoor Air Quality* (IAQ) e il comfort termico – nella gestione degli edifici per garantire la salute, la sicurezza, soddisfazione e produttività degli occupanti, e nel favorire l'ottimizzazione dell'efficienza energetica [Hu et al. 2024]. La pandemia di COVID-19 ha ulteriormente evidenziato l'importanza di garantire la salubrità negli ambienti chiusi, ove trascorriamo mediamente il 90% della giornata [Cai et al. 2023, pp. 300–318]. Sebbene l'interesse verso l'impiego di gemelli digitali intesi come strumenti per abilitare nuove funzionalità e servizi nella gestione intelligente degli edifici sia in crescita, il tema del monitoraggio della salubrità degli ambienti interni è ancora in una fase iniziale di ricerca e sviluppo [Opoku et al., 2024]. Pur fornendo una comprensione approfondita del suo quadro teorico, ci sono stati sforzi limitati per affrontare le implicazioni fondamentali della sua implementazione attraverso analisi dei casi d'uso [Arsiwala et al. 2023, pp. 112851].

In questo contesto, l'utilizzo efficace dei dati in tempo reale è imprescindibile, soprattutto negli edifici ad alte prestazioni dotati sistemi di Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) che, a causa del loro comportamento non lineare e delle interazioni ambientali stocastiche, richiedono una gestione dinamica per ottimizzare le prestazioni energetiche. Inoltre, gli HVAC rappresentano la maggior parte del consumo energetico degli edifici pubblici, la cui efficienza dipende fortemente dalle strategie di controllo adottate [Vering et al. 2019, pp. 1304–1310]. Per promuovere strategie innovative di controllo e manutenzione per un sistema IEM che sia efficiente, oggettivo ed economicamente vantaggioso, è stato applicato il framework del DT all'Aula Modelli, spazio didattico adiacente al Laboratorio Modelli del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Salerno (fig. 2).



Fig. 2. Vista esterna ed interna dell'Aula Modelli presso l'Università degli Studi di Salerno. Elaborazione degli autori.

Questo spazio didattico presenta una variabilità significativa del numero di occupanti e condizioni strutturali complesse: situato parzialmente controterra e dotato di ampie finestrate con esposizione sud-ovest, risente di evidenti problemi di umidità e di variazioni significative dei parametri ambientali.

Tali condizioni strutturali, combinate con la presenza di due impianti di condizionamento dell'aria non centralizzati, rendono particolarmente complessa la gestione ottimale del ricambio d'aria. Assicurare condizioni ottimali di salubrità dell'aria è essenziale, poiché la qualità dell'aria interna e il comfort termico influenzano significativamente l'attenzione, il benessere e la produttività degli occupanti. Attraverso l'implementazione su piccola scala, è proposta una procedura per la creazione di un DT basata su standard di comunicazione aperti. Al fine di implementare il sistema di gestione attuale, sono stati installati appositi sensori IoT che misurano i parametri ambientali necessari per il monitoraggio dell'IAQ, indispensabile per garantire il comfort degli ambienti interni. Sfruttando l'AI è possibile combinare i dati dei sensori, identificare pattern, anomalie e tendenze, per produrre informazioni intelligenti, integrate in un modello tridimensionale e visualizzabili in tempo reale su una piattaforma cloud.

### Materiali e metodi

Nel contesto del DT, ruolo nevralgico è svolto da dati dinamici che divengono equipollenti alle informazioni grafiche; è sviluppato un flusso di lavoro integrato (fig.3).

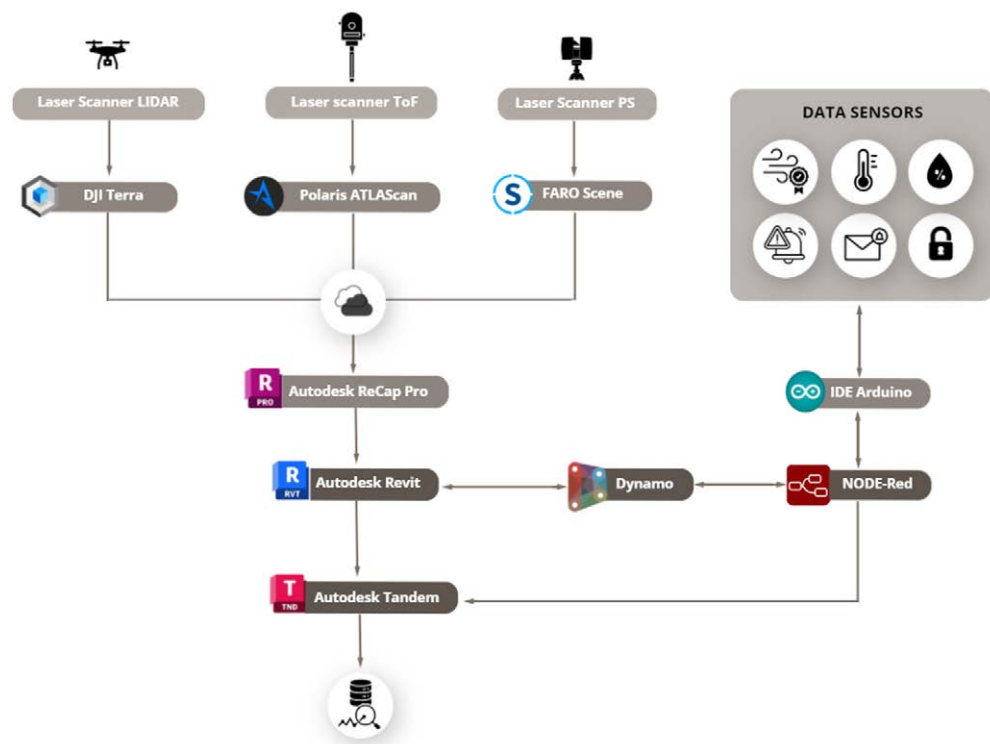


Fig. 3. Architettura del sistema proposto per la generazione di un Digital Twin adibito al monitoraggio di un ambiente interno. Elaborazione degli autori.

Per ottenere un modello metricamente affidabile per le operazioni di manutenzione e gestione, diventa indispensabile l'utilizzo di una metodologia *Scan-to-BIM* che prevede l'impiego del set di dati provenienti da un rilievo tridimensionale integrato dell'intero blocco del Laboratorio Modelli [Florio et al. 2020, pp. 2182–2192; Campagnolo et al. 2023, pp. 291–295].

Per l'acquisizione dell'esterno sono stati impiegati un UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), per il contesto in cui ricade l'edificio, e un *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) di tipo TOF, per la ripresa dei paramenti [Doria et al. 2022 pp. 367–374]. Con riferimento al volo UAV, i dati sono stati acquisiti mediante un *DJI Matrice 300* equipaggiato con sensore



DJI Zenmuse L1, comprendente un modulo LiDAR, una IMU e una fotocamera con un sensore CMOS da 20 megapixel con lunghezza focale di 8.8 mm e *pixel size* di 2.41  $\mu\text{m}$ . A causa dell'alta concentrazione di edifici adiacenti, per consentire la generazione di una nuvola di punti densa, completa e coerente, si sono resi necessari due piani di volo, uno nadir e l'altro obliquo, generando una nuvola di punti con densità media di 422 punti/m<sup>2</sup>.

Per l'acquisizione dei parametri esterni del blocco, è stato impiegato un Teledyne Optech POLARIS, registrando 6 scansioni. Per una corretta georeferenziazione delle nuvole, sono stati materializzati e misurati 8 target con un ricevitore GNSS (*Global Navigation Satellite System*), in modalità nRTK (*Network Real-Time Kinematic*) nel sistema di riferimento cartografico UTM/RND2008 e nelle quote ellissoidiche. I dati TLS degli esterni sono stati elaborati con il software proprietario *AtlaScan*, georeferenziando la nuvola di punti prodotta.

Per l'interno, è stato utilizzato il FAROX330, acquisendo 27 scansioni, generando una corrispondenza di dati tra interno e esterno, così da garantire il collegamento con le precedenti acquisizioni. Infine, la nuvola integrata è stata decimata ed esportata in Autodesk Recap (.rcp) (fig. 4).

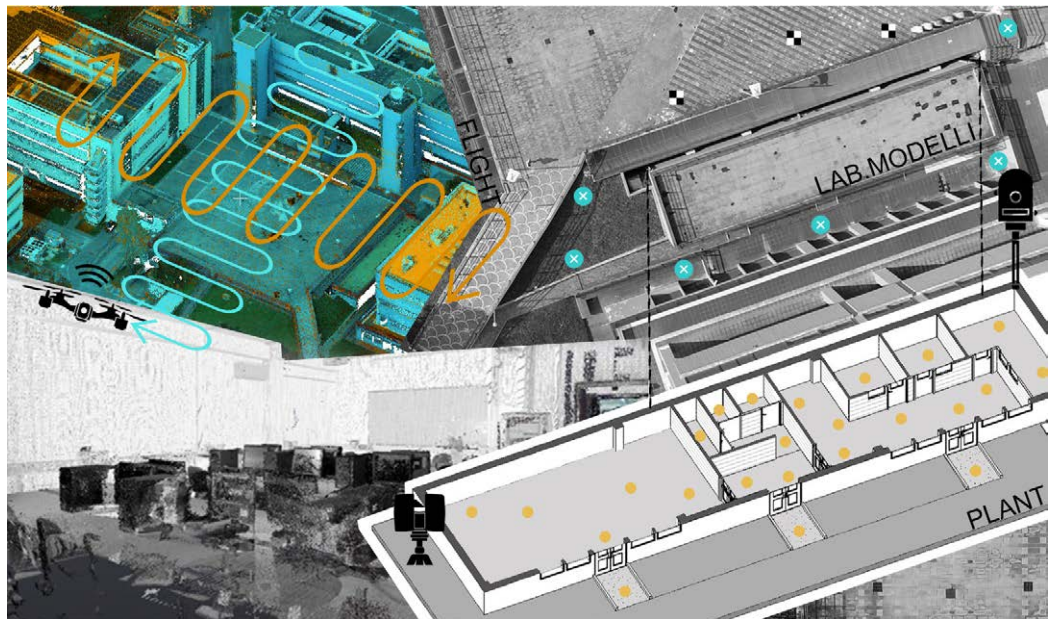


Fig. 4. Rilievo integrato ottenuto mediante Aerofotogrammetria da UAV, Laser Scanner a Tempo di volo e Laser Scanner a Differenza di Fase. Elaborazione degli autori.

Le tecnologie di acquisizione automatizzate dei dati progrediscono significativamente, sia come hardware che come *software*; è quindi proposto un sistema flessibile e personalizzabile per la lettura dinamica dei parametri ambientali, basato su strumenti open-source. L'architettura del sistema di monitoraggio delle condizioni interne dell'aula include sensori di umidità e temperatura DHT22 e sensori di gas MQ-135 e MQ-3 per il rilevamento della concentrazione di fumo e CO<sub>2</sub>. Questi sono collegati al modulo ESP32, microprocessore a basso consumo energetico con Wi-Fi integrato, programmato in IDE Arduino per acquisire dati in tempo reale. È previsto inoltre un lettore di scheda MicroSD per ovviare ad eventuali momentanee perdite di dati in caso di disconnessioni. La trasmissione dei dati al cloud richiede la conformità agli standard del protocollo di comunicazione del livello di rete, che include vari sottolivelli. In questo studio è stato scelto MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*), protocollo di messaggistica leggero open source, diventato uno standard per le applicazioni IoT [Yassein et al. 2016, pp. 1-4].

L'ESP32 raccoglie i dati dei sensori, li elabora in formato JSON e li pubblica tramite protocollo MQTT. Le informazioni sono elaborate da un servizio Node-Red, che monitora l'arrivo di nuovi dati sul canale MQTT, processandoli e visualizzandoli in una dashboard. Per garantire l'integrità e la sicurezza delle informazioni trasmesse, è implementata la crittografia TLS (*Transport Layer Security*). L'architettura del sistema include l'automazione di varie procedure, come l'accensione di LED che segnalano la necessità di ricorrere alla manuale apertura e chiusura di porte e finestre, nonché l'invio di avvisi ai gestori dell'impianto in caso di anomalie riscontrate (fig. 5).

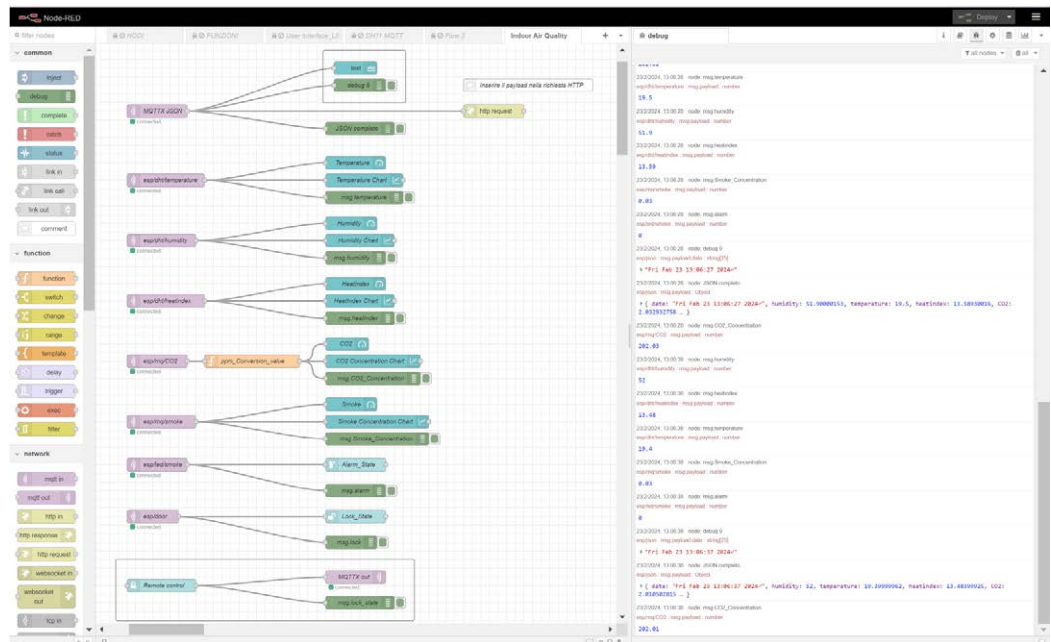


Fig. 5. Flusso Node-Red per la lettura dei dati *real-time* provenienti dai sensori ambientali, la visualizzazione sulla *dashboard* personalizzata e l'automatizzazione di processi. Elaborazione degli autori.

Ottenuti i dati geometrici tridimensionali e implementata l'architettura IoT per la lettura dinamica dei parametri ambientali, il modello informativo è stato quindi predisposto per raccogliere e correlare informazioni eterogenee, statiche e dinamiche. La strategia impiegata per la modellazione di ogni componente dell'edificio in ambiente Autodesk Revit 2023 ha previsto una fedele riproduzione geometrica e prestazionale di questi, secondo un livello di sviluppo del modello pari ad un LOD D, arricchito con informazioni relative alle proprietà termiche dei materiali, indispensabili per ottenere valutazioni ambientali affidabili.

In ambiente Autodesk Dynamo for Revit, attraverso le API (*Application Programming Interface*), è stato generato uno *script* tramite VPL (*Visual Programming Languages*) per la creazione automatica di parametri condivisi destinati a contenere in modo strutturato le informazioni dinamiche raccolte dai sensori IoT. I dati ambientali monitorati in loco sono attribuiti alla nuova famiglia 'Data Sensors' come parametri di istanza. Un nodo personalizzato, creato tramite *script Python*, effettua la lettura del file JSON tramite *broker* MQTT, automatizzando la procedura di popolamento dei parametri, graficizzandone l'andamento secondo un intervallo temporale definito dall'utente.

La qualità dell'aria interna è altamente variabile in base a umidità e temperatura, presenza di contaminanti, caratteristiche dell'edificio e l'attività degli occupanti [Nazaroff 2013, pp. 15–22]. A ciascun parametro viene attribuito un valore soglia, in accordo con le Linee Guida globali OMS sulla qualità dell'aria (AQGs) indoor. Quando la concentrazione di CO<sub>2</sub> supera i 1000 ppm, o quando temperatura e umidità non

rientrano nel range stagionale raccomandato, si attivano avvisi. È stata proposta una modalità di misurazione della qualità dell'aria interna mediante il calcolo dell'IAQI (Indoor Air Quality Index) per la CO<sub>2</sub>, basato sui limiti comfort stabiliti dall'ASHRAE, su una scala di valori da 1 a 5. L'ottimizzazione della visualizzazione dinamica dell'indice è realizzata mediante un filtro colorimetrico associato all'elemento fittizio 'controsoffitto'. Questo sistema permette di rilevare rapidamente situazioni in cui le condizioni di comfort non sono accettabili, consentendo interventi tempestivi. Per semplificare l'utilizzo dello script è stato utilizzato Dynamo Player, lettore *user-friendly* incluso nell'interfaccia Revit, che consente di importare la configurazione automatizzata dei parametri variabili monitorati in qualsiasi progetto.

Per la visualizzazione dei dati operativi è utilizzata Autodesk Tandem, piattaforma basata sul *cloud* che offre servizi API. Una volta importato il modello in formato .rvt o .ifc è possibile leggere, oltre alle proprietà del modello Revit, ulteriori dati dinamici caricabili come 'Streams', definendo una corrispondenza tra i parametri estratti dal percorso JSON specificato e i corrispondenti valori, trattati come *payload*. Il gemello digitale dell'Aula Modelli rende immediata l'interazione con il suo corrispondente reale e la modifica dinamica dei suoi parametri.

I flussi in *Tandem* archiviano i dati di serie temporali, consentendo al personale gestore dell'aula, di monitorare da remoto le condizioni ambientali e le fluttuazioni nel tempo, individuare tempestivamente le eventuali criticità, localizzando le anomalie, e avviando le azioni di ottimizzazione necessarie (fig.6).

## Conclusioni

La catalogazione e l'organizzazione di dati *real-time* sono cruciali per rappresentare con precisione la configurazione dell'edificio, riducendo il divario tra prestazioni previste ed effettive. La realizzazione del DT ha evidenziato varie sfide da affrontare. L'adozione della metodologia *Scan-to-BIM* è stata fondamentale per ottenere un modello georeferenziato e accurato, indispensabile per correlare i dati dinamici dei sensori IoT. Tuttavia, la gestione di grandi volumi di dati non strutturati rimane una sfida, richiedendo avanzate tecniche di analisi e integrazione.

L'implementazione di un sistema IoT basato su componenti economici e software *open-source* ha permesso di creare una soluzione flessibile e personalizzabile. L'integrazione del modello BIM con i dati IoT ha mostrato come sia possibile migliorare la gestione del comfort e della qualità dell'aria interna. Tramite un'unica piattaforma *cloud* sono automatizzati i processi di *back-end* per visualizzare avvisi e informazioni critiche, fornendo una dashboard intuitiva per misurare, monitorare e analizzare i dati in tempo reale.

Gli spazi universitari, caratterizzati da variabilità nel tasso di occupazione e da esigenze diversificate, rendono inefficaci i sistemi di condizionamento centralizzati, richiedendo soluzioni flessibili e adattabili. L'esperienza condotta su un'aula universitaria dimostra come ambienti digitali e tecnologie d'avanguardia possono offrire nuove modalità di gestione degli edifici, sintetizzando contenuti grafici e informativi, favorendo processi di monitoraggio dell'IAQ e ottimizzazione del comfort interno. Il sistema attuale prevede avvisi per il ricambio d'aria e notifiche al personale di manutenzione, e consente di regolare automaticamente i parametri ambientali tramite l'apertura e la chiusura di porte e finestre. L'integrazione di dispositivi automatizzati completerebbe l'automazione, eliminando la necessità di interventi manuali. Estendendo questo approccio, la gestione automatizzata ridurrebbe i costi operativi e l'analisi continua dei dati permetterebbe di pianificare interventi di manutenzione più mirati e tempestivi.

L'integrazione del modello geometrico-informativo con i dati dinamici e i progressi nel campo dell'AI, sfruttando un'interfaccia dinamica delle condizioni interne dell'aula, rappresenta un passo significativo verso un processo di gestione degli edifici universitari più efficiente e sostenibile, migliorando il comfort e la salute degli occupanti,

ottimizzando il consumo energetico. La flessibilità della soluzione proposta fornisce una base solida per futuri sviluppi di gemelli digitali per edifici esistenti.

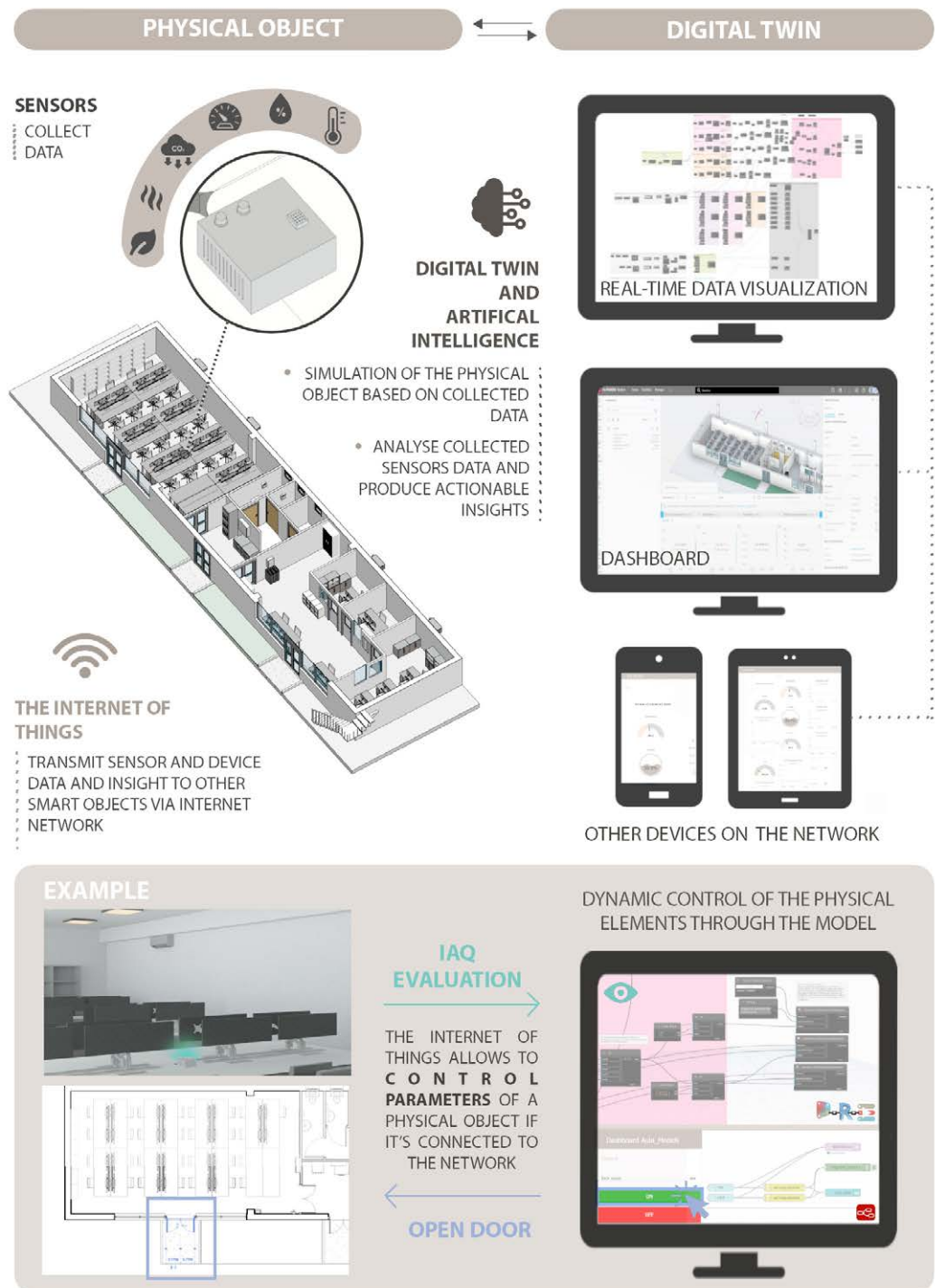


Fig. 6. Integrazione tra Internet of Things e Artificial Intelligence per la generazione del Digital Twin dell'Aula Modelli. In basso un esempio flusso di dati automatizzato tra il gemello digitale e la sua controparte reale. Elaborazione degli autori.



## Crediti

Si ringraziano i docenti M. Fiani e C. Ferreyra per il loro prezioso contributo nel corso di BIM tenutosi presso l'Università degli Studi di Salerno nell'anno accademico 2022/23. Gli esiti della campagna di rilievo integrata e la modellazione di base dell'Aula Modelli in ambiente BIM, prodotti durante il corso, rappresentano il punto di partenza per lo sviluppo della presente ricerca.

## Riferimenti bibliografici

Arsiwala A., Elghaish F., Zoher M. (2023). Digital twin with Machine learning for predictive monitoring of CO2 equivalent from existing buildings. In *Energy and Buildings*, n.284, p. 112851.

Baghalzadeh Shishehgharkhaneh M., Keivani A., Moehler R. C., Jelodari N., Roshdi Laleh S. (2022). Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in *Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis*. In *Buildings*, n.12, p. 1503. <<https://doi.org/10.3390/buildings12101503>> (consultato il 26 luglio 2024).

Cai J., Chen J., Hu Y., Li S., He Q. (2023). Digital twin for healthy indoor environment: A vision for the post-pandemic era. In *Frontiers of Engineering Management*, n.10, pp. 300–318.

Campagnolo D., Camuffo E., Michieli U., Borin P., Milani S., Giordano A. (2023). Fully Automated Scan-to-BIM Via Point Cloud Instance Segmentation. In *Processing of 2023 IEEE International Conference on Image (ICIP)*. Kuala Lumpur (Malaysia), 11 September 2023, pp.291–295. IEEE.

Deng M., Menassa C. C., Kamat V. R. (2021). From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. In *Journal of Information Technology in Construction*, n.26, pp. 58–83.

Doria E., Cercano L., Parrinello S. (2022). Object Detection Techniques Applied to UAV Photogrammetric Survey. In Giordano A., Russo M., Spallone R. (a cura di). *Representation Challenges: New Frontiers of AR and AI Research for Cultural Heritage and Innovation Design*, pp.367–374. FrancoAngeli.

Florio R., Catuogno R., Della Corte T., Marino V., Dilauro A. V. (2020). Architettura archeologia per il rilievo integrato, il caso esemplare di Cuma: le Terme del Foro. In A. Arena et al. (a cura di). *Connettere - Un disegno per Annodare e Tessere*, pp.2182–2192. FrancoAngeli.

Gandomi A., Haider M. (2015). Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. In *International Journal of Information Management*, n.35, pp. 137–144.

Grieves M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. In *White paper*, n.1, pp. 1–7.

Hu X., Assaad R. H. (2024). BIM-enabled digital twin framework for real-time indoor environment monitoring and visualization based on autonomous LIDAR-based robotic mobile mapping, IoT sensing, and indoor positioning technology. In *Journal of Building Engineering*, n.124.

Mannino A., Dejacco M. C., Re Cecconi F. (2021). Building Information Modelling and Internet of Things Integration for Facility Management—Literature Review and Future Needs. In *Applied Sciences*, n.11.

Miller C., Abdelrahman M., Chong A., Biljecki F., Quintana M., Frei M., Chew M., Wong D. (2021). The Internet-of-Buildings (IoB) — Digital twin convergence of wearable and IoT data with GIS/BIM. In *Journal of Physics: Conference Series*, n.2042.

Nazaroff W. W. (2013). Exploring the consequences of climate change for indoor air quality. In *Environmental Research Letters*, n.8, pp. 15–22.

Opoku D.-G. J., Perera S., Osei-Kyei R., Rashidi M., Bamdad K., Famakinwa T. (2024). Digital twin for indoor condition monitoring in living labs: University library case study. In *Automation in Construction*, n.157.

Shahzad M., Shafiq M. T., Douglas D., Kassem M. (2022). Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. In *Buildings*, n.120.

Siccardi S., Villa V. (2022). Trends in Adopting BIM, IoT and DT for Facility Management: A Scientometric Analysis and Keyword Co-Occurrence Network Review. In *Buildings*, n.13.

Vering C., Mehrfeld P., Nürenberg M., Coakley D., Lauster M., Müller D. (2019). Unlocking Potentials of Building Energy Systems' Operational Efficiency: Application of Digital Twin Design for HVAC systems. In V. Corrado, E. Fabrizio, A. Gasparella, and F. Patuzzi (a cura di) *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA, Roma, 2-4 September 2019*, pp.1304–1310. <[https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2019/papers/BS2019\\_210257.pdf](https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2019/papers/BS2019_210257.pdf)> (consultato il 26 luglio 2024).

Yassein M. B., Shatnawi M. Q., Al-zoubi D. (2016). Application layer protocols for the Internet of Things: A survey. In: *2016 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*. Agadir (Marocco), 22-24 September 2016, pp.1–4. IEEE. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7745303>> (consultato il 26 luglio 2024).

#### **Autori**

*Caterina Gabriella Guida*, Università degli Studi di Salerno, [cguida@unisa.it](mailto:cguida@unisa.it)  
*Lorena Centarti*, Università degli Studi di Salerno, [lcentarti@unisa.it](mailto:lcentarti@unisa.it)  
*Paula Barboza*, Università degli Studi di Salerno, [pbarboza@unisa.it](mailto:pbarboza@unisa.it)  
*Neri Edgardo Güidi*, Università degli Studi di Salerno, [nguidi@unisa.it](mailto:nguidi@unisa.it)

*Per citare questo capitolo: Caterina Gabriella Guida, Lorena Centarti, Paula Barboza, Neri Edgardo Güidi (2024). Il paradigma del gemello digitale a supporto del monitoraggio della qualità dell'aria interna/The digital twin paradigm to support indoor air quality monitoring. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (a cura di). Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 1467-1486.*

# The digital twin paradigm to support indoor air quality monitoring

Caterina Gabriella Guida  
Lorena Centarti  
Paula Barboza  
Neri Edgardo Güidi

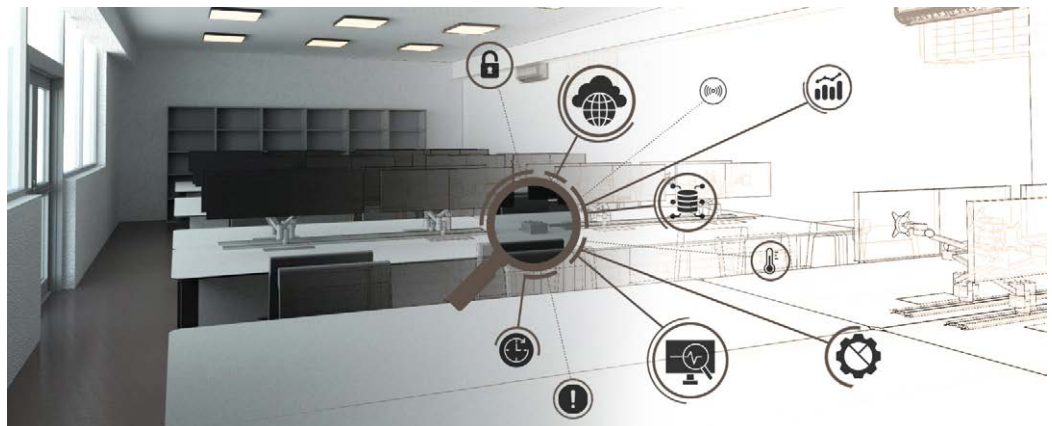
## Abstract

Digital twin (DT), an emerging trend in the digitisation process of Industry 4.0 and future innovations, has found wide application in various sectors. However, its adoption in the construction sector remains limited, hampered by the difficulty of integrating and visualising the large amount of dynamic data acquired in real-time. Particularly in the case of indoor environments, current monitoring methods are still ineffective due to lack of standardisation, lack of spatial information and absence of data visualisation interfaces. To address this need, this work proposes a methodology imprinted on creating a Digital Twin, achieved through the automated integration of low-cost IoT acquisition systems with a parametric BIM model. The developed model is a reliable and practical tool for measuring, collecting and visualising dynamic data, facilitating efficient management during the operational phase and supporting intelligent monitoring of indoor environmental conditions. It enables the automation of specific procedures to ensure occupant comfort and optimisation of energy consumption.

## Keywords

Indoor Air Quality, Digital Twin, Internet of Things, Building Information Modeling, Point Cloud

The IoT sensor system provides the connecting element between the physical reality of the university classroom (left) and its digital counterpart (right), enabling an integrated indoor environmental quality monitoring system. Elaboration of the authors.



## Introduction

Building Information Modeling (BIM) has revolutionised everyday workflows and provides valuable support for cataloguing an enormous amount of helpful information to improve the process of designing, constructing and managing buildings. Currently, the architecture, engineering, construction, and operations (AECO) industry is moving toward the use of new and emerging technologies, such as Digital Twin (DT), Internet of Things (IoT), Big Data, Cloud Computing and Artificial Intelligence (AI), to extend the capabilities of BIM [Baghalzadeh Shishehgarhaneh et al. 2022]. An area where such attention has been focused, with the goal of transforming existing document-based asset management practices into automated data-centric processes, is the use of the Digital Twin for Facility Management (FM) [Shahzad et al. 2022; Siccardi et al. 2022].

The Digital Twin, as conceived by Grieves, is understood as a virtual replica of the physical asset that interconnects the two entities with a bidirectional flow of real-time information [Grieves 2014, pp. 1–7], capable of mirroring the real behaviour of the object of study, predicting its health, and expected performance (fig. 1). Frequently, the lack of accessibility to information about the operation of buildings causes profound difficulties in planning appropriate interventions.

The proliferation of IoT devices has led to the generation of large amounts of unstructured Big Data, which is often ungovernable and challenging to interpret effectively [Gandomi et al. 2015, pp. 137–144]. Although automated sensors are employed, an obstacle to their effective use is the lack of spatial context in the built environment [Mannino et al. 2021].

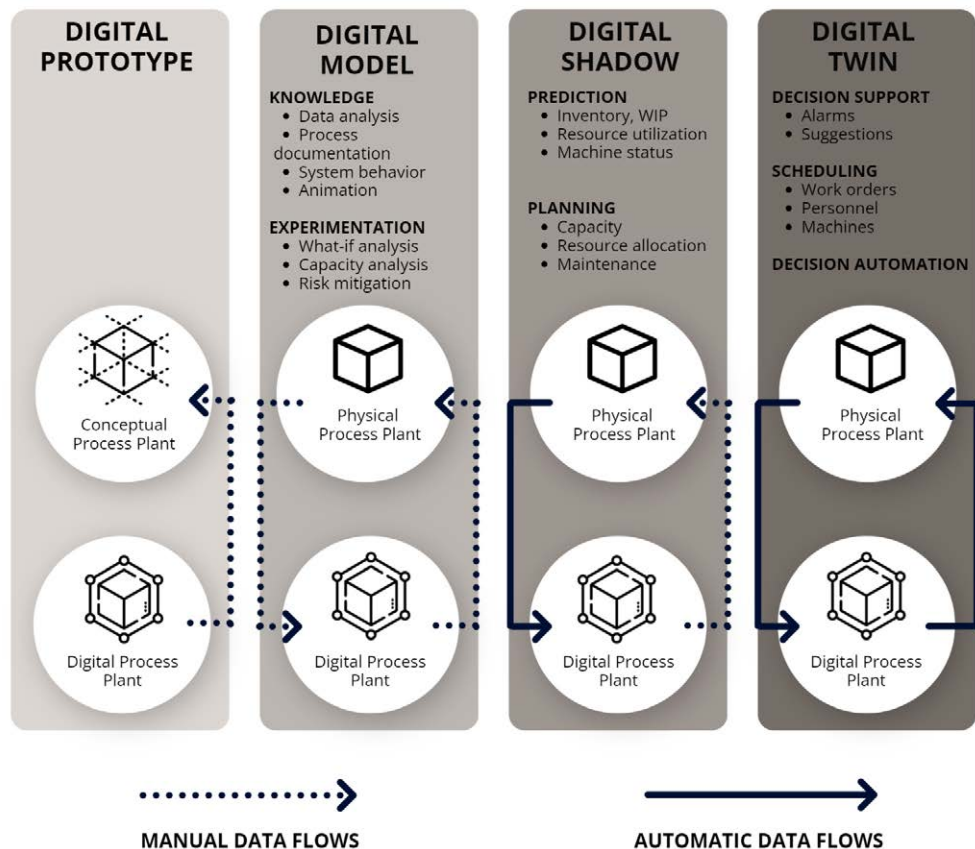


Fig. 1. From Digital Prototype to Digital Twin: data flow between real world and digital world. Elaboration of the authors.



BIM emerges as an interface for IoT data implementation, leading to a convergence of data referred to as the Internet of Buildings (IoB) [Miller et al. 2021]. However, the static nature of the information contained is ill-suited to the needs of FM. Integrating BIM and IoT promises to shift the construction industry from product-oriented to service-oriented, improving transparency and management of the built environment. To overcome the main limitation of this methodology by creating a consistent way of organising and interpreting large amounts of data, there are technological and interoperability challenges [Deng et al. 2021, pp. 58–83].

Recent studies have emphasised the role of Internal Environment Monitoring (IEM) – a process of continuous assessment and analysis of indoor environmental conditions, such as Indoor Air Quality (IAQ) and thermal comfort in managing buildings – to ensure the health, safety, satisfaction and productivity of occupants, and in helping optimise energy efficiency [Hu et al. 2024]. The pandemic of COVID-19 has further highlighted the importance of ensuring healthiness in indoor environments, where we spend an average of 90% of the day [Cai et al. 2023, pp. 300–318]. Although interest in using Digital Twins, which are understood as tools to enable new features and services in smart building management, is growing, indoor healthiness monitoring is still at an early stage of research and development [Opoku et al. 2024]. While providing a thorough understanding of its theoretical framework, there have been limited efforts to address the fundamental implications of its implementation through use-case analyses [Arsiwala et al. 2023, pp. 112851].

In this context, the effective use of real-time data is imperative, especially in high-performance buildings equipped with Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) systems, which, due to their nonlinear behaviour and stochastic environmental interactions, require dynamic management to optimise energy performance. Moreover, HVACs account for the majority of energy consumption in public buildings, the efficiency of which is highly dependent on the control strategies adopted [Vering et al. 2019, pp. 1304–1310]. To promote innovative control and maintenance strategies for an EMI system that is efficient, objective, and cost-effective, the DT framework was applied to the Aula Modelli, a teaching space adjacent to the Laboratorio Modelli of the Department of Civil Engineering of the University of Salerno (fig. 2). This teaching space has significant variability in the number of occupants and complex structural conditions: located partially underground and equipped with large windows with southwest exposure, it suffers from obvious moisture problems and significant variations in environmental parameters.



Fig. 2. Exterior and interior view of the Aula Modelli at the University of Salerno. Elaboration of the authors.

These structural conditions, combined with two non-centralized air conditioning systems, make the optimal management of air exchange particularly complex. Ensuring optimal healthy air conditions is essential, as indoor air quality and thermal

comfort significantly affect occupants' alertness, well-being, and productivity. Through small-scale implementation, a procedure for establishing a DT based on open communication standards is proposed. IoT sensors have been installed to measure environmental parameters required for IAQ monitoring, ensuring indoor comfort and supporting the current management system. Leveraging AI, sensor data can be combined, identifying patterns, anomalies and trends to produce intelligent information, integrated into a three-dimensional model and viewable in real-time on a cloud platform.

## Materials and methods

In the context of DT, dynamic data that become equivalent to graphical information play a neuralgic role; an integrated workflow is developed (fig. 3).

To obtain a metrically reliable model for maintenance and management operations, it becomes essential to use a Scan-to-BIM methodology that involves the use of the dataset from an integrated three-dimensional survey of the entire Laboratorio Modelli building block [Florio et al. 2020, pp. 2182–2192; Campagnolo et al. 2023, pp. 291–295].

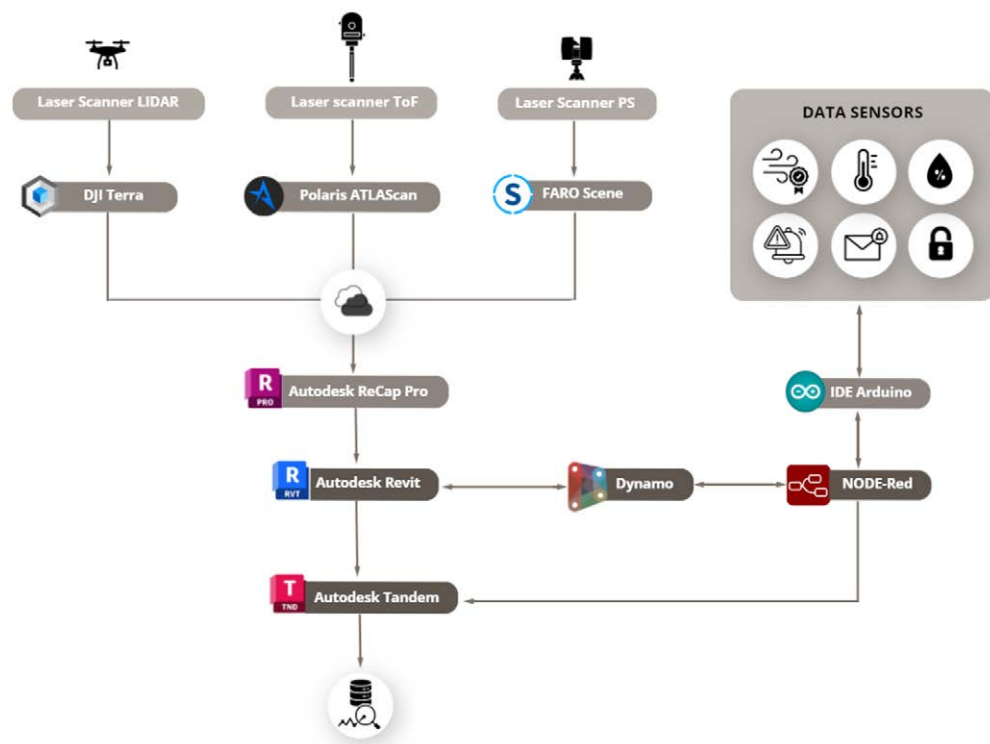


Fig. 3. The proposed system architecture for generating a Digital Twin used for monitoring an indoor environment. Elaboration of the authors.

To capture the exterior, a UAV (Unmanned Aerial Vehicle) was used for the building's context, and a TOF-type Terrestrial Laser Scanner (TLS) was employed to capture the parameters [Doria et al. 2022, pp. 367–374]. Regarding the UAV flight, data were acquired using a DJI Matrice 300 equipped with a DJI Zenmuse LI sensor, including a LiDAR module, an IMU, and a camera with a 20-megapixel CMOS sensor with a focal length of 8.8 mm and pixel size of 2.41  $\mu\text{m}$ . Due to the high concentration of adjacent buildings, two flight plans were required to generate a dense, complete and coherent point cloud, one nadir and the other oblique, developing a point cloud with an average density of 422 points/m<sup>2</sup>.

A Teledyne Optech POLARIS was used to acquire the block's external faces, recording 6 scans. For proper cloud georeferencing, 8 targets were materialised and measured with a GNSS (Global Navigation Satellite System) receiver in nRTK (Network Real-Time Kinematic) mode in the UTM/RND2008 map reference system and ellipsoidal elevations. The TLS data of the exteriors were processed with the proprietary AtlaScan software, georeferencing the point cloud produced. For the interior, FAROX330 was used, acquiring 27 scans and generating a data match between the interior and exterior to ensure linkage with previous acquisitions. Finally, the integrated cloud was decimated and exported to Autodesk Recap (.rcp) (fig. 4). Automated data acquisition technologies are progressing significantly, both as hardware and software; therefore, a flexible and customisable system for dynamic reading of environmental parameters, based on open-source tools, is proposed. The system architecture for indoor classroom conditions includes DHT22 humidity and temperature sensor and MQ-135 and MQ-3 gas sensors for detecting smoke and CO<sub>2</sub> concentration. These are connected to the ESP32 module, a low-power microprocessor with built-in Wi-Fi, programmed in IDE Arduino to acquire real-time data. A MicroSD card reader is also provided to overcome any momentary data loss in case of disconnections.

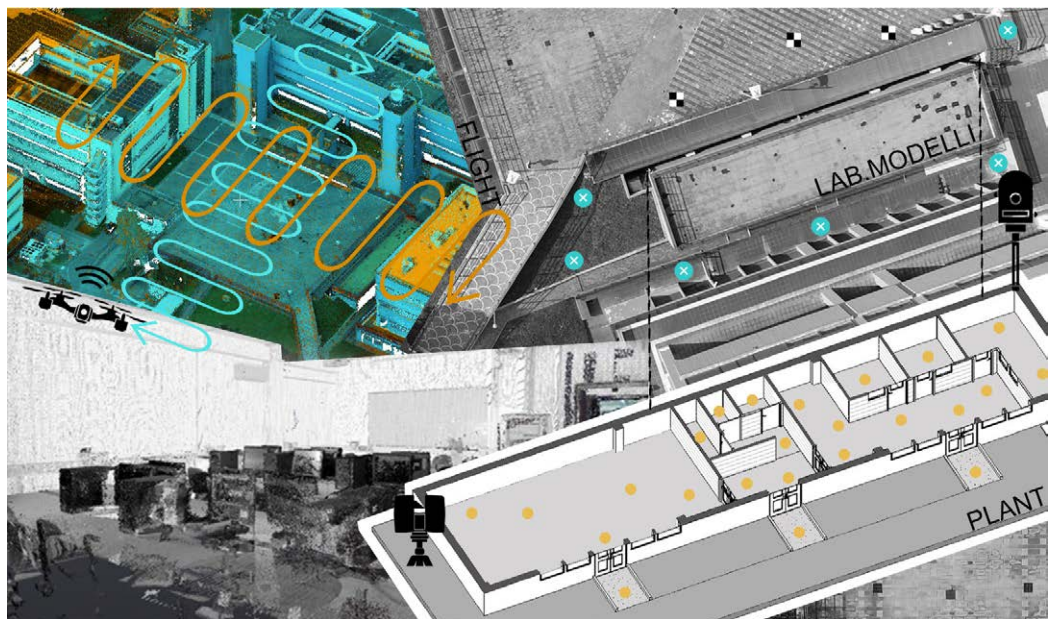


Fig. 4. Integrated survey obtained through Aerophotogrammetry using UAV, Time-of-Flight Laser Scanner, and Phase Difference Laser Scanner. Elaboration of the authors.

Data transmission to the cloud requires compliance with network layer communication protocol standards, which include various sublayers. In this study, MQTT (Message Queue Telemetry Transport), an open-source lightweight messaging protocol that has become a standard for IoT applications, was chosen [Yassein et al. 2016, pp. 1–4].

ESP32 collects sensor data, processes it into JSON format and publishes it via MQTT protocol. The information is processed by a Node-Red service, which monitors the arrival of new data on the MQTT channel, processing it and displaying it in a dashboard. To ensure the integrity and security of the transmitted information, TLS (Transport Layer Security) encryption is implemented. The system architecture includes automating various procedures, such as turning on LEDs that signal the need to manually open doors and windows and sending alerts to facility managers if anomalies are detected (fig. 5).

After obtaining the three-dimensional geometric data and implementing the IoT architecture for dynamic reading of environmental parameters, the information model was set up to collect and correlate heterogeneous, static and dynamic information. The strategy employed for modeling each building component in the Autodesk Revit 2023 environment included a faithful geometric and performance reproduction of them, according to a level of model development equal to a LOD D, enriched with information related to the thermal properties of materials, which are essential for obtaining reliable environmental assessments.

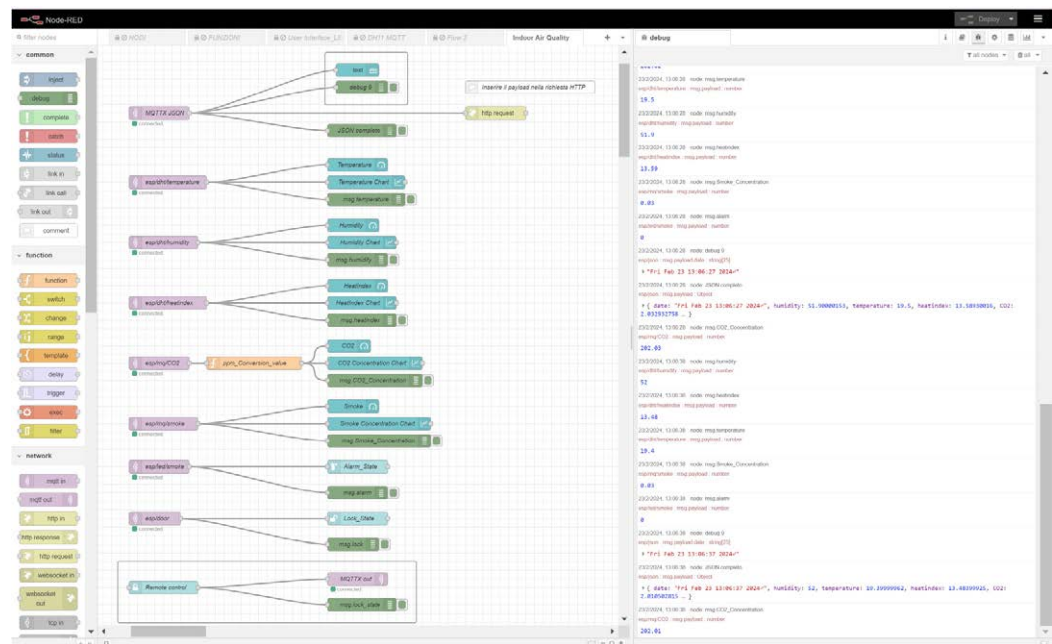


Fig. 5. Node-Red flow for reading real-time data from environmental sensors, visualization on custom dashboard and automation of processes. Elaboration of the authors.

In the Autodesk Dynamo for Revit environment, through the API (Application Programming Interface), a script was generated using VPL (Visual Programming Languages) to automatically create shared parameters intended to contain the dynamic information collected by the IoT sensors in a structured way. The environmental data monitored in the field are assigned to the new 'Data Sensors' family as instance parameters. A custom node, created via Python scripts, performs the reading of the JSON file via MQTT brokers, automating the parameter populating procedure by graphing the trends according to a user-defined time interval.

Indoor air quality is highly variable based on humidity and temperature, presence of contaminants, building characteristics and occupant activity [Nazaroff 2013, pp. 15–22]. Each parameter is given a threshold value according to the OMS Global Guidelines on Indoor Air Quality (AQGs). Alerts are triggered when CO<sub>2</sub> concentration exceeds 1000 ppm or when temperature and humidity exceed the recommended seasonal range. A method for measuring indoor air quality has been proposed through the calculation of the IAQI (Indoor Air Quality Index) for CO<sub>2</sub>, based on the comfort limits established by ASHRAE, on a scale from 1 to 5. The optimisation of the dynamic visualisation of the index is achieved using a colourimetric filter associated with the fictitious 'ceiling' element. This system makes it possible to quickly detect situations where comfort conditions are not acceptable, enabling timely interventions. To simplify the use of the script, Dynamo Player, a user-friendly reader included in the Revit interface, was used to import the configuration of monitored variable parameters automatically into any project.



Autodesk Tandem, a cloud-based platform offering API services, was used to visualise operational data. Once the model is imported in .rvt or .ifc format, it is possible to read not only the BIM model properties but also the dynamic data that can be loaded as 'Streams' by defining a correspondence between the parameters extracted from the specified JSON path and the corresponding values, treated as payloads. The Digital Twin of the Aula Modelli makes an immediate interaction with its real correspondent and dynamic modification of its parameters. Tandem streams store time-series data, enabling the structure management staff to remotely monitor environmental conditions and fluctuations, promptly identify critical issues, locate anomalies, and initiate necessary optimisation actions (fig. 6).

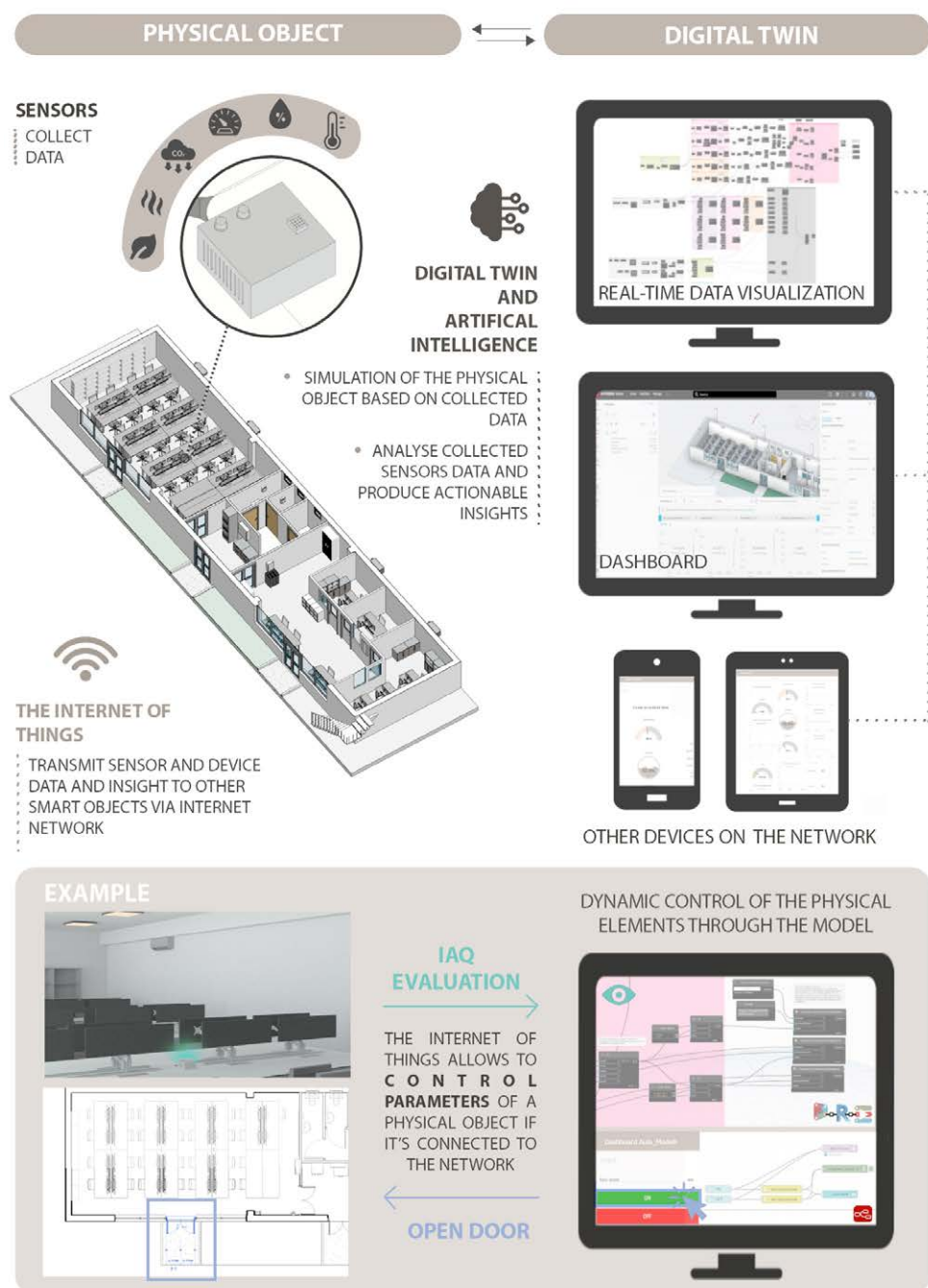


Fig. 6. Integration of Internet of Things and Artificial Intelligence for generating the Digital Twin of the Aula Modelli. Below is an example of automated data flow between the Digital Twin and its real counterpart. Elaboration of the authors.

## Conclusions

Cataloguing and organising real-time data are crucial to accurately representing the building configuration, reducing the gap between predicted and actual performance. The implementation of the DT highlighted several challenges to be addressed. The adoption of the Scan-to-BIM methodology was crucial to obtaining a georeferenced and accurate model, which is essential to correlating dynamic IoT sensor data. However, managing large volumes of unstructured data remains challenging, requiring advanced analysis and integration techniques.

Implementing an IoT system based on inexpensive components and open-source software has allowed the creation of a flexible and customisable solution. Integrating the BIM model with IoT data has shown how comfort and indoor air quality management can be improved. Through a single cloud platform, back-end processes are automated to display critical alerts and information, providing an intuitive dashboard to measure, monitor and analyse data in real-time.

University spaces, characterised by variability in occupancy rates and diverse needs, make centralised air conditioning systems ineffective, requiring flexible and adaptable solutions. The experience conducted in a university classroom demonstrates how digital environments and cutting-edge technologies can offer new ways of managing buildings, synthesising graphical and informational content, and fostering IAQ monitoring processes and optimising indoor comfort. The current system provides alerts for air exchange and notifications to maintenance staff, and allows for automatic adjustment of environmental parameters by opening and closing doors and windows. Integration of automated devices would complement automation, eliminating the need for manual intervention. By extending this approach, automated management would reduce operational costs, and continuous data analysis would allow for more targeted and timely maintenance planning.

Integrating the geometric-informative model with dynamic data and advances in AI, taking advantage of a dynamic interface of internal classroom conditions, is a significant step toward a more efficient and sustainable university building management process, improving occupant comfort and health while optimising energy consumption. The flexibility of the proposed solution provides a solid foundation for future developments of digital twins for existing buildings.

## Credits

Si ringraziano i docenti M. Fiani e C. Ferreyra per il loro prezioso contributo nel corso di BIM tenutosi presso l'Università degli Studi di Salerno nell'anno accademico 2022/23. Gli esiti della campagna di rilievo integrata e la modellazione di base dell'Aula Modelli in ambiente BIM, prodotti durante il corso, rappresentano il punto di partenza per lo sviluppo della presente ricerca.

## References

- Arsiwala A., Elghaish F., Zohar M. (2023). Digital twin with Machine learning for predictive monitoring of CO2 equivalent from existing buildings. In *Energy and Buildings*, n.284, p. 112851.
- Baghalzadeh Shishehgarhaneh M., Keivani A., Moehler R. C., Jelodari N., Roshdi Laleh S. (2022). Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis. In *Buildings*, n.12, p. 1503. <<https://doi.org/10.3390/buildings12101503>> (accessed 26 July 2024).
- Cai J., Chen J., Hu Y., Li S., He Q. (2023). Digital twin for healthy indoor environment: A vision for the post-pandemic era. In *Frontiers of Engineering Management*, n.10, pp. 300–318.
- Campagnolo D., Camuffo E., Michieli U., Borin P., Milani S., Giordano A. (2023). Fully Automated Scan-to-BIM Via Point Cloud Instance Segmentation. In *Processing of 2023 IEEE International Conference on Image (ICIP)*. Kuala Lumpur (Malaysia), 11 September 2023, pp.291–295. IEEE.
- Deng M., Menassa C. C., Kamat V.R. (2021). From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. In *Journal of Information Technology in Construction*, n.26, pp. 58–83.
- Doria E., Cercano L., Parrinello S. (2022). Object Detection Techniques Applied to UAV Photogrammetric Survey. In Giordano A. Russo M. Spallone R. (Eds.). *Representation Challenges: New Frontiers of AR and AI Research for Cultural Heritage and Innovation Design*, pp.367–374. FrancoAngeli.

- Florio R., Catuogno R., Della Corte T., Marino V., Dilauro A.V. (2020). Architettura archeologia per il rilievo integrato, il caso esemplare di Cuma: le Terme del Foro. In A. Arena et al. (Eds.). *Connettere - Un disegno per Annodare e Tessere*, pp.2182–2192. FrancoAngeli.
- Gandomi A., Haider M. (2015). Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. In *International Journal of Information Management*, n.35, pp. 137–144.
- Grieves M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. In *White paper*, n.1, pp. 1–7.
- Hu X., Assaad R. H. (2024). BIM-enabled digital twin framework for real-time indoor environment monitoring and visualization based on autonomous LIDAR-based robotic mobile mapping, IoT sensing, and indoor positioning technology. In *Journal of Building Engineering*, n.124.
- Mannino A., Dejacó M. C., Re Cecconi F. (2021). Building Information Modelling and Internet of Things Integration for Facility Management—Literature Review and Future Needs. In *Applied Sciences*, n.11.
- Miller C., Abdelrahman M., Chong A., Biljecki F., Quintana M., Frei M., Chew M., Wong D. (2021). The Internet-of-Buildings (IoB) — Digital twin convergence of wearable and IoT data with GIS/BIM. In *Journal of Physics: Conference Series*, n.2042.
- Nazaroff W.W. (2013). Exploring the consequences of climate change for indoor air quality. In *Environmental Research Letters*, n.8, pp. 15–22.
- Opoku D.-G. J., Perera S., Osei-Kyei R., Rashidi M., Bamdad K., Famakinwa T. (2024). Digital twin for indoor condition monitoring in living labs: University library case study. In *Automation in Construction*, n.157.
- Shahzad M., Shafiq M.T., Douglas D., Kassem M. (2022). Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. In *Buildings*, n.120.
- Siccardi S., Villa V. (2022). Trends in Adopting BIM, IoT and DT for Facility Management: A Scientometric Analysis and Keyword Co-Occurrence Network Review. In *Buildings*, n.13.
- Vering C., Mehrfeld P., Nürenberg M., Coakley D., Lauster M., Müller D. (2019). Unlocking Potentials of Building Energy Systems' Operational Efficiency: Application of Digital Twin Design for HVAC systems. In V. Corrado, E. Fabrizio, A. Gasparella, and F. Patuzzi (Eds.) *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*. Roma, 2–4 September 2019, pp.1304–1310. <[https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2019/papers/BS2019\\_210257.pdf](https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2019/papers/BS2019_210257.pdf)> (accessed 26 July 2024).
- Yassein M. B., Shatnawi M. Q., Al-zoubi D. (2016). Application layer protocols for the Internet of Things: A survey. In: 2016 *International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*. Agadir (Marocco), 22-24 September 2016, pp.1–4. IEEE. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7745303>> (accessed 26 July 2024).

## Authors

*Caterina Gabriella Guida*, Università degli Studi di Salerno, [cguida@unisa.it](mailto:cguida@unisa.it)

*Lorena Centarti*, Università degli Studi di Salerno, [lcentarti@unisa.it](mailto:lcentarti@unisa.it)

*Paula Barboza*, Università degli Studi di Salerno, [pbarboza@unisa.it](mailto:pbarboza@unisa.it)

*Neri Edgardo Güidi*, Università degli Studi di Salerno, [nguidi@unisa.it](mailto:nguidi@unisa.it)

*To cite this chapter* : Caterina Gabriella Guida, Lorena Centarti, Paula Barboza, Neri Edgardo Güidi (2024). Il paradigma del gemello digitale a supporto del monitoraggio della qualità dell'aria interna/The digital twin paradigm to support indoor air quality monitoring. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (Eds.). *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure.Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 1467-1486.