

Enabling an augmented environmental building experience by users engagement

Antonella Trombadore¹, Debora Giorgi¹, Gisella Calcagno¹, Giacomo Pierucci²

¹ Department of Architecture, Università degli Studi di Firenze, Italy

² Department of Industrial Engineering, Università degli Studi di Firenze, Italy

Primary Contact: Antonella Trombadore, antonella.trombadore@unifi.it

This article has been accepted for publication and undergone full peer review but has not been through the copyediting, typesetting, pagination and proofreading process, which may lead to differences between this version and the Version of Record.

Published: October 22, 2022

DOI: 10.36253/techne-13724

Abstract

The focus on the role of users is the heart of the ongoing research experience in the university Living Lab environment that investigates, systems and tests the potential of the latest digital technologies in the construction sector (BIM-sensors-Digital Twin-IoT) for the definition of 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 increased 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

Please cite this article as:

Trombadore, A., Giorgi, D., Calcagno, G., Pierucci, G. (2022) Enabling an augmented environmental building experience by users engagement / Consentire una esperienza ambientale dell'edificio aumentata dal coinvolgimento degli utenti. *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, Just Accepted.

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

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

However, the need to renew 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 enormous 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 the envelope performances, 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 reappropriate 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 who intervenes and influences the life cycle of the building.

Considering the digital transition in support of the ecological transition, the enabling technologies (starting with ICT, IoT, monitoring and simulating) not only make the behaviour of the building increasingly intelligible and shareable in a performance approach, but 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. The new possibilities to acknowledge the behaviour of buildings and users allow the designer to enrich the heuristic project, stimulating a critical design thinking for the pursuit of increasingly complex and ecosystemic objectives, such as those of sustainability.

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

In the under-digitised construction sector, BIM (Building Information Modelling) can be considered as the most influential ICT technology, for several years recognised at the European (Directive 2014/24/EU) and national (Ministerial Decree 560/2017) regulatory level. The BIM methodology allows to organise in a standardised way the large amount of data and information related to the building, within three-dimensional parametric models, interoperable and implementable over time, which permit better information exchanges between the actors involved and an improved capacity of management and analysis of the building in its different aspects.

In the field of buildings' energy efficiency, 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). As observed by Del Nord (2016), the digital simulation possibilities consent to overcome the concept of building as an object, allowing a pre-optimization of behaviour and use models.

Many research projects at European level exploit the benefits of BIM modelling to optimise the energy renovation of buildings (BIM4REN, BIM4EEB, ENCORE, BIMERR). These projects are joined by attention to the procedural aspects and information needs of the different actors involved (designers, managers, users) and by the definition of digital platforms containing methods and tools that integrate BIM models to increase their collaboration.

In recent years, the availability of an increasing quality and quantity of data, resulting from increased acquisition and computing power, not only gives a glimpse of new descriptive possibilities of the building, throwing a new light on the real and dynamic behaviour of the building itself, but offers new opportunities for predictive narratives and configurations of improvement scenarios.

Developments in Industry 4.0 (sensors, IoT, data analytics, big data) are in fact amplifying the scope of BIM towards the definition of Digital Twin (DT), virtual models of the building capable of synchronising with the real building through a bidirectional data flow (Shahzad et al., 2022). The buildings' digital twins are based on the connection of static data models relating to the different building assets (BIM), with data collected directly from the real building through sensor systems. The possibility of enriching the digital model with data coming from the real building increases the possibilities of analysis in the virtual model, improving in turn the management of the real building. Among the potential of this connection, those related to the energy efficiency of the building, for the monitoring and prediction of the energy behaviour of the building oriented towards the reduction of energy consumptions (Clausen et al., 2021) (Fig.1). Research on DT is accelerating strongly in the field of energy management of buildings, with the definition of digital platforms that allow the further systematisation of dynamic data (TWINERGY, SPHERE, BIMSPEED).

Although also the future of DT is linked to the development of automated processes based on the potential of artificial intelligence (Deng et al., 2021) for the definition of 'cognitive buildings' capable of self-adapting based on internal and external variables (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 and awareness of the building, as a basis for 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 XXX 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, with the proactive involvement of university facility managers, energy managers, local innovative companies, but 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, for the pursuit of the following objectives:

- Define a knowledge framework of the existing building through the BIM methodology for the simulation of energy and environmental aspects and the setting of the DT;
- 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;
- Manage the DT of the building, with dynamic and validated data, based on the cognitive needs of the different users;
- 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 put into system 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 sustainable development can draw new training opportunities from the digital for the future generation of technicians, professionals, decision makers but above all of tomorrow's citizens (Longoria et al., 2021).

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

Exploring in an interdisciplinary and collaborative way the potential of DT development, 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 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 a 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 (UNI EN ISO 7730:2006). These results are validated thanks to the collection of feedback on the real 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 to acknowledge 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 a first 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 users for an 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, Sangiorgi 2011) thanks to the involvement of users not only in the design phase, but also and above all in the experience of use. The Services Design perspective allowed us to interpret the building as a hybrid ecosystem made up of architectural structures, ICT, Digital Twin, and the different types of users who interact with it. The building, in this way, is not a 'finished project', but rather becomes a starting point for a 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, in 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 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). This 'meta-design' strategy refers part of the design and participation of users at the time of use or "design after design" in a kind of design-game, as Ehn Pelle (2008) states: *"in these design-games special attention will be paid to 'representatives' of the design object in the material form of prototypes and models, acting as boundary objects, aligning participants in synchronous design-games of designers and users (participatory design), as well as on infrastructures and the process of infrastructuring binding design-games of designers and future designers/users together (meta-design). In both design approaches [...] will be explored as socio-material frames for controversies, ready for unexpected use, opening up new ways of thinking and behaving."*

In this way, 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, turns into an innovative experience aimed at improving the quality of life within the building and adopting virtuous behaviours from the energy point of view, stimulating creativity and collaboration between different users. Finally, the platform through which the data is managed and communicated generates a collaborative space in which administrators and technicians, informed of the specific conditions, can find intelligent solutions and test them on the digital model, and the people who live in the building can activate soft solutions and give feedback to the managers. The smartness of the building, through the application of enabling technologies, therefore allows users to increase innovation, knowledge, learning and problem solving skills, effectively contributing to increasing awareness and the ability to change behaviours with the aim of greater energy and environmental sustainability.

Users' 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 specific questionnaires) to then provide users not only with indirect information, but to offer them the opportunity to acquire knowledge and the ability to reprocess - commitment - (Longoria et al. 2021), thanks to effective communication support and active experience, strengthened and supported by an environment suitable for interaction, collaboration and comparison with other users in the community.

In the case of the study, the processing of the data collected by the sensors and the behavioural data allows to have a continuous and constant monitoring of the building/plant/users system, consenting an improvement of indoor comfort and energy efficiency that passes not only through technology, but provides for a more direct and active involvement of the user. This, in fact, uses the technological tool as a means and stimulus to the system to induce him, thanks to communication strategies, to transform the living by finding solutions, testing them on the digital model and then applying them to the physical model.

The digital model or 'Digital Twin' 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, Patrício, 2021). Keeping the project open and the involvement of users in the use 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 actions in the indoor space to improve environmental/energy comfort (Fig 4-5). The concept is based on a multi-user reading, on a communication that makes the data immediately usable and understandable (infodata) and on a 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 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 to generate creative solutions based on the following parameters: thermo-hygrometric comfort, lighting, air quality, building performances (fig. 6).

Transdisciplinary debate and future developments

Today, the necessary ecological transition cannot ignore the potential offered by the digital transition, including in the construction sector. By investigating, setting up and testing key enabling technologies (starting with ICT and IoT), it is possible to glimpse great 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 Digital Twin systems, allows to further open the building process to the building's users, allowing them a pro-active interaction with the digital model, for an 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 and environmental behaviour of the building in real time, offering an enabling approach towards 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 support to the centrality of decision as an ethical value (social/cultural/educational...)

Beyond the possibilities of simulation and automation deriving from the increased 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 modifiable according to virtuous behaviours. A new dimension of the decision and design after design is emerging that passes through the development of a storyboard of the actions - scenarios - in relation to the experience of use in space; but also the development of storytelling on the data collected that acts in the perspective of user engagement, capable of crossing the data collected by the IoT sensors to provide advice for physically acting in the indoor space.

The Living Lab/Digital Twin/Platform model tested in the Living lab offers ample possibilities to replicate the experience at different scales and in different contexts. Calibrating the user experience/awareness/user engagement approach from time to time on the specific target, it would be interesting, for example, to be able to conduct a wide experimentation in schools of different order and degree, to undertake with teachers and students virtuous actions and behaviours to improve environmental/energy comfort, amplifying the educational and participatory purpose in the places of knowledge of sustainability issues.

Notes

1. The XXX project is financed under the ENICBC MED cross-border programme.
2. The XXX open platform developed by the research group of the Department of Computer Engineering of the University of XXX, coordinated by XXX, was used for the pilot project.

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 Mastrantonio, 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. 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*, 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*, 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 *ServDes. 2018. 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*, 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*, 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. in *Proceedings of the Tenth Conference on Participatory Design*, PDC 2008, Bloomington, Indiana, USA, October 1-4, 2008.
- 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*, 9(4), 666.
- Sangiorgi, D. (2011), Transformative Services and Transformation Design, in *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*, 12(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*, 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*, Track: 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*, 12(21), 9196.

Images

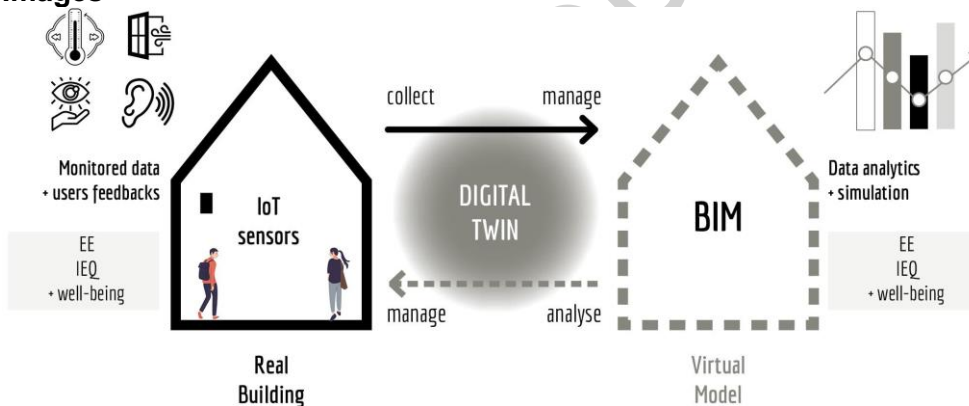


Fig. 01 - Development of Digital Twin for the improvement of energy behaviour and indoor comfort in buildings, through the combination of real data and virtual model



Fig. 02 - Continuous environmental monitoring system of the Living Lab with the main sensors installed



Fig. 03 - First display of the Digital Twin in the XXX platform, connecting the BIM model and the data detected by the continuous environmental monitoring system

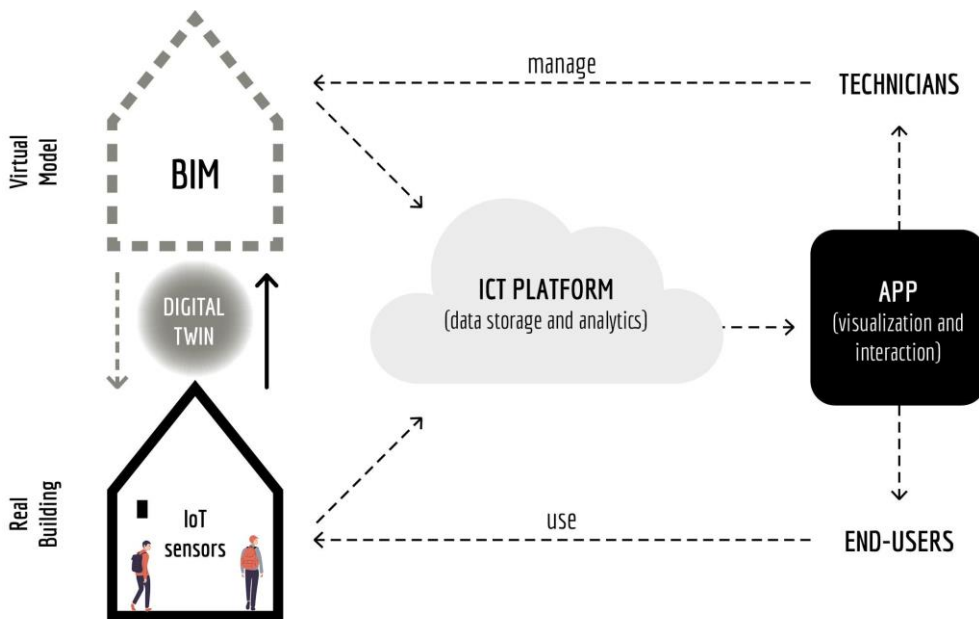


Fig. 04 - Functioning of the visualisation and interaction with the Digital Twin



Fig. 05 - First prototype of the app 'building environmental experience'



Fig. 06 - Selection of the most influential parameters to engage the different categories of users

Attribution, recognition, copyright

The content of the article was elaborated jointly 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* | Users' engagement in the energy renovation of buildings.

Calcagno G.: Cognitive buildings, energy efficiency and user experience: research in progress and potentials.

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

Consentire una esperienza ambientale dell'edificio aumentata dal coinvolgimento degli utenti

Antonella Trombadore¹, Debora Giorgi¹, Gisella Calcagno¹, Giacomo Pierucci²

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

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

Primary Contact: Antonella Trombadore, antonella.trombadore@unifi.it

Abstract

Focalizzare l'attenzione sul ruolo degli utenti è il cuore dell'esperienza di ricerca in corso in ambiente 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 che sostengono il 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

La sfida per una nuova dimensione sociale della decisione nel processo progettuale

Con la recente accelerazione della poli-crisi in atto, 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 garantire 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 (a partire da ICT, IoT, *monitoring and simulating*) non solo rendono sempre più intellegibile e condivisibile il comportamento dell'edificio in un approccio prestazionale, ma consentono di coniugare un approccio user-based che valorizza reale esperienza percettiva e immersiva dell'utente, compresa la sua capacità di adattamento e interazione continua, ampliando la capacità esperienziale nell'uso degli spazi e cambiando il modo di viverli (Torricelli, 2017).

Obiettivo della ricerca in corso 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. Le crescenti possibilità conoscitive del comportamento degli edifici e degli utenti consentono infatti al progettista di arricchire

il progetto euristico, stimolando un pensiero progettuale critico per il perseguimento di obiettivi sempre più complessi e di carattere ecosistemico, come quelli di sostenibilità.

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

Nel sotto-digitalizzato settore edilizio, il BIM (*Building Information Modelling*) può considerarsi come la tecnologia ICT più influente, da diversi anni riconosciuta sul piano normativo europeo (Directive 2014/24/EU) e nazionale (DM 560/2017). La metodologia BIM consente di organizzare in maniera standardizzata la grande quantità di dati e informazioni relative all'edificio, all'interno di modelli tridimensionali parametrici, interoperabili e implementabili nel tempo, che consentono migliori scambi informativi tra gli attori coinvolti e una migliorata capacità di gestione e analisi dell'edificio nei suoi diversi aspetti.

Nell'ambito dell'efficienza energetica degli edifici, le potenzialità del BIM si sono sviluppate nella fase di progettazione, grazie all'interoperabilità BIM-BEM (*Building Energy Modeling*) con software di simulazione del comportamento energetico dell'edificio a scopo diagnostico e predittivo (Farzaneh et al. 2019). Come osservato da Del Nord (2016), le possibilità digitali di simulazione permettono di superare il concetto di edificio come oggetto, consentendo una pre-ottimizzazione dei modelli di comportamento e d'uso.

Numerosi progetti di ricerca a livello europeo sfruttano i vantaggi della modellazione BIM per ottimizzare il rinnovamento energetico degli edifici (BIM4REN, BIM4EEB, ENCORE, BIMERR). Tali progetti sono accomunati dall'attenzione agli aspetti processuali e alle necessità informative dei diversi attori coinvolti (progettisti, gestori, utenti) e dalla definizione di piattaforme digitali contenenti metodi e strumenti che integrano modelli BIM per incrementare la loro collaborazione.

Negli ultimi anni, la disponibilità di una crescente qualità e quantità di dati, derivante da accresciute possibilità di acquisizione e di calcolo, non solo fa intravedere nuove possibilità descrittive dell'edificio, gettando una nuova luce sul comportamento reale e dinamico dell'edificio stesso, ma offre nuove opportunità di narrazioni predittive e configurazioni di scenari migliorativi.

Gli sviluppi dell'Industria 4.0 (sensori, IoT, *data analytics*, *big data*) stanno infatti amplificando la portata del BIM verso la definizione di Digital Twin (DT), modelli virtuali dell'edificio capaci di sincronizzarsi con l'edificio reale attraverso un flusso di dati bidirezionale (Shahzad et al., 2022). I gemelli digitali degli edifici si basano sul collegamento di modelli di dati statici relativi ai diversi asset dell'edificio (BIM), con dati rilevati direttamente dall'edificio reale attraverso sistemi di sensori. La possibilità di arricchire il modello digitale con i dati dell'edificio reale aumenta le possibilità di analisi nel modello virtuale, per migliorare a sua volta la gestione dell'edificio reale. Tra le potenzialità di tale connessione, quelle relative all'efficienza energetica dell'edificio, per il monitoraggio e la predizione del comportamento energetico dell'edificio orientato alla riduzione dei consumi (Clausen et al., 2021) (Fig.1). La ricerca sui DT sta imprimendo una forte accelerazione nell'ambito della gestione energetica degli edifici, con la definizione di piattaforme digitali che consentono la sistematizzazione ulteriore di dati dinamici (TWINERGY, SPHERE, BIMSPEED).

Benché anche il futuro dei DT sia legato allo sviluppo di processi automatizzati basati sulle potenzialità dell'intelligenza artificiale (Deng et al., 2021) per la definizione di 'edifici cognitivi' capaci di auto-adattarsi in base a variabili interne ed esterne (Rinaldi et al., 2020), la loro portata innovativa riguarda la possibilità di tener conto e di interagire con l'esperienza degli utenti, consentendo loro una maggiore conoscenza e consapevolezza dell'edificio, quale base 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 rinnovamento energetico e ambientale degli edifici esistenti, per migliorare la qualità ecosistemica e l'adattività dell'ambiente costruito, è stata la naturale espansione del progetto di ricerca XXX¹, che vede nelle università dei catalizzatori capaci di promuovere un rinnovamento eco-sostenibile degli edifici pubblici in ambito mediterraneo. Tale progetto ha previsto la realizzazione di un Living Lab all'interno dell'edificio pilota universitario da rinnovare, con il coinvolgimento proattivo dei gestori del patrimonio universitario, dei gestori

energetici 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 il perseguimento dei seguenti obiettivi:

- Definire un quadro conoscitivo dell'edificio esistente attraverso la metodologia BIM per la simulazione degli aspetti energetici e ambientali e l'impostazione del DT;
- 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;
- Gestire il DT dell'edificio, con dati dinamici e validati, in base alle esigenze conoscitive dei diversi utenti;
- 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 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 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 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 and 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 and Sangiorgi 2011) grazie al coinvolgimento degli utenti non solo nella fase di progettazione, ma anche e soprattutto nell'esperienza d'uso. La prospettiva del Design dei Servizi ci ha permesso 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). 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, come afferma Ehn Pelle (2008): *"in these design-games special attention will be paid to 'representatives' of the design object in the material form of prototypes and models, acting as boundary objects, aligning participants in synchronous design-games of designers and users (participatory design), as well as on infrastructures and the process of infrastructuring binding design-games of designers and future designers/users together (meta-design). In both design approaches [...] will be explored as socio-material frames for controversies, ready for unexpected use, opening up new ways of thinking and behaving."*

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. Infine, la piattaforma attraverso cui vengono gestiti e comunicati i dati genera uno spazio collaborativo in cui amministratori e tecnici, informati delle condizioni specifiche, possono trovare soluzioni intelligenti e testarle sul modello digitale, e le persone che vivono nell'edificio possono attivare soluzioni soft e dare un feedback ai gestori. La smartness dell'edificio, attraverso l'applicazione di tecnologie abilitanti, consente quindi agli users di aumentare l'innovazione, la conoscenza, l'apprendimento e le capacità di problem solving, contribuendo di fatto ad accrescere la consapevolezza e la capacità di modificare i comportamenti con l'obiettivo di una maggiore sostenibilità energetica e ambientale.

Il coinvolgimento degli utenti nel rinnovamento energetico degli edifici

Rispetto al duplice obiettivo di sensibilizzazione|consapevolezza (*awareness*) e responsabilizzazione|azione (*commitment* e *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 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'efficientamento 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, testandole sul modello digitale in grado di fornire proiezioni preliminari anche ad alto livello, per poi applicarle al modello fisico.

Il modello digitale o 'Digital Twin' dell'edificio introduce nel sistema l'elemento 'non human' che a sua volta gioca un ruolo fondamentale nel processo di co-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 procedere 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 e 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 coinvolgano l'utente a generare soluzioni creative basandosi sui seguenti parametri: comfort termoigrometrico, illuminazione, qualità dell'aria, prestazioni dell'edificio (Fig. 6).

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 Digital Twin, 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 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 in tempo reale offrendo un approccio abilitante verso i diversi utenti dell'edificio. 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 simulazione e automazione derivanti dalle accresciute 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 Living Lab/Digital Twin/Piattaforma 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 interessante 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.

Note

1. Il progetto XXX è finanziato dal programma transfrontaliero ENICBC MED.
2. Per il progetto pilota è stata utilizzata la piattaforma aperta XXX elaborata dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Informatica dell'Università di XXX, coordinato da XXX.

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 Mastrantonio, 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. 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*, 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*, 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 *ServDes. 2018. 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*, 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*, 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. in *Proceedings of the Tenth Conference on Participatory Design*, PDC 2008, Bloomington, Indiana, USA, October 1-4, 2008.
- 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*, 9(4), 666.
- Sangiorgi, D. (2011), Transformative Services and Transformation Design, in *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*, 12(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*, 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*, Track: Design Culture (of) RESILIENCE, pp. 3264-3281
- Zaballo, A., Briones, A., Massa, A., Centelles, P. and Caballero, V. (2020), A Smart Campus' Digital Twin for Sustainable Comfort Monitoring. *Sustainability*, 12(21), 9196.

Didascalie immagini

Fig. 01 - Sviluppo di Digital Twin per il miglioramento del comportamento energetico e del comfort negli edifici, attraverso la combinazione di dati reali e modello virtuale

Fig. 02 - Sistema di monitoraggio ambientale in continuo del Living Lab con i principali sensori installati

Fig. 03 - Prima visualizzazione del Digital Twin nella piattaforma XXX, con collegamento del modello BIM e dei dati rilevati dal sistema di monitoraggio in continuo

Fig. 04 - Funzionamento della visualizzazione e interazione con il Digital Twin

Fig. 05 - Primo prototipo della app *building environmental experience*

Fig. 06 - Selezione dei parametri più influenti per l'engagement delle diverse categorie di utenti

Attribuzione, riconoscimenti, diritti d'autore

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 ed user experience: ricerche in atto e potenzialità.

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