

Abilitare una esperienza aumentata dell'edificio con il coinvolgimento degli utenti

Just Accepted: October 22, 2022 Published: May 30, 2023

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Antonella Trombadore¹, <https://orcid.org/0000-0002-5098-7187>

Debora Giorgi¹, <https://orcid.org/0000-0002-4640-1702>

Gisella Calcagno¹, <https://orcid.org/0000-0002-1035-6890>

Giacomo Pierucci¹, <https://orcid.org/0000-0002-8475-9908>

¹ Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Firenze, Italia

² Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Firenze, Italia

antonella.trombadore@unifi.it

debora.giorgi@unifi.it

gisella.calcagno@unifi.it

giacomo.pierucci@unifi.it

Abstract. Focalizzare l'attenzione sul ruolo degli utenti è il cuore dell'esperienza di ricerca in corso in un Living Lab universitario che indaga, mette a sistema e testa il potenziale delle più recenti tecnologie digitali nel settore edilizio (BIM-sensori-Digital Twin-IoT) per la definizione di interfacce abilitanti edificio-utente a sostegno del circolo virtuoso efficienza energetica/benessere ambientale/proactive behaviour. Sincronizzare edificio reale/modello virtuale permette una esperienza ambientale aumentata e nuovi livelli di coinvolgimento degli utenti; arricchisce i sistemi predittivi di dati-user experience aiutando a calibrare su obiettivi di well-being la configurazione di scenari migliorativi in fase progettuale/operativa, ampliando la consapevolezza degli attori del processo per una nuova centralità della decisione come valore etico.

Parole chiave: Building Renovation; Well-being; Monitoring System; Digital Twin; User-experience; Service Design.

Una nuova dimensione sociale della decisione nel processo progettuale e di conduzione operativa

Con la recente accelerazione della poli-crisi, emergenze come cambiamento climatico, pandemia e crisi energetica rafforzano l'urgenza di attuare i

ben noti obiettivi per la trasformazione dell'ambiente costruito: basso impatto ambientale, benessere degli abitanti e efficienza energetica.

Tuttavia, la necessità di rinnovare il vasto patrimonio edilizio esistente inadeguato 'anche' sotto il profilo energetico si risolve spesso in politiche riduttivistiche e puntuali come quelle dei bonus, impotenti nel determinare cambiamenti culturali necessari per affrontare la complessità delle sfide in corso (Karrer, 2022). L'enorme consumo energetico imputabile agli edifici per ga-

rantire livelli adeguati di comfort interno richiede un rinnovamento che riguarda tanto gli aspetti edilizi (es. miglioramento delle prestazioni dell'involucro, integrazione delle rinnovabili), che quelli umani relativi all'uso degli edifici, a partire dal comportamento degli utenti. In questa prospettiva, è necessario superare il concetto funzionale di 'edificio' per riappropriarsi del concetto culturale di 'abitare', riconsiderando l'utente nella sua corporeità, nella sua percezione e nei modelli di comportamento, non solo come occupante ma come figura che interviene e incide con i suoi comportamenti nel ciclo di vita dell'edificio.

Considerando la transizione digitale a sostegno della transizione ecologica, le tecnologie abilitanti (es. ICT, IoT, monitoring and simulating) non solo rendono sempre più intellegibile e condivisibile il comportamento dell'edificio in termini prestazionali, ma consentono di coniugare un approccio user-based che valorizza la reale esperienza percettiva e immersiva dell'utente, compresa la sua capacità di adattamento e interazione continua, ampliando l'esperienza nell'uso degli spazi e cambiando il modo di viverli (Torricelli, 2017).

Obiettivo della ricerca è indagare e mettere a sistema tali innovazioni come strumenti per aumentare la conoscenza e la consapevolezza degli utenti degli edifici, nell'ottica di un loro potenziamento e responsabilizzazione per un uso sostenibile dell'edificio.

Enabling an augmented building experience by encouraging user engagement

Abstract. Focus on the role of users is the heart of the ongoing research experience in the university Living Lab environment that investigates, systematises and tests the potential of the latest digital technologies in the construction sector (BIM-sensors-Digital Twin-IoT) to define enabling building-user interfaces that support the virtuous circle of energy efficiency/environmental well-being/proactive behaviour. Synchronising the real building/virtual model allows an augmented environmental experience and new levels of user involvement. It enriches the predictive systems of data-user experience, helping to calibrate the configuration of improvement scenarios in the design/operational phase on well-being objectives, expanding the awareness of the process actors for a new centrality of the decision as an ethical value.

Keywords: Building renovation; Well-being; Monitoring System; Digital Twin; User-experience; Service Design.

The challenge of a new social dimension of decision in the operational/design process

With the recent acceleration of the ongoing polycrisis, emergencies such as climate change, pandemic and energy crisis reinforce the urgency to implement the well-known objectives for the transformation of the built environment, precisely low environmental impact, well-being of the inhabitants and energy efficiency.

However, the need to renovate the vast existing building stock that is 'also' inadequate from an energy point of view often results in reductive and punctual policies, such as those of bonuses, which are powerless to determine cultural changes necessary to face the complexity of the current challenges (Karrer, 2022).

The huge energy consumption attributable to buildings to ensure adequate

levels of indoor comfort requires a renovation that concerns both the building aspects (e.g. improvement of envelope performance, integration of renewables), as well as the human aspects related to the use of buildings, starting from the behaviour of users. In this perspective, it is necessary to overcome the functional concept of 'building' to regain the cultural concept of 'living', reconsidering the user in his corporeity, in his perception and in the patterns of behaviour, not only as an occupant but as a figure that intervenes and influences the life cycle of the building.

Considering digital transition in support of ecological transition, the enabling technologies (e.g. ICT, IoT, monitoring and simulating) not only make the behaviour of the building increasingly intelligible and shareable with a performance approach, but they

Edifici cognitivi, efficienza energetica e user experience: ricerche in atto e potenzialità

sul piano normativo europeo (Directive 2014/24/EU) e nazionale (DM 560/2017), che consente di organizzare in maniera standardizzata la grande quantità di informazioni relative all'edificio all'interno di modelli tridimensionali ricchi di dati, interoperabili e implementabili nel tempo per migliori scambi informativi e migliorate capacità di analisi.

Per rispondere all'imperativo di efficienza energetica degli edifici, le potenzialità del BIM si sono sviluppate principalmente in fase di progettazione (BIM-BEM - Building Energy Modeling) per la simulazione del comportamento energetico dell'edificio a scopo diagnostico e predittivo (Farzaneh *et al.*, 2019), ma anche nella fase di gestione (BIM-FM - Facility Management). Numerosi progetti di ricerca a livello europeo sfruttano i vantaggi del BIM per ottimizzare i processi di rinnovamento energetico degli edifici (es. BIM4REN, BIM4EEB, ENCORE, BIMERR), accomunati dall'attenzione alle necessità informative dei diversi attori coinvolti (progettisti, gestori, utenti) attraverso la definizione di piattaforme digitali collaborative che integrano modelli BIM.

Gli sviluppi dell'Industria 4.0 (sensori, IoT, data analytics, big data) stanno amplificando la portata del BIM verso la definizione di Digital Twin (DT), modelli virtuali dell'edificio capaci di sincronizzarsi in tempo reale con l'edificio fisico attraverso un flusso continuo e bidirezionale di dati (Shahzad *et al.*, 2022). Tra le potenzialità di tale connessione, quelle relative all'efficienza

Nel sotto-digitalizzato settore edilizio, il BIM (Building Information Modelling) può considerarsi come la tecnologia digitale più influente, riconosciuta

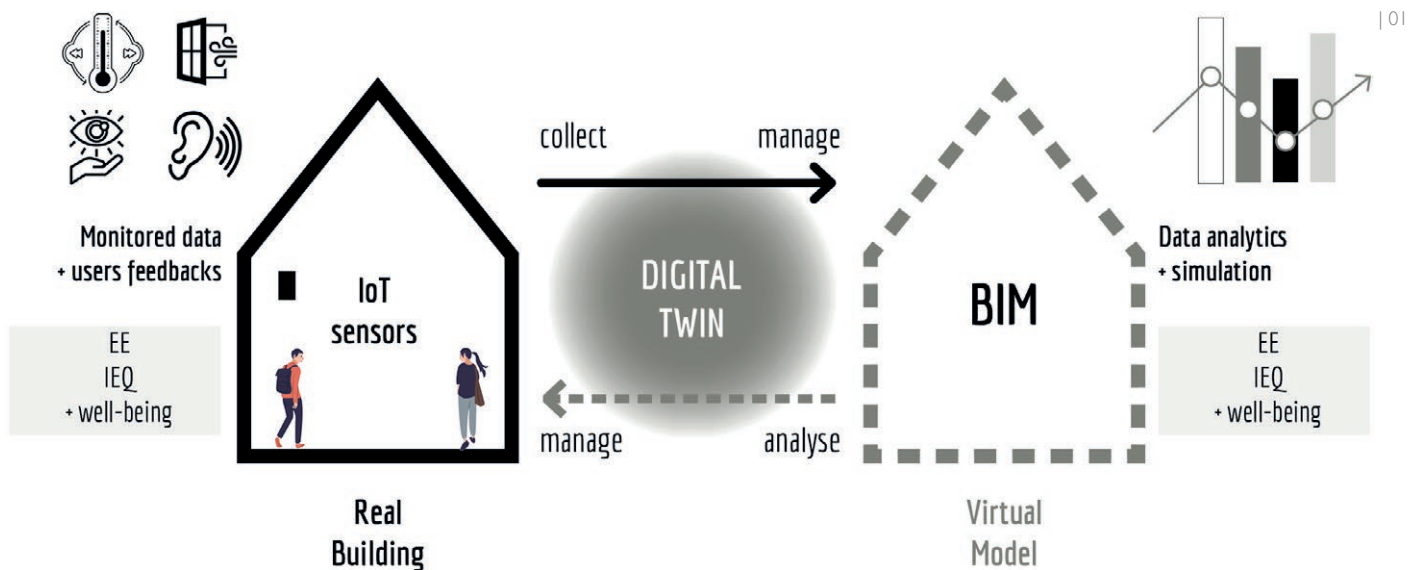
energetica sono legate all'avanzamento dei sistemi di monitoraggio dell'edificio (IoT), che consentono attraverso i dati raccolti (anche in real-time) una analisi e predizione più affidabile del comportamento energetico, verso la riduzione dei consumi (Clausen *et al.*, 2021) (Fig. 1); anche in questo ambito la ricerca si muove verso la definizione di piattaforme collaborative che consentono la sistematizzazione ulteriore di dati dinamici (es. progetti TWINERGY, SPHERE, BIMSPEED). Come già osservato da Del Nord (2016), le possibilità digitali di elaborazione delle informazioni permettono, fin dalla fase di progettazione, di spostare la modellizzazione dall'oggetto-edificio verso una pre-ottimizzazione dei modelli di comportamento e d'uso (behavioural modelling), per massimizzare efficienza e benefici.

Benché lo sviluppo di DT sia orientato alla definizione di processi automatizzati basati su machine learning / intelligenza artificiale (Deng *et al.*, 2021) per la creazione di 'edifici cognitivi' capaci di auto-adattarsi (Rinaldi *et al.*, 2020), la loro portata innovativa riguarda la possibilità di tener conto e interagire con l'esperienza degli utenti, consentendo una maggiore conoscenza dell'edificio e consapevolezza per un comportamento proattivo nei confronti delle scelte di sostenibilità.

L'esperienza del Living Lab per abilitare la centralità dell'utente

La sperimentazione di DT per l'innovazione dei processi di riqualificazione energetica e ambientale degli edifici esistenti è

stata la naturale espansione del progetto di ricerca Med-EcoSuRe¹, che vede nelle università dei catalizzatori capaci di promuovere un rinnovamento eco-sostenibile degli edifici pubblici in ambito mediterraneo. Il progetto ha previsto la realizzazione di un Living



Lab all'interno dell'edificio pilota universitario da rinnovare per il coinvolgimento dei gestori del patrimonio universitario, degli energy manager di ateneo, di alcune aziende innovative locali, ma soprattutto della comunità accademica composta da ricercatori di diversi ambiti disciplinari e studenti.

L'approccio Living Lab è fondamentale per dare centralità agli utenti e stimolare la loro cooperazione nella co-creazione, esplorazione, sperimentazione e valutazione di sistemi innovativi di DT per:

- definire un quadro conoscitivo dell'edificio esistente basato sul BIM per la simulazione degli aspetti energetici e ambientali;
- raccogliere dati reali sul comportamento dell'edificio in condizioni operative attraverso un sistema di monitoraggio in continuo dei parametri ambientali che influenzano il comfort e l'efficienza energetica;
- educare gli utenti e le future generazioni verso comportamenti energetici più consapevoli e proattivi.

È possibile individuare quattro passaggi metodologici fondamentali della ricerca interdisciplinare in corso che mettono a sistema i quattro ambiti disciplinari coinvolti nella definizione del DT (tecnologia dell'architettura, ingegneria energetica, ingegneria informatica e *service design*): modellazione BIM-BEM, sistema di monitoraggio, aggregazione e visualizzazione dei dati, *user experience*.

Questo approccio appare particolarmente interessante negli edifici pubblici, per il loro ruolo di apripista nei confronti dell'innovazione, ma soprattutto nell'ambito di edifici educativi, a partire dai contesti universitari (Zaballos *et al.*, 2020), in cui gli obiettivi di sviluppo sostenibile possono trarre dalle

also allow to combine a human-based approach that values real perceptual and immersive user experience, including the ability to adapt and continuously interact, expanding the experiential capacity in the use of spaces and changing the way of living them (Torricelli, 2017).

The aim of the ongoing research is to investigate and systematise these innovations as tools to increase the knowledge and awareness of building users, with a view to enhancing them and making them responsible for a sustainable use of buildings.

Cognitive buildings, energy efficiency and user experience: ongoing research and potentialities

In the under-digitised construction sector, BIM (Building Information Modelling) can be considered as the most influential digital technology.

Recognised at the European (Directive 2014/24/EU) and national (Ministerial Decree 560/2017) level, it allows to organise in a standardised way the large amount of data and information related to the building within three-dimensional models, which are interoperable and implementable over time for better information exchanges and improved analysis capacity.

Concerning the energy efficiency of buildings, the potential of BIM has developed in the design phase thanks to BIM-BEM (Building Energy Modelling) interoperability with simulation software of the energy behaviour of the building for diagnostic and predictive purposes (Farzaneh *et al.*, 2019).

Addressing the imperative of energy efficient buildings, BIM potentialities have been mostly developed in the design phase (BIM-BEM - Building Energy Modelling) to simulate

opportunità del digitale nuove occasioni di formazione per la futura generazione di tecnici, professionisti, decisori ma soprattutto di cittadini di domani (Longoria *et al.*, 2021).

Il progetto pilota: best path per la configurazione di un habitat di qualità

Esplorando in maniera interdisciplinare e collaborativa le potenzialità di sviluppo dei DT, il progetto pilota ha consentito di tracciare una *best-path* per accompagnare un processo innovativo di rinnovamento degli edifici esistenti: dalla definizione di un quadro conoscitivo/modello coerente dell'edificio esistente (modellazione BIM), all'analisi delle criticità energetiche e ambientali (attraverso monitoraggio e simulazioni) per la valutazione di diversi scenari di intervento in fase di progettazione.

L'attivazione del DT avviene attraverso un sistema di monitoraggio in continuo installato negli spazi del Living Lab, composto da oltre 40 sensori che rilevano dati ambientali relativi alla distribuzione delle temperature interne e dell'umidità relativa, dei flussi termici attraverso gli elementi di involucro, dei livelli di illuminamento, di qualità dell'aria, ma anche dei parametri esterni locali grazie all'installazione di una stazione meteo (Fig. 2). Si tratta di un sistema di monitoraggio volutamente ridondante, allo scopo di comprendere il comportamento dei diversi gruppi di sensori e la correlazione con gli altri dati, a partire dai *feedback* degli utenti, ma anche per la definizione successiva di sistemi compatti e *plug&play* da sperimentare in progetti futuri.

I dati monitorati sono oggetto di post-processing per la quantificazione degli aspetti di comfort sulla base di modelli di IEQ (*Indoor Environmental Quality*), in termini di voto medio

the building's energy behaviour for diagnostic and predictive purposes (Farzaneh *et al.*, 2019), but also in the operational phase (BIM-FM - Facility Management). Many research projects at European level exploit the advantages of BIM modelling to optimise the energy renovation of buildings (e.g. BIM4REN, BIM4EEB, ENCORE, BIMERR). They have in common attention to the information needs of the different actors involved (designers, managers, users) through the definition of collaborative digital platforms integrating BIM models.

The developments of Industry 4.0 (sensors, IoT, data analytics, big data) are amplifying the BIM scope towards the definition of Digital Twin (DT), virtual models of the building that will be capable of synchronising with the physical building through a continuous and bidirectional data flow (Shahzad *et al.*,

2022). Among the potentialities of this connection, those related to energy efficiency are linked to the advancement of systems for monitoring the physical building, consenting a more reliable analysis and prediction of its energy behaviour towards the reduction of energy consumption (Clausen *et al.*, 2021) (Fig. 1). Even in this most advanced field, research moves towards the definition of collaborative digital platforms, allowing further systematisation of dynamic data (e.g. projects TWINERGY, SPHERE, BIMSPEED). As already observed by Del Nord (2016), the digital possibilities of information processing consent, from the design phase, to move modelling from the object-building to pre-optimisation of behaviours and use models (behavioural modelling), to maximise efficiency and benefits.

Although the future of DT is oriented



towards the development of automated processes based on machine learning/artificial intelligence (Deng *et al.*, 2021) for the definition of 'cognitive buildings' capable of self-adapting (Rinaldi *et al.*, 2020), their innovative scope concerns the possibility of taking into account and interacting with the experience of users, allowing them greater knowledge of the building and awareness to adopt a proactive behaviour towards sustainability choices.

The Living Lab experience to enable the centrality of users

The experimentation of DT for the innovation of energy and environmental renovation processes of existing buildings, to improve the ecosystem quality and adaptability of the built environment, was the natural expansion of the Med-EcoSuRe research project², which sees universities as catalysts capable of

promoting an eco-sustainable renovation of public buildings in the Mediterranean area. The project has envisaged the creation of a Living Lab within the university pilot building to be renovated, proactively involving university facility managers, energy managers, local innovative companies and, above all, the academic community composed of researchers from different disciplinary fields and students.

The Living Lab approach is essential to give centrality to users and stimulate their cooperation in the co-creation, exploration, experimentation and evaluation of innovative DT systems to:

- define a BIM-based knowledge framework of the existing situation to simulate energy and environmental aspects;
- collect real data on the behaviour of the building in operational conditions through a continuous monitoring

system of the environmental parameters influencing comfort and energy efficiency;

- educate users and future generations towards more conscious and proactive energy behaviours.

It is possible to identify four fundamental methodological steps of the ongoing interdisciplinary research that create a system with the four disciplinary areas involved in the definition of the DT (architectural technology, energy engineering, information engineering and service design): BIM-BEM modelling, environmental monitoring system, aggregation and visualisation of data, user experience.

This approach appears particularly interesting in public buildings for their role of innovation pioneer but, above all, in educational buildings, starting from university contexts (Zaballos *et al.*, 2020), where the objectives of sus-

tainable development can draw new training opportunities from the digital background for the future generation of technicians, professionals, decision-makers and, above all, of tomorrow's citizens (Longoria *et al.*, 2021).

The pilot project: best path for the configuration of a quality habitat

Exploring the potential of DT development in an interdisciplinary and collaborative way, the pilot project has allowed to trace a best path to accompany an innovative process of renovation for existing buildings: from the definition of a knowledge framework/coherent model of the existing building (BIM modelling) to the analysis of energy and environmental criticalities (through monitoring and simulations) for the evaluation of different intervention scenarios in the design phase.

The activation of the DT takes place

previsto e percentuale di soddisfatti (UNI EN ISO 7730:2006). Questi risultati sono validati dal rilevamento di *feedback* relativi all'esperienza reale degli occupanti attraverso un questionario online sulla percezione del comfort all'interno del Living Lab, relativo agli aspetti termici, luminosi, acustici e di qualità dell'aria (EN ISO 10551:2019).

La possibilità di conoscere le condizioni ambientali reali e dinamiche dell'edificio, influenzate dall'utenza, consente di validare il modello digitale: il collegamento del modello BIM con i dati rilevati in continuo dai sensori e i *feedback* degli utenti è stato possibile grazie alla collaborazione con esperti informatici² per una prima visualizzazione e aggregazione dei dati (Fig. 3). Considerando la quantità e l'interrelazione dei dati, la sfida successiva del Living Lab fisico/virtuale è di renderli fruibili ai diversi attori e utenti per una comunicazione intuitiva dei dati ambientali ed energetici, nonché per scopi educativi e didattici.

Il ruolo trasformativo degli utenti: *building environmental experience*

L'approccio transdisciplinare che ha unito la progettazione dello spazio con il *Service Design* si allinea con pratiche emergenti di grande interesse (Fassi *et al.*, 2018; Collina *et al.*, 2018; Van Geetsom e Wilkinson, 2021). Il Design dei Servizi si caratterizza per un approccio olistico o sistemico, incentrato sull'uomo e volto alla co-creazione di valore (Meroni e Sangiorgi, 2011) grazie al coinvolgimento degli utenti non solo nella fase di progettazione, ma anche e soprattutto nell'esperienza d'uso. Tale prospettiva permette di interpretare l'edificio come un ecosistema ibrido fatto di strutture architettoniche, ICT, *Digital Twin*, e delle diverse tipologie di utenti che vi interagiscono.

L'edificio, in questo modo, non è un 'progetto finito', ma piuttosto diventa un punto di partenza per una evoluzione trasformativa nell'ottica dell'efficientamento energetico e della sostenibilità. In questo approccio il ruolo delle persone diventa centrale nel plasmare e trasformare in modo partecipativo non solo le strutture, ma anche le attività, proprio come avviene nei servizi (Sangiorgi, 2010). L'elemento partecipativo, proprio del design dei servizi (Manzini, 2016), coinvolge gli utenti nel processo progettuale come co-progettisti, sia nella fase di definizione del progetto "*before use*", in cui grazie agli strumenti della User Experience si cerca di anticipare, prevedere e progettare l'esperienza d'uso, sia nella fase del progetto "*after use*", in cui gli utenti possono aprire il progetto a soluzioni inedite.

Gli elementi 'non-umani', costituiti dagli elementi tecnologici del sistema (IoT, BIM, *Digital Twin*), oltre a fornire i dati, rappresentano l'"oggetto" e «at the same time sociomaterial public things, supporting communication or participation across design-games in the design process» (Pelle, 2008). Come afferma Ehn Pelle (2008), questa strategia 'metaprogettuale' rimanda parte della progettazione e della partecipazione degli utenti al momento dell'uso o del "*design after design*" in una sorta di *design-game*. In questo modo, l'interazione tra il modello fisico e quello virtuale mediata dalle ICT e sviluppata attraverso un approccio che prevede il coinvolgimento e la proattività degli utenti, si trasforma in un'esperienza innovativa finalizzata a migliorare la qualità della vita all'interno dell'edificio e ad adottare comportamenti virtuosi dal punto di vista energetico, sollecitando la creatività e stimolando la collaborazione tra i diversi utenti fino ad attivare soluzioni *soft* oppure a fornire importanti feedback ai gestori della struttura. All'interno della piattafor-



ma, infatti, i dati possono essere gestiti diversificando contenuti e forme, generando uno spazio collaborativo in cui amministratori e tecnici, informati delle condizioni specifiche, possono confrontarsi e realizzare una sintesi del comportamento reale dell'edificio nel corso del tempo. Di conseguenza, individuate le criticità maggiori, il modello digitale può essere implementato simulando scenari futuri di intervento ed evidenziando i miglioramenti ottenibili con diverse soluzioni attraverso la definizione di parametri quantitativi validati sperimentalmente, da un punto di vista delle performance energetiche e dell'IEQ. La *smartness* dell'edificio, attraverso l'applicazione di tecnologie abilitanti, consente quindi agli *users* (in senso generale) di aumentare l'innovazione, la conoscenza, l'apprendimento e la capacità di *problem solving*, contribuendo da un lato ad accrescere la consapevolezza e la capacità di modificare i comportamenti delle persone, dall'altro ad ottimizzare le fasi di studio e progettazione del processo di *retrofitting*, verso una maggiore sostenibilità energetica e ambientale.

Il coinvolgimento degli utenti nel rinnovamento energetico degli edifici

empowerment) degli utenti, – principali leve strategiche per ottenere un'interazione significativa ed efficace con i dati raccolti – l'approccio Living Lab integrato con le metodologie dell'*User Experience* e del *Service Design*, ha permesso di comprendere meglio le dinamiche umane dietro il processo di rinnovamento energetico (acquisendo i dati comportamentali anche con appositi questionari) per poi andare a fornire agli utenti non solo

Rispetto al duplice obiettivo di sensibilizzazione|consapevolezza (*awareness*) e responsabilizzazione|azione (*commitment* e

through a continuous monitoring system installed in the spaces of the Living Lab, consisting of more than 40 sensors that detect environmental data on the distribution of internal temperatures and relative humidity, thermal flows through the envelope elements, lighting levels, air quality, but also local external parameters thanks to the installation of a weather station (Fig. 2). The monitoring system is deliberately redundant in order to understand the behaviour of the different sensor groups and the correlation with other data, starting from user feedback, but also for the subsequent definition of compact *plug&play* systems to be tested in future projects.

The monitored data are subject to post-processing for the quantification of the comfort aspects based on IEQ models (Indoor Environmental Quality), in terms of predicted mean vote and

percentage of satisfied subjects (UNI EN ISO 7730:2006). These results are validated by collecting feedback on the actual experience of the occupants through an online questionnaire on the perception of comfort within the Living Lab, related to thermal, lighting, acoustic and air quality aspects (EN ISO 10551:2019).

The possibility of acknowledging the real and dynamic environmental conditions of the building, influenced by the users, allows to validate the digital model. The connection of the BIM model with the data continuously collected by the sensors and user feedback was possible thanks to the collaboration with IT experts² for initial data visualisation and aggregation (Fig. 3). Considering the quantity and interrelation of data, the next challenge of the physical/virtual Living Lab is to make them usable to different actors and us-

informazioni indirette, ma offrire loro la possibilità di acquisire conoscenze e capacità di rielaborare – *commitment* – (Longoria *et al.*, 2021), grazie ad un supporto comunicativo efficace e all'esperienza attiva, rafforzata e supportata da un ambiente idoneo all'interazione, alla collaborazione e al confronto con gli altri utenti della community.

Nel caso di studio, l'elaborazione dei dati raccolti dai sensori e dei dati comportamentali consente di avere un monitoraggio continuo e costante del sistema edificio/impianto/utenti per consentire un miglioramento del comfort indoor e dell'efficiamento energetico che passa non solo attraverso la tecnologia, ma prevede un più diretto e attivo coinvolgimento dell'utente. Questo, infatti, utilizza lo strumento tecnologico come mezzo e stimolo al sistema per indurlo, grazie alle strategie comunicative, a trasformare lo spazio in cui si trova trovando soluzioni, testando sul modello digitale in grado di fornire proiezioni preliminari anche ad alto livello, per poi applicarle al modello fisico. Il DT dell'edificio introduce nel sistema l'elemento '*non human*' che a sua volta gioca un ruolo fondamentale nel processo di progettazione 'durante l'uso' (Pelle, 2008) e nell'engagement degli utenti, supportando la comprensione dello spazio e consentendo agli utenti di testare le soluzioni proposte.

Numerosi studi confermano che il comportamento degli utenti influisce in maniera significativa sul consumo energetico (Kalviainen, 2022). La metodologia utilizzata consente di innescare comportamenti virtuosi agendo sulle fasi di consapevolezza e scelta dell'utente (Sierra-Pérez *et al.*, 2021). Mantenere il progetto aperto e il coinvolgimento degli utenti nella fase d'uso, può generare soluzioni inedite rispetto al consumo e ai comportamenti energivori. In questo senso si è deciso di precede-

ers for intuitive communication of environmental and energy data, as well as for educational and didactic purposes.

The transformative role of users: building environmental experience

The transdisciplinary approach that has combined space design with Service Design aligns with emerging practices of great interest (Fassi *et al.*, 2018; Collina *et al.*, 2018; Van Geetsom and Wilkinson, 2021). Service Design is characterised by a holistic or systemic approach, focused on the human being and aimed at the co-creation of value (Meroni and Sangiorgi 2011) by involving users not only in the design phase, but also and above all in the experience of use. This perspective allows to interpret the building as a hybrid ecosystem made up of architectural structures, ICT, Digital Twin, and the different types of users who inter-

act with it. Hence, the building is not a 'finished project', but rather becomes a starting point for transformative evolution in the perspective of energy efficiency and sustainability. In this approach, the role of people becomes central in shaping and transforming, in a participatory way, not only structures but also activities, just as happens in services (Sangiorgi, 2010). The participatory element, specific to the design of services (Manzini, 2016), involves users in the design process as co-planners, both in the definition phase of the 'before use' project, in which, thanks to the User Experience tools, we try to anticipate, predict and design the user experience, and in the 'after use' project phase during which users can open the project to new solutions. The 'non-human' elements, consisting of the technological elements of the system (IoT, BIM, Digital Twin), in

re alla progettazione di un'App che, estraendo i dati dal *cloud*, possa accrescere la consapevolezza dell'utente nell'intraprendere azioni nello spazio indoor per migliorare il comfort ambientale/energetico (Figg. 4, 5). Il concept si basa su una lettura multi-user, su una comunicazione che renda immediatamente fruibili e comprensibili i dati (infodata) e su uno *storytelling* che favorisca l'*empowerment* e l'apprendimento dai dati raccolti. Il processo di coinvolgimento è volto a creare un quadro di apprendimento basato sull'esperienza che consentirà ai diversi utenti/attori coinvolti di sviluppare nuove conoscenze sui temi dell'efficientamento energetico e della sostenibilità, ma anche di partecipare attivamente al processo di raccolta dei dati quantitativi e qualitativi e di confrontarsi con problemi energetici e di sostenibilità reali. In particolare, la partecipazione degli utenti viene costruita grazie a strategie di *Engagement Design*, che coinvolgono l'utente a generare soluzioni creative basandosi sui parametri ambientali di comfort termoisometrico, illuminazione, qualità dell'aria e prestazioni dell'edificio.

Sinergia transdisciplinare e sviluppi futuri

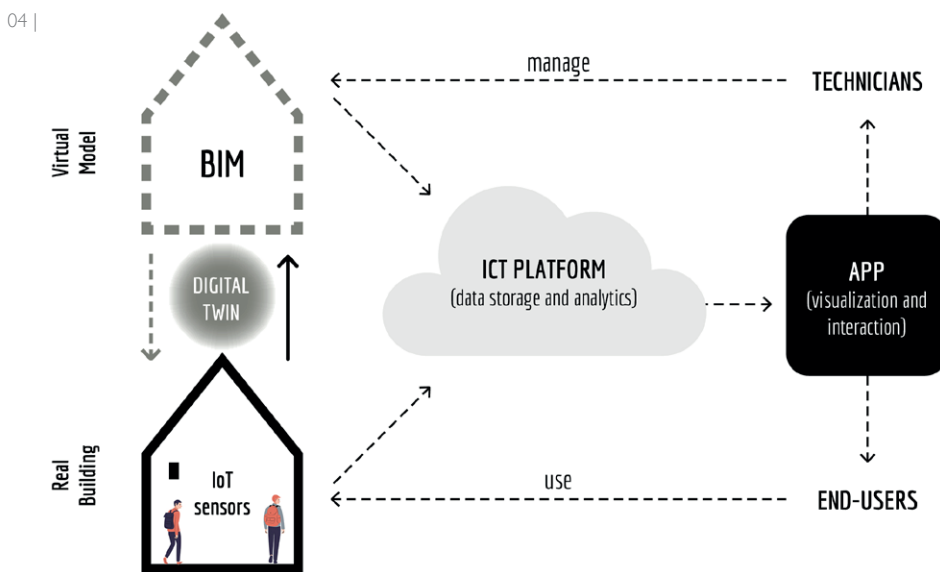
La necessaria transizione ecologica non può prescindere oggi dalle potenzialità offerte dalla

transizione digitale, anche nel settore edilizio. Indagando, mettendo a sistema e testando le tecnologie chiave abilitanti (a partire da ICT e IoT) è possibile, infatti, intravedere grandi opportunità per migliorare l'efficienza energetica negli edifici, nonché per garantire livelli ottimali di comfort per gli occupanti. La possibilità di integrazione di dati dinamici e qualitativi attraverso sistemi di DT permette di aprire ulteriormente il processo edilizio agli occupanti dell'edificio, consentendo loro una

interazione pro-attiva con il modello digitale, per una accresciuta consapevolezza del comportamento dell'edificio quale base per un miglior comportamento dell'utente.

L'espansione della ricerca sta portando alla continua contaminazione di saperi e innescando nuove connessioni tra approccio ecosistemico nella gestione del processo decisionale, applicazioni di strategie e metodi di *service design*, nuovi modelli di elaborazione dei dati e configurazioni di piattaforme con interfacce sempre più *user-friendly* per una nuova narrazione, comunicazione e coinvolgimento dell'utente. La relazione tra edificio / dati quantitativi e qualitativi / *Digital Twin* / Piattaforma / Utente si arricchisce costantemente di nuove soluzioni (ad es. APP) descrittive del comportamento energetico e ambientale dell'edificio, anche in tempo reale, offrendo un approccio abilitante verso le diverse tipologie di utenti. Ma la sfida più interessante sarà passare dal semplice uso del dato e dell'algoritmo come supporto decisionale alla centralità della decisione come valore etico (sociale/culturale/didattico...).

Al di là delle possibilità di automazione derivanti dalle aumentate possibilità di calcolo (fino all'applicazione di Intelligenza Artificiale), l'opportunità più stimolante della sinergia Dati/*Digital Twin*/Piattaforma, risiede nel mettere a disposizione in maniera più intuitiva un quadro conoscitivo interattivo e dinamico dell'edificio, che diventa intellegibile a seconda del tipo di utente e modificabile in base al comportamento virtuoso. Si profila una nuova dimensione della decisione e del *design after design* che passa attraverso lo sviluppo di *storyboard* delle azioni - scenari - in relazione all'esperienza d'uso nello spazio; ma anche la narrazione di *storytelling* sui dati raccolti che agisca nell'ottica di *engagement* degli utenti, capace di incrociare i dati





rilevati dai sensori IoT per fornire consigli per agire fisicamente nello spazio interno.

Il modello sperimentato nel Living Lab offre ampie possibilità di replicare l'esperienza alle diverse scale e in diversi contesti: calibrando di volta in volta sul target specifico l'approccio di *user experience/awareness/user engagement*, sarebbe interes-

sante, ad esempio, poter condurre una ampia sperimentazione nelle scuole di diverso ordine e grado, per intraprendere con docenti e studenti azioni e comportamenti virtuosi per migliorare il comfort ambientale/energetico, amplificando lo scopo educativo e partecipativo nei luoghi del sapere dei temi della sostenibilità.

In addition to providing the data, represent the 'object' and «at the same time sociomaterial public things, supporting communication or participation across design-games in the design process» (Pelle, 2008). As Ehn Pelle (2008) states, this 'meta-design' strategy refers part of the design and participation of users to the time of use or to "design after design" in a kind of design-game. The interaction between the physical and the virtual model mediated by ICT and developed through an approach that foresees the involvement and proactivity of users, therefore, turns into an innovative experience aimed at improving the quality of life within the building, and at adopting virtuous behaviours from the energy point of view, stimulating creativity and collaboration between different users, thus activating soft solutions or providing important feedback to the

managers of the building. Within the platform, in fact, data can be managed by diversifying contents and forms, generating a collaborative space where administrators and technicians, informed of the specific conditions, can dialogue and realise a synthesis of the real building behaviour over time. Consequently, after identifying the major critical issues, the digital model can be implemented by simulating future scenarios of intervention, and highlighting improvements that can be achieved with different solutions through the definition of quantitative parameters experimentally validated from an energy performance and IEQ point of view. Hence, the smartness of the building, through the application of enabling technologies, allows users (in a general sense) to increase innovation, knowledge, learning and problem-solving skills, contributing on the

one hand to improve awareness and the ability to change people's behaviour, and on the other hand to optimise the phases of analysis and design of the retrofitting process. The smartness of the building, through the application of enabling technologies, thus allows users to achieve higher energy and environmental sustainability.

User engagement in the energy renovation of buildings

With respect to the dual objective of awareness and empowerment of users – the main strategic levers to obtain a meaningful and effective interaction with the data collected – the Living Lab approach integrated with the User Experience and Service Design methodologies has allowed a better understanding of the human dynamics behind the energy retrofit process (acquiring behavioural data also with spe-

cific questionnaires) to then provide users not only with indirect information, but also to offer them the opportunity to acquire knowledge and the ability to reprocess it – commitment – (Longoria *et al.*, 2021). This is achieved by effective communication support and active experience, strengthened and underpinned by an environment suitable for interaction, collaboration and comparison with other users in the community.

In the case of the study, the processing of data collected by the sensors and of behavioural data allows to continuously and constantly monitor the building/plant/users system, in order to improve indoor comfort and energy efficiency that passes not only through technology, but provides for a more direct and active involvement of the user. The latter, in fact, uses the technological tool as a means and stimulus to the

RINGRAZIAMENTI

Il contenuto dell'articolo è stato elaborato congiuntamente dai quattro autori. I paragrafi sono stati scritti da: Trombadore A.: La sfida per una nuova dimensione sociale della decisione nel processo progettuale | L'esperienza del Living Lab per abilitare la centralità dell'utente | Sinergie transdisciplinari e sviluppi futuri. Giorgi D.: Il ruolo trasformativo degli utenti: *building environmental experience* | Il coinvolgimento degli utenti nel rinnovamento energetico degli edifici. Calcagno G.: Edifici cognitivi, efficienza energetica e *user experience*: ricerche in atto e potenzialità. Pierucci G.: Il progetto pilota: *best path* per la configurazione di un habitat di qualità.

NOTE

¹ Il progetto Med-EcoSuRe è finanziato dal programma transfrontaliero ENI CBC MED.

² Per il progetto pilota è stata utilizzata la piattaforma aperta Snap4city elaborata dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Informatica dell'Università degli Studi di Firenze (DINFO), coordinato dal Prof. Paolo Nesi.

REFERENCES

Clausen, A., Arendt, K., Johansen, A., Sangogboye, F., Kjærgaard, M., Veje, C. and Jørgensen, B. (2021), A digital twin framework for improving energy efficiency and occupant comfort in public and commercial buildings, *Energy Informatics*, 4(S2).

Collina, L., Di Sabatino, P., Galluzzo, L. and Mastrantoni, C. (2018), Spatial and Service Design: Guidelines Defining University Dormitories, in Aaron Marcus and Wentao Wang (Eds.) *Design, User Experience, and Usability: Theory and Practice*, 7th International Conference, DUXU 2018 Held as Part of HCI International 2018 Las Vegas, NV, USA, July 15–20, 2018, Proceedings, Part I, pp. 14–26.

Del Nord, R. (2016), Potenzialità dell'area tecnologica in tema di ricerca progettuale, in Perriccioli, M. (Ed.) *Pensiero Tecnico e cultura del progetto*.

system to induce it, thanks to communication strategies, to transform the living environment by finding solutions, testing them on the digital model, and then applying them to the physical model.

The DT of the building introduces the 'non-human' element into the system, which, in turn, plays a fundamental role in the co-design process 'during use' (Pelle, 2008) and in the engagement of users, supporting the understanding of space and allowing users to test the proposed solutions.

Numerous studies confirm that user behaviour significantly affects energy consumption (Mirja Kalviainen, 2022). The methodology used allows to trigger virtuous behaviours by acting on the phases of awareness and choice of the user (Sierra-Pérez, Grenha Teixeira, Romero-Piqueras, Patricio, 2021). Keeping the project

open and involving users in the usage phase can generate new solutions with respect to energy consumption and behaviour. In this sense, it was decided to proceed with the design of an App that, by extracting data from the Cloud, can increase user awareness in taking action in the indoor space to improve environmental/energy comfort (Figs. 4, 5). The concept is based on a multi-user reading, on communication that makes the data immediately usable and understandable (infodata), and on storytelling that promotes empowerment and learning from the data collected. The engagement process aims to create a learning framework based on experience that will allow the different users/actors involved to develop new knowledge on energy efficiency and sustainability issues, but also to actively participate in the process of collecting quantitative and qualitative

Riflessioni sulla ricerca tecnologica in architettura, Franco Angeli, Milano, pp. 121-128.

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

Farzaneh, A., Monfet, D. and Forgues, D. (2019), "Review of using Building Information Modeling for building energy modeling during the design process", *Journal of Building Engineering*, Vol. 23, pp. 127-135.

Fassi, D., Galluzzo, L. and De Rosa, A. (2018), "Service+Spatial design: Introducing the fundamentals of a transdisciplinary approach", *Conference Proceedings Proof of Concept. Milan Italy 18-20, June 2018*, Linköping University Electronic Press, pp. 847-862.

Kalviainen M. (2022), *User-driven Service Design for Environmentally Responsible Consumption*, Lathi: LAB University of Applied Sciences.

Karrer, F. (2022), "Buildings, city and territory between real complexity and decision-making reductivism", *TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 23, pp. 21-25.

Longoria, L., López-Forniés, I., Sáenz, D. and Sierra-Pérez, J. (2021), "Promoting sustainable consumption in Higher Education Institutions through integrative co-creative processes involving relevant stakeholders", *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 28, pp. 445-458

Manzini, E. (2016), *Design when everybody designs*, MIT Press, Cambridge.

Meroni, A. and Sangiorgi, D. (2011), *Design for Services*, Routledge, London.

Pelle, E. (2008), "Participation in design things", *Proceedings of the Tenth Conference on Participatory Design, October 1-4, 2008 PDC 2008*, Bloomington, Indiana, USA.

Rinaldi, S., Bellagente, P., Ciribini, A., Tagliabue, L., Poli, T., Mainini, A., Speroni, A., Blanco Cadena, J. and Lupica Spagnolo, S. (2020), "A Cognitive-Driven Building Renovation for Improving Energy Efficiency, The Experience of the ELISIR Project", *Electronics*, Vol. 9, n. 4, 666.

data and to deal with real energy and sustainability problems. In particular, user participation is built thanks to Engagement Design strategies, which involve the user in generating creative solutions based on the environmental parameters of thermo-hygrometric comfort, lighting, air quality and building performance.

Transdisciplinary synergy and future developments

Today, the necessary ecological transition cannot ignore the potential offered by the digital transition, including in the construction sector. The process of investigating, setting up and testing key enabling technologies (starting with ICT and IoT) offers a glimpse of remarkable opportunities to improve energy efficiency in buildings, as well as to ensure optimal levels of comfort for occupants.

The possibility of integrating dynamic and qualitative data through DT systems allows to further open the building process to the building's users, enabling a proactive interaction with the digital model for increased awareness of the behaviour of the building as a basis for better human behaviours.

The expansion of research is leading to the continuous contamination of knowledge, triggering new connections between the ecosystem approach in decision-making, applications of service design strategies and methods, new data processing models and platform configurations with increasingly user-friendly interfaces for new narration, communication and user involvement. The relationship between building/quantitative and qualitative data/Digital Twin/Platform/User is constantly enriched with new solutions (e.g. APPS) that describe the energy

- Sangiorgi, D. (2011), “Transformative Services and Transformation Design”, *International Journal of Design*, Vol. 5, n. 2.
- Shahzad, M., Shafiq, M., Douglas, D. and Kassem, M. (2022), “Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges”, *Buildings*, Vol. 12, n. 2, 120.
- Sierra-Pérez, J., Grenha Teixeira, J., Romero-Piqueras, C. and Patrício, L. (2021), “Designing sustainable services with the ECO-Service design method: Bridging user experience with environmental performance”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 305, 127228.
- Torricelli, M.C. (2017), “Technological culture, theories and practice in architectural design”, *TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 13, pp. 21-26.
- Van Geetsom, N. and Wilkinson A. (2021), “Design culture (of) resilience. Space & Service design taxonomy, overcoming undefined space & service design contexts”, *Cumulus Conference Proceedings Roma 2021, Design Culture (of) RESILIENCE*, pp. 3264-3281.
- Zaballos, A., Briones, A., Massa, A., Centelles, P. and Caballero, V. (2020), “A Smart Campus’ Digital Twin for Sustainable Comfort Monitoring”, *Sustainability*, Vol. 12, n. 21, 9196.

and environmental behaviour of the building in real time, offering an enabling approach for the different users of the building. But the most interesting challenge will be to move from the simple use of data and algorithms as a decision-making support to the centrality of decisions as an ethical value (social/cultural/educational...). Beyond the automation options deriving from the augmented possibilities of calculation (up to the application of artificial intelligence), the most stimulating opportunity of the Data/Digital Twin/Platform synergy lies in making available, in a more intuitive way, an interactive and dynamic cognitive framework of the building, which becomes intelligible depending on the type of user, and can be modified by virtuous behaviours. A new dimension of the decision, and of design after design is emerging that passes through

the development of a storyboard of actions – scenarios – in relation to the experience of use in space. There is also the development of storytelling on the data collected, which acts in the perspective of user engagement, capable of crossing the data collected by the IoT sensors to provide advice for physical actions in the indoor space. The model tested in the Living lab offers ample possibilities to replicate the experience at different scales and in different contexts. By calibrating the user experience/awareness/user engagement approach from time to time on the specific target, it would be interesting, for example, to conduct a wide experimentation in schools of all levels, in order to implement with teachers and students virtuous actions and behaviours to improve environmental/energy comfort, amplifying the educational and participatory purpose in the

places that build knowledge on sustainability issues.

ACKNOWLEDGEMENTS

The content of the paper was jointly produced by the four authors. The paragraphs were written by: Trombadore A.: The challenge of a new social dimension of decision in the design process | The Living Lab experience to enable the centrality of users | Transdisciplinary synergy and future developments. Giorgi D.: The transformative role of users: *building environmental experience* | User engagement in the energy renovation of buildings. Calcagno G.: Cognitive buildings, energy efficiency and user experience: research in progress and potentialities. Pierucci G.: The pilot project: best path for the configuration of a quality habitat.

NOTES

¹The Med-EcoSuRe project is financed under the ENI CBC MED cross-border programme.

²The Snap4city open platform developed by the research group of the Department of Information Engineering of the University of Florence (DINFO), coordinated by Prof. Paolo Nesi, was used for the pilot project.